

Министерство образования Республики Беларусь
учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники»

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

TECHNOLOGIES OF INFORMATION TRANSMISSION AND PROCESSING

МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СЕМИНАРА
(Минск, апрель 2025 г.)

Минск, 2025

УДК 654.1:004.056.5
ББК 32.88+32.971.35-5
Т38

Научный программный комитет:

В. Ю. Цветков, Н. И. Листопад, Б. В. Никульшин, И. С. Азаров, В. А. Вишняков,
С. А. Золотой, А. А. Пилюшко, С. Н. Касанин, Ю. В. Бругтан,
О. Дж. М. Аль-Фурайджи, Фам Хак Хоан, В. К. Конопелько, Д. А. Сикорский

Т38 **Технологии** передачи и обработки информации = Technologies of Information Transmission and Processing : материалы Международного научно-технического семинара (Минск, апрель 2025 г.). – Минск : БГУИР, 2025. – 192 с.

ISBN 978-985-543-820-6.

Сборник содержит статьи, тематика которых посвящена научно-теоретическим разработкам в области сетей телекоммуникаций, информационной безопасности, технологий передачи и обработки информации.

Предназначен для научных сотрудников в области инфокоммуникаций, преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов технических вузов.

Научное издание

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

TECHNOLOGIES OF INFORMATION TRANSMISSION AND PROCESSING

Материалы Международного научно-технического семинара
(Минск, апрель 2025 г.)

В авторской редакции
Ответственный за выпуск *В.Ю. Цветков*
Компьютерный дизайн и верстка *Е.Г. Макейчик*

Подписано в печать 03.06.2025. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Печать цифровая. Усл. печ. л. 22,55. Уч.-изд. л. 20,7. Тираж 70 экз. Заказ 91.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск,

ISBN 978-985-543-820-6

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

С.И. СИРОТКО, Ц. МА, М.И. ЗОРЬКО, С.В. ЛИТВИНОВ, В.Ю. ЦВЕТКОВ МОДЕЛИ ОДНОВРЕМЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ И ПОСТРОЕНИЯ КАРТЫ ОТКРЫТОГО ПРОСТРАНСТВА БЛА С ПОМОЩЬЮ МНОГОКАМЕРНОЙ ВИДЕОСИСТЕМЫ	7
С.М. САЦУК, С.В. ДРОБОТ, В.Н. РУСАКОВИЧ ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ КОНТРОЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ГОСАТОМНАДЗОРА.....	15
В.В. КРАСНОПРОШИН, А.А. СТАРОВОЙТОВ МУЛЬТИМОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ	18
К.Э. ЧЕРНЯВСКИЙ, А.В. СИТНИКОВ, А.Н. МАРКОВ РАЗРАБОТКА КОГНИТИВНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА В ОБРАБОТКЕ ТЕКСТОВОЙ ИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА.....	31
К.А. СКАЛОЗУБ, С.Н. НЕСТЕРЕНКОВ, А.Д. ЯРМОШ ГРАДИЕНТНЫЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ В КОМПЬЮТЕРНОМ ЗРЕНИИ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ	34
В.А. ВИШНЯКОВ, М.Ю. МАКСАК КОНЦЕПЦИЯ, МОДЕЛЬ, ПРИМЕРЫ СИСТЕМ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	37
И.И. ЛЕВОНЕНКО, А.Д. РОБАЧЕВСКИЙ, М.Ю. ЛОВЕЦКИЙ, Е.Г. МАКЕЙЧИК ФОРМИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА БАЗЕ ОДНОПЛАТНОГО КОМПЬЮТЕРА.....	42
А.Д. ВАСЮТИЧ, Н.С. ДАВЫДОВА ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АУДИОКОДЕКОВ НА КАЧЕСТВО ЗВУЧАНИЯ СТРИМИНГОВЫХ ПЛАТФОРМ.....	49
И.П. КОБЯК ЗАЩИТА ОТ ПОМЕХ В КВАНТОВО-КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ КАНАЛАХ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ МЕТОДИК РАСЧЕТА ПРОСТРАНСТВ И МАССЫ ВОДОРОДОПОДОБНЫХ АТОМОВ	55
Я.В. РОЩУПКИН ПРИМЕНЕНИЕ ПИЛОТ-СИГНАЛА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ.....	62
Н.В. ХАДЖИНОВА, М.О. САВОНЕВСКАЯ, В.В. СТОЛЯРОВА, Л.А. ЧЕРНИКОВА АЛГОРИТМЫ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ДОСТУПА К КАНАЛАМ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ (5G, 6G) ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ЗАДЕРЖЕК В УСЛОВИЯХ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ.....	67
Y.M. CHEN, V. Yu. TSVIATKOU IMPACT OF COLOR SPACE ON NEURAL NETWORKS.....	73
Н.А. ТОМАШЕВИЧ, Р.П. БОГУШ, С.А. ИГНАТЬЕВА РЕИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛЮДЕЙ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАНИЯ ПРИЗНАКОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ ФИГУРЫ И ЛИЦА	77
И.В. ВЕРГЕЛЬ, С.Н. БАРСУКЕВИЧ, С.А. МИГАЛЕВИЧ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ ДАННЫХ.....	82
А.А. ШВАЯ, А.Д. РОБАЧЕВСКИЙ, М.Ю. ЛОВЕЦКИЙ, И.И. ЛЕВОНЕНКО, В.В. ЧЕПИКОВА ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ОБЪЕДИНЕНИЯ АСМ- ИЗОБРАЖЕНИЙ С НАИЛУЧШИМИ ВЕСОВЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ	86
ПЬАЕ ПЬИО ХЛАНГ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ С НЕПРЕРЫВНЫМ ЧАСТОТНО- МОДУЛИРОВАННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ	90
А.С. ВАБИЩЕВИЧ, А.Д. ВАСЮТИЧ, А.В. КУРИЛОВИЧ, Ц. МА, С.Х. ЖЭНЬ, В.Ю. ЦВЕТКОВ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ	98
N.V. VASCH APPLICATION FOR METHANE GAS DETECTION AND MEASUREMENT USING ADAPTIVE TIME SYNCHRONOUS MOVING AVERAGE	102
В.А. ВИШНЯКОВ, М.О. КАЦКО СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЛОКЧЕЙН В ЭЛЕКТРОННОЙ МЕДИЦИНЕ .	107
J.H. LIU, S. XIONG, Z.F. DANG, J. MA RUSSIAN HANDWRITING RECOGNITION BASED ON DEEP LEARNING	112
Е.А. СЕМЕНЧЕНКО, В.В. КОСТРИЦКИЙ, Р.П. БОГУШ ЭЛЕКТРОННОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОБЩЕГО УСТРОЙСТВА И ПРИНЦИПОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЯ.....	115

W.Q. WANG, X. ZHANG, J. MA PERFORMANCE EVALUATION OF YOLOV12 IN SAR IMAGE TARGET DETECTION: A COMPARATIVE STUDY WITH YOLOV11	122
H. LI, V. Yu. TSVIATKOU APPLICATION OF A NONPARAMETRIC GAIT MODEL AND FEATURE GENERATION BASED ON INSOLE DATA	126
N.V. BACH ENHANCING GAS DISTRIBUTION MAPPING RECONSTRUCTION ACCURACY THROUGH GEOMETRIC SCANNING TECHNIQUES.....	130
А.М. ТИМОФЕЕВ, К.Р. ВОСКОВЦЕВА, Я.А. КЛИНДУХОВ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ОБЕЗЛИЧИВАНИЯ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ.....	134
Т.В. ПОЛУЯН, В.Ю. ЦВЕТКОВ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИЙ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ СЕТИ.....	137
QICHENG GUO RESEARCH ON RELATIVE LOCALIZATION OF MOBILE ROBOTS BASED ON MONOCULAR VISION AND KNOWN TAGS	141
S.Y. ZHAO, C. ZHANG, J. MA A REVIEW OF YOLOV11 BASED ON SAR SHIP DETECTION	144
В.Ю. МИШЕПУД, В.О. СОРКИН, М.Ю. ШУХМАН, К.А. ХАДЖИНОВА ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПЕРЕГРУЗОК В ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ	148
H. LI, V. Yu. TSVIATKOU APPLICATION OF SORTED METRICS BASED ON INSOLE FEATURE MINING.....	155
И.А. ТРЕТЬЯКОВ, М.Г. ЧУМАЧЕНКО АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ В СЕТЕВОМ ТРАФФИКЕ ...	158
Y.M. CHEN METHODS OF LOW DATA IMAGE CLASSIFICATION WITH NEURAL NETWORK	162
X. WANG, A.M. PRUDNIK CONCEPTUAL FRAMEWORK AND THEORETICAL CHALLENGES IN UNSUPERVISED ANOMALY DETECTION FOR NETWORK TRAFFIC DATA	165
Е.В. БЕГЛЯК, В.А. МАРЦИНКЕВИЧ СОВРЕМЕННЫЕ ПРОТОКОЛЫ АУТЕНТИФИКАЦИИ И АВТОРИЗАЦИИ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ.....	168
А.М. ТИМОФЕЕВ, М.А. ТАВГЕНЬ, А.С. ЯНКОВЕЦ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРИ ИХ ОБРАБОТКЕ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ	176
QICHENG GUO RESEARCH ON DEPTH ESTIMATION FOR MONOCULAR CAMERAS BASED ON PRIOR INFORMATION.....	179
В.А. КРАГЕЛЬ, М.В. РОМАНЮК ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОБИЛЬНЫХ СЕТЕЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ В ИНТЕРНЕТЕ ВЕЩЕЙ	183

CONTENTS

S.I. SIROTKA, J. MA, M.I. ZORKO, S.V. LITVINOV, V.Yu. TSVIATKOU MODELS OF SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAP CONSTRUCTION OF OPEN SPACE OF UAVS USING A MULTI-CAMERA VIDEO SYSTEM.....	7
S.M. SATSUK, S.V. DROBAT, U.M. RUSAKOVICH SOFTWARE FOR PROCESSING OF INFORMATION IN ORGANIZING OF CONTROL ACTIVITIES OF GOSATOMNADZOR	15
V.V. KRASNOPROSHIN, A.A. STAROVOITOV MULTI-MODEL APPROACH TO BUILDING PROACTIVE COMPUTATIONAL RESOURCE MANAGEMENT SYSTEMS.....	18
K.E. CHERNYAVSKY, A.V. SITNIKOV, A.N. MARKOV DEVELOPMENT OF A COGNITIVE-ORIENTED APPROACH TO TEXT INFORMATION PROCESSING USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE	31
K.A. SKALOZUB, S.N. NESTERENKOV, A.D. YARMOSH GRADIENT OPTIMIZATION METHODS IN COMPUTER VISION FOR MEDICAL DIAGNOSTICS	34
U.A. VISHNIAKOU, M.Yu MAKSAK CONCEPT, MODEL, EXAMPLES OF INTERNET OF THINGS SYSTEMS FOR EFFICIENT POWER SUPPLY	37
I.I. LIAVONENKA, A.D. ROBACHEVSKIY, M.Yu. LAVETSKI, E.G. MAKEICHIK FORMATION OF COMBINED MULTISPECTRAL IMAGES BASED ON A SINGLE-BOARD COMPUTER A.D. VASIUTICH, N.S. DAVYDOVA	42
STUDY OF THE IMPACT OF AUDIO CODECS ON THE SOUND QUALITY OF STREAMING PLATFORMS	49
I.P. KOPYAK INTERFERENCE PROTECTION IN QUANTUM CRYPTOGRAPHIC COMMUNICATION CHANNELS BASED ON METHODS FOR CALCULATING THE SPACES AND MASSES OF HYDROGEN-LIKE ATOM Y.V. ROSHCHUPKIN	55
APPLICATION OF PILOT-SIGNAL TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY OF FIBER-OPTIC COMMUNICATION SYSTEMS	62
N.V. KHAJYNAVA, M.A. SAVANEUSKAYA, V.V. STALIAROVA, L.A. CHERNIKAVA MULTI-AGENT CHANNEL ACCESS ALGORITHMS FOR MOBILE COMMUNICATION (5G, FUTURE 6G) FOR DELAY MINIMIZATION IN THE INTERNET OF THINGS (IOT) ENVIRONMENT	67
Y.M. CHEN, V. Yu. TSVIATKOU IMPACT OF COLOR SPACE ON NEURAL NETWORKS.....	73
N.A. TOMASHEVICH, R.P. BOHUSH, S.A. IHNATSYEVA PERSON RE-IDENTIFICATION IN SURVEILLANCE IMAGES BASED ON COMBINATION OF BODY AND FACE FEATURES	77
I.V. VERGHEL, S.N. BARSUKEVICH, S.A. MIGALEVICH APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS TO OPTIMIZE DATA COMPRESSION ALGORITHMS	82
A.A. SHVAYA, A.D. ROBACHEVSKI, M.Yu. LAVETSKI, I.I. LIAVONENKA, V.V. CHEPIKOVA IMAGE QUALITY IMPROVEMENT BASED ON THE ALGORITHM OF COMBINING AFM IMAGES WITH THE BEST WEIGHT COEFFICIENTS	86
PYAE PHYO HLAING COMPUTER MODEL OF A RADAR STATION WITH CONTINUOUS FREQUENCY-MODULATED RADIATION.....	90
A.S. VABISHCHEVICH, A.D. VASIUTICH, A.V. KURILOVICH, J. MA, X.H. REN, V.Yu. TSVIATKOU COMPARATIVE ANALYSIS OF NOISE-RESISTANT DECODING ALGORITHMS	98
N.V. BACH APPLICATION FOR METHANE GAS DETECTION AND MEASUREMENT USING ADAPTIVE TIME SYNCHRONOUS MOVING AVERAGE	102
V.A. VISHNYAKOV, M.A. KATSKO STATUS AND PROSPECTS OF BLOCKCHAIN USE IN ELECTRONIC MEDICINE	107
J.H. LIU, S. XIONG, Z.F. DANG, J. MA RUSSIAN HANDWRITING RECOGNITION BASED ON DEEP LEARNING	112
E.A. SEMENCHENKO, V.V. KOSTRITSKIY, R.P. BOHUSH AN ELECTRONIC TOOL FOR STUDYING THE GENERAL STRUCTURE AND PRINCIPLES OF DIAGNOSING THE TECHNICAL CONDITION OF A CAR	115

W.Q. WANG, X. ZHANG, J. MA	
PERFORMANCE EVALUATION OF YOLOV12 IN SAR IMAGE TARGET DETECTION: A COMPARATIVE STUDY WITH YOLOV11	122
H. LI, V. Yu. TSVIATKOU	
APPLICATION OF A NONPARAMETRIC GAIT MODEL AND FEATURE GENERATION BASED ON INSOLE DATA	126
N.V. BACH	
ENHANCING GAS DISTRIBUTION MAPPING RECONSTRUCTION ACCURACY THROUGH GEOMETRIC SCANNING TECHNIQUES.....	130
A.M. TIMOFEEV, K.R. VOSKOVTSOVA, Y.A. KLINDUKHOV	
STRUCTURAL SCHEME OF DEPERSONALIZATION OF PERSONAL DATA	134
T.V. PALUYAN, V. Yu. TSVIATKOU	
MODELING THE TOPOLOGY OF A SELF-ORGANIZING NETWORK	137
QICHENG GUO	
RESEARCH ON RELATIVE LOCALIZATION OF MOBILE ROBOTS BASED ON MONOCULAR VISION AND KNOWN TAGS	141
S.Y. ZHAO, C. ZHANG, J. MA	
A REVIEW OF YOLOV11 BASED ON SAR SHIP DETECTION.....	144
V.Y. MISHEPUD, V.O. SORKIN, M.Y. SHUHMANN, K.A. KHADZHYNAYA	
DIGITAL TWINS FOR CONGESTION FORECASTING IN TRANSPORT NETWORKS BASED ON MULTI-AGENT SYSTEMS	148
H. LI, V. YU. TSVIATKOU	
APPLICATION OF SORTED METRICS BASED ON INSOLE FEATURE MINING.....	155
I.A. TRETIKOV, M.G. CHUMACHENKO	
AUTOMATED SYSTEM OF ANOMALY DETECTION IN NETWORK TRAFFIC	158
Y.M. CHEN	
METHODS OF LOW DATA IMAGE CLASSIFICATION WITH NEURAL NETWORK	162
X. WANG, A.M. PRUDNIK	
CONCEPTUAL FRAMEWORK AND THEORETICAL CHALLENGES IN UNSUPERVISED ANOMALY DETECTION FOR NETWORK TRAFFIC DATA	165
E.V. BEGLIAK, U.A. MARTSINKEVICH	
MODERN AUTHENTICATION AND AUTHORIZATION PROTOCOLS IN WIRELESS NETWORKS	168
A.M. TIMOFEEV, M.A. TAVGEN, A.S. YANKOVETS	
ENSURING INFORMATION SECURITY OF PERSONAL DATA WHEN PROCESSING THEM IN INFORMATION SYSTEMS	176
QICHENG GUO	
RESEARCH ON DEPTH ESTIMATION FOR MONOCULAR CAMERAS BASED ON PRIOR INFORMATION.....	179
V.A. KRAGEL, M.V. ROMANYUK	
THE PROSPECTS FOR NEXT-GENERATION CELLULAR NETWORKS IN THE INTERNET OF THINGS	183

УДК 303.732.4, 004.932.2, 681.51

МОДЕЛИ ОДНОВРЕМЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ И ПОСТРОЕНИЯ КАРТЫ ОТКРЫТОГО ПРОСТРАНСТВА БЛА С ПОМОЩЬЮ МНОГОКАМЕРНОЙ ВИДЕОСИСТЕМЫ

С.И. СИРОТКО¹, Ц. МА¹, М.И. ЗОРЬКО¹, С.В. ЛИТВИНОВ², В.Ю. ЦВЕТКОВ¹

1 – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь; 2 – ООО «ЮВР», Республика Беларусь

Поступила в редакцию 05 марта 2025

Аннотация. Рассматривается задача одновременной локализации и построения карты окружения (SLAM – simultaneous localization and mapping) беспилотного летательного аппарата (БЛА), оснащенного многокамерной видеосистемой, или сети БЛА, оснащенных однокамерными или многокамерными видеосистемами. Предложены общие модели формирования трехмерных карт окружающего пространства; детектирования, выделения признаков и идентификации объектов; определения расстояний до объектов и их размеров. Показано преимущество использования для локализации и картографирования высокоуровневых геометрических и семантических объектов по сравнению с низкоуровневыми объектами (точками).

Ключевые слова: БЛА вертолетного типа, одновременная локализация и построение карты окружения, SLAM, многокамерная видеосистема.

Введение

Технология одновременной локализации и построения карты окружения (SLAM – simultaneous localization and mapping) мобильного робота (любого базирования: наземного, воздушного) интенсивно развивается в последние годы. В настоящее время достигнуты определенные успехи в условиях закрытых пространств. Например, в помещениях с постоянной освещенностью. Такие условия обеспечивают стабильность значений параметров изображений, формируемых видеосистемой робота, что позволяет достаточно точно определять его текущее местоположение, находя соответствие с ранее сохраненными данными об окружающем пространстве. Однако, данная технология недостаточно эффективна в условиях открытых пространств с динамическими объектами сложной структуры и естественного освещения, зависящего от поры года, времени суток, погодных условий, загазованности воздуха и задымления, появления дополнительных искусственных источников света. В таких условиях существенно изменяются яркостно-контрастные характеристики изображений, что приводит к ошибкам идентификации их объектов. Также, большинство систем SLAM используют только один признак для представления карты и одну форму карты. Большинство сопоставлений основаны на полутоновых изображениях и игнорируют цветовые свойства, теряя важную информацию о сцене, что влияет на точность сопоставления. В этой связи актуальными являются исследования, направленные на повышение эффективности одновременной локализации и построения карты окружения БЛА вертолетного типа в открытом пространстве с помощью многокамерной видеосистемы. Следует отметить также высокую вычислительную сложность технологии, затрудняющую ее применение для БЛА.

Цель работы: разработка общих моделей одновременной локализации и построения карты, позволяющих повысить точность определения координат одного или нескольких БЛА вертолетного типа, оснащенных многокамерными видеосистемами, и объектов трехмерных карт окружения при отсутствии сигналов навигационной системы и управления.

Постановка задачи

Вероятностная модель движения БЛА, связывающая его текущее и предыдущее положения (если мало) с учетом карты m , описывается выражением [1]

$$p(x_t | u_t, x_{t-1}, m) = \eta p(x_t | u_t, x_{t-1}) p(x_t | m), \quad (1)$$

или

$$p(x_t | u_t, x_{t-1}, m) = \eta p(m | x_t, u_t, x_{t-1}) p(x_t | u_t, x_{t-1}), \quad (2)$$

где u_t – управляющее воздействие на БЛА; η – нормирующая константа.

Карта m представляет собой список N объектов окружающего пространства БЛА и их свойств [1]: $m = \{m_1, m_2, \dots, m_N\}$.

Модель измерения z_t в момент времени t положений ориентиров относительно положения БЛА определяется в виде распределения условной вероятности $p(z_t | x_t, m)$ [1].

Вектор признаков $f(z_t)$ может быть представлен как совокупность K измерений [1]:

$$f(z_t) = \{f_t^1, f_t^2, \dots, f_t^K\}.$$

Соответствие между признаком f_t^i и ориентиром m_j на карте m определяется через переменную c_t^i – идентификатор наблюдаемого признака [1].

Для одновременной локализации и картографирования справедливы модели онлайн SLAM и полного SLAM, задаваемые выражениями $p(x_t, m, c_t | z_{1:t}, u_{1:t})$, $p(x_{1:t}, m, c_{1:t} | z_{1:t}, u_{1:t})$, связанные выражением [1]

$$p(x_t, m, c_t | z_{1:t}, u_{1:t}) = \int \dots \int \sum_{c_1} \sum_{c_2} \dots \sum_{c_{t-1}} p(x_{1:t}, m, c_{1:t} | z_{1:t}, u_{1:t}) dx_1 dx_2 \dots dx_{t-1}. \quad (3)$$

Анализ вероятностной модели SLAM показывает, что использование БЛА с бортовой многокамерной видеосистемой, как и совместно нескольких БЛА увеличивает количество наблюдаемых ориентиров, повышая надежность определения координат и карты. Дополнительная возможность повышения надежности заключается в выборе ориентиров и их идентификационных параметров. Обратной стороной реализации данных возможностей является рост вычислительной сложности алгоритмов одновременной локализации и построения карты окружающего пространства, для реализации которых необходимы значительные бортовые вычислительные ресурсы. С этим связано увеличение веса полезной нагрузки БЛА за счет вычислительной платформы, что делает необходимым использование БЛА среднего и тяжелого типов, способных переносить значительную по массе полезную нагрузку, например, БЛА ELECTRON 7 (грузоподъемность до 7 кг), SAKAVIC (грузоподъемность до 200 кг), COMBO (грузоподъемность до 1150 кг) [2].

Модели формирования трехмерных карт окружения с использованием низкоуровневых и высокоуровневых геометрических признаков

Для технологии многокамерной одновременной локализации и картографирования предлагается общая модель L -точечных низкоуровневой и высокоуровневой 3D карт окружения $M_{3D} = \|m_{3D}(l, d, r_B)\|_{(l=0, L-1, d=0, D-1)}$, основанная на описаниях множеств (облаков) низкоуровневых и высокоуровневых ключевых объектов трехмерного пространства, распределенным по D направлениям, соответствующим областям обзора камер:

$$m_{3D}(l, d, r_B) \Leftrightarrow \left\{ (x(l, d, n), y(l, d, n), z(l, d, n), F(l, d, n), H(l, d, n)) \right\}_{(n=0, N(l, d, r_B)-1)}. \quad (4)$$

где r_B – базовый ракурс, для (относительно) которого формируется 3D карта окружения – определяется координатами в трехмерном пространстве $r_B \Leftrightarrow (x_r, y_r, z_r)$ и множеством углов между

главными точками облаков ключевых объектов $r_B \Leftrightarrow \{\alpha_d\}_{(d=0, D-1)}$; n – номер ключевого объекта в облаке; $N(l, d, r_B)$ – количество ключевых объектов в облаке (размер облака) для r -го ракурса; $(x(l, d, n), y(l, d, n), z(l, d, n))$ – координаты n -го ключевого объекта в 3D пространстве; $F(l, d, n)$ – алгоритм детектирования n -го ключевого объекта; $H(l, d, n)$ – дескриптор n -го ключевого объекта.

Модель отличается от известных моделей карт окружения использованием 3-мерного пространства, учетом направлений обзора камер при составлении описаний ключевых точек траектории, что позволяет повысить точность локализации БЛА в трехмерном пространстве за счет учета углов между направлениями на ключевые объекты по нескольким направлениям обзора камер.

Предлагается общая модель формирования L -точечных низкоуровневой и высокоуровневой 3D карт окружения M_{3D} , основанная на выборе базового ракурса r_B с учетом количества ключевых объектов $N(l, d, r_B)$ по каждому направлению обзора камер d для каждой точки траектории l :

$$r_B = \arg \left(\max_r (N(l, d, r)) \right), \quad (5)$$

где r – ракурс, отличающийся от базового ракурса r_B .

Модель отличается от известных моделей формирования карт окружения выбором базового ракурса для фиксирования ключевых объектов, обеспечивающего максимальное количество ключевых объектов по всем направлениям обзора камер, что позволяет повысить точность локализации БЛА.

Модели детектирования, выделения признаков и идентификации объектов для построения трехмерных карт окружения

Классификация объектов. Предлагается следующая классификация объектов трехмерных карт окружения: низкоуровневые (НУО): точки; высокоуровневые (ВУО). ВУО делятся на: геометрические объекты (ГО – линии, углы, сегменты); рельефные объекты (РО – углубления, возвышения); семантические объекты (СО). СО делятся на: антропогенные (АО – здание, дорога, парковка и т.д.); природные (ПО – водоем, лесной массив, луг и т.д.); комбинированные (КО – пруд, парк, поле и т.д.). Предлагается следующая классификация параметров объектов трехмерных карт окружения: идентификационные [3] (собственные, окрестные, относительные); статистические (краткосрочные – повторяемость объекта для различных ракурсов в одном цикле картирования; долгосрочные – повторяемость объекта в различных циклах картирования); точностные (точность определения местоположения и идентификационных параметров объекта). Предлагается следующая классификация трехмерных карт окружения: низкоуровневые (краткосрочные – на основе НУО); высокоуровневые (краткосрочные – на основе ГО; долгосрочные – на основе СО).

Проблемы использования НУО при одновременной локализации и картографирования окружающего пространства связаны с их низкой устойчивостью к изменению условий формирования изображений и высокой вычислительной сложностью обработки. Увеличение размера дескриптора или (и) количества НУО позволяет повысить точность идентификации, но ведет к повышению вычислительной сложности. Использование ГО, обладающих более высокой устойчивостью к изменению условий формирования изображений, позволяет сократить количество реперов, участвующих в идентификации и снизить за счет этого вычислительную сложность идентификации. При этом возможно уменьшение размера идентификатора, что также ведет к снижению вычислительной сложности. На рис. 1 приведены усредненные по различным классам изображений характеристики устойчивости прямых линий и точек к изменению яркости и контраста, действию шума и проявлению смаза на изображении [3]. Как следует из рис. 1, прямые линии, выделяемые с помощью метода масочно-фазового поиска, основанного на библиотеке линейных бинарных масок и пространственно-ориентированном преобразовании Хафа [4], устойчивее на 10–25% по сравнению с точками, выделяемыми с помощью методов

SIFT [5] и SURF [6]. Устойчивость оценивалась по числу точек (в том числе образующих прямые линии), сохранивших свое местоположение после преобразования изображения.

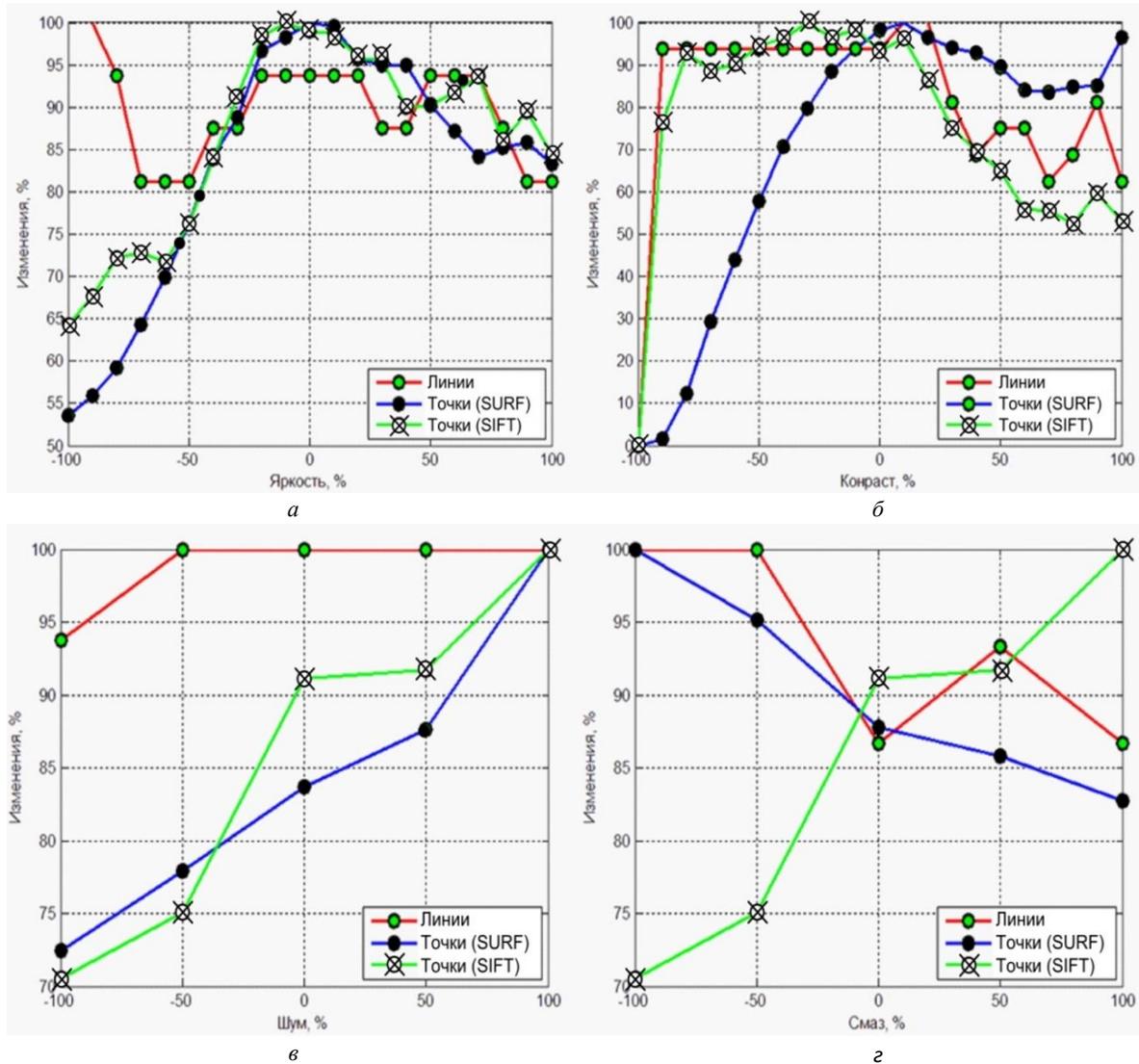


Рис. 1. Характеристики устойчивости реперных линий и точек к изменению условий формирования изображений: *а* – устойчивость к изменению яркости; *б* – устойчивость к изменению контраста; *в* – устойчивость к зашумлению; *г* – устойчивость к смазу

Для изображения 1000x2000 пикселей объем множества точек составляет около 5000, а объем множества прямых линий – около 100 [3]. Следует отметить, что если для надежной идентификации необходимо использовать практически все точки, то прямых линий достаточно нескольких пар. Объем множества сегментов для идентификации может быть еще меньше (в пределе для идентификации достаточно одного сегмента).

Несмотря на преимущества ГО перед НУО чувствительность их дескрипторов к изменению ракурса повышается с увеличением глубины сцены, фактически определяемой расстояниями от камеры до самого дальнего и самого ближнего ключевых объектов. Для устранения данного недостатка при формировании 3-мерных карт окружения (краткосрочных, долгосрочных, низкоуровневых, высокоуровневых) предлагается использовать семантические высокоуровневые объекты, выделяемые на изображениях с помощью семантической сегментации, основанной на алгоритмах машинного обучения, связывая их с низкоуровневыми и первичными высокоуровневыми геометрическими объектами, локализованными в тех же координатах, что и семантические объекты, используя данные о пространственной локализации низкоуровневых и первичных высокоуровневых геометрических объектов в качестве собственных идентификационных параметров и данные об

угловой ориентации и относительных расстояниях до смежных и соседних семантических объектов в качестве относительных идентификационных параметров.

Детекторы. Предлагается модель детектирования низкоуровневых геометрических объектов – ключевых точек (определения их координат $(x_{KP}(n), y_{KP}(n))$, где n – номер ключевой точки, $n = 0, \overline{N_{KP}-1}$; N_{KP} – количество ключевых точек), отличающаяся от известных моделей, использующих для поиска ключевых точек (координаты $x_{GP}(n_{GP}), y_{GP}(n_{GP})$, где n_{GP} – номер ключевой градиентной точки, $n_{GP} = 0, \overline{N_{GP}-1}$; N_{GP} – количество ключевых градиентных точек) пространственно-ориентированный градиент яркости, дополнительным учетом локальных экстремумов яркости (координаты $(x_{EP}(n_{EP}), y_{EP}(n_{EP}))$, где n_{EP} – номер ключевой экстремальной точки, $n_{EP} = 0, \overline{N_{EP}-1}$; N_{EP} – количество ключевых экстремальных точек):

$$\begin{aligned} & \left\{ (x_{KP}(n), y_{KP}(n)) \right\}_{(n=0, \overline{N_{KP}-1})} \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow \left\{ \left\{ (x_{GP}(n_{GP}), y_{GP}(n_{GP})) \right\}_{(n_{GP}=0, \overline{N_{GP}-1})}, \left\{ (x_{EP}(n_{EP}), y_{EP}(n_{EP})) \right\}_{(n_{EP}=0, \overline{N_{EP}-1})} \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $N_{KP} = N_{GP} + N_{EP}$.

Для естественных изображений характерно выполнение неравенства $N_{EP} \gg N_{GP}$. Это позволяет существенно повысить разрешение локальной 3D-карты, а также повысить точность вычисления коэффициентов матрицы гомографии.

По аналогии с ключевыми градиентными точками значение N_{EP} учитывает только устойчивые локальные экстремумы, значение яркости $I(x_{EP}, y_{EP})$ которых удовлетворяет условию локальной контрастности относительно порога T_C в окрестности $(x_{EP} \pm \Delta x, y_{EP} \pm \Delta y)$

$$\frac{I(x_{EP}, y_{EP})}{\sum_{x_S = -\Delta x}^{\Delta x} \sum_{y_S = -\Delta y}^{\Delta y} I(x_{EP} + x_S, y_{EP} + y_S)} \geq T_C. \quad (7)$$

Поскольку детектирование низкоуровневых объектов рассматривается для краткосрочной карты, движение БЛА на коротком временном интервале полагается прямолинейным и, следовательно, изменение масштаба и угловые перемещения несущественными. Это позволяет значительно снизить вычислительную сложность детектирования.

Для детектирования высокоуровневых геометрических объектов условие локальной контрастности является более сложным, поскольку учитывает множество точек этих объектов. Основное преимущество использования высокоуровневых геометрических объектов заключается в более устойчивом их детектировании в сравнении с низкоуровневыми в более широком диапазоне изменения ракурсов, освещенности, сезонности, погодных условий. В результате при меньшем количестве таких объектов достигается меньшая ошибка вычисления коэффициентов гомографии и более точное вычисление расстояний за счет большей стереобазы.

Предлагается модель детектирования семантических объектов (определения их координат $(x_{SO}(n), y_{SO}(n))$, где n – номер семантического объекта, $n = 0, \overline{N_{SO}-1}$; N_{SO} – количество семантических объектов), отличающаяся от известных моделей, использующих ключевые точки, имеющие пространственно-ориентированный градиент яркости, использованием семантической сегментации на основе машинного обучения (функция $f_{SS}(I)$) для локализации на изображениях и многоклассовой классификации антропогенных и природных объектов:

$$\left\{ (x_{SO}(n), y_{SO}(n), c_{SO}(n)) \right\}_{(n=0, \overline{N_{SO}-1})} = f_{SS}(I), \quad (8)$$

где $c_{SO}(n)$ – класс семантического объекта изображения I .

Дескрипторы. Предлагается модель $D_{SI} = \{R(n)/R_B\}_{(n=0, \overline{N_D-1})}$ дескриптора ключевых точек (преимущественно локальных экстремумов) на основе окрестных идентификационных параметров, в качестве которых выступают нормированные расстояния $R(n)/R_B$ до граничных точек соответствующих выпуклостей и вогнутостей локального пространственного распределения яркости, взятые через одинаковые угловые смещения S_A по N_D направлениям, $N_D = 360/S_A$.

Предлагается модель $D_{RI} = \left\{ \{A(n)\}_{(n=0, \overline{N_p-1})}, \{R(n)/\max(R(n))\}_{(n=0, \overline{N_p-1})} \right\}$ дескриптора ключевых точек (градиентных и экстремальных) на основе относительных идентификационных параметров, в качестве которых выступают нормированные расстояния $R(n)/\max(R(n))$ до N_p ближайших ключевых точек и угловые ориентации $A(n)$ на N_p ближайшие ключевые точки.

Поскольку формирование дескрипторов низкоуровневых объектов рассматривается для краткосрочной карты, движение БЛА на коротком временном интервале полагается прямолинейным и, следовательно, изменение масштаба и угловые перемещения несущественными. Это позволяет значительно снизить вычислительную сложность.

Для формирования дескрипторов высокоуровневых геометрических объектов могут использоваться те же модели.

Предлагается модель $D_{RI} = \left\{ \{A(n)\}_{(n=0, \overline{N_o-1})}, \{R(n)/\max(R(n))\}_{(n=0, \overline{N_o-1})} \right\}$ дескриптора высокоуровневых геометрических объектов (первичных, семантических) на основе относительных идентификационных параметров, в качестве которых выступают нормированные расстояния $R(n)/\max(R(n))$ до N_o ближайших высокоуровневых геометрических объектов и угловые ориентации $A(n)$ на N_o ближайшие высокоуровневые геометрические объекты.

В качестве собственных идентификационных параметров семантических объектов и однородных областей, после нормировки могут использоваться геометрические параметры скелетов, описывающих эти объекты.

Идентификация. Предлагается модель двухэтапной идентификации низкоуровневых геометрических объектов на двух изображениях, полученных с двух различных ракурсов r_1 и r_2 , основанная на градиентных и экстремальных ключевых точках, отличающаяся от известных моделей идентификации низкоуровневых геометрических объектов, использующих однотипные градиентные дескрипторы $D_{SI}(r_1)$ и $D_{SI}(r_2)$, учетом положения ключевых экстремальных точек относительно ключевых градиентных точек (относительные идентификационные параметры $\{D_{RI}(r_1, n_{EP})\}_{(n_{EP}=0, \overline{N_{EP}(r_1)-1})}$, $\{D_{RI}(r_2, n_{EP})\}_{(n_{EP}=0, \overline{N_{EP}(r_2)-1})}$), что позволяет повысить пространственное разрешение 3D карты окружения и точность вычисления коэффициентов матрицы гомографии при совмещении разноракурсных изображений. Модель описывается следующими выражениями

$$\begin{aligned} & \left\{ (x_{GP}(r_1, n), y_{GP}(r_1, n)), (x_{GP}(r_1, n), y_{GP}(r_1, n)) \right\}_{(n=0, \overline{N_{GP}-1})} = \\ \text{этап 1:} & \left(\left\{ (x_{GP}(r_1, n_{GP}), y_{GP}(r_1, n_{GP})), D_{SI}(r_1, n_{GP}) \right\}_{(n_{GP}=0, \overline{N_{GP}(r_1)-1})}, \right. \\ & \left. \left\{ (x_{GP}(r_2, n_{GP}), y_{GP}(r_2, n_{GP})), D_{SI}(r_2, n_{GP}) \right\}_{(n_{GP}=0, \overline{N_{GP}(r_2)-1})} \right), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \left\{ (x_{EP}(r_1, n), y_{EP}(r_1, n)), (x_{EP}(r_1, n), y_{EP}(r_1, n)) \right\}_{(n=0, \overline{N_{EP}-1})} = \\ \text{этап 2:} & \left(\left\{ (x_{EP}(r_1, n_{EP}), y_{EP}(r_1, n_{EP})), D_{RI}(r_1, n_{EP}) \right\}_{(n_{EP}=0, \overline{N_{EP}(r_1)-1})}, \right. \\ & \left. \left\{ (x_{EP}(r_2, n_{EP}), y_{EP}(r_2, n_{EP})), D_{RI}(r_2, n_{EP}) \right\}_{(n_{EP}=0, \overline{N_{EP}(r_2)-1})} \right), \end{aligned} \quad (10)$$

где $f_I(\)$ – функция идентификации.

Предлагается модель идентификации высокоуровневых геометрических объектов (первичных и семантических) на двух изображениях (формирования пар соответствующих координат объектов $\{(x_{\text{КО}}(r_1, n_{\text{КО}}), y_{\text{КО}}(r_1, n_{\text{КО}})), (x_{\text{КО}}(r_2, n_{\text{КО}}), y_{\text{КО}}(r_2, n_{\text{КО}}))\}_{(n_{\text{КО}}=0, \overline{N_{\text{КО}}-1})}$, где $N_{\text{КО}}$ – количество пар координат соответствующих объектов), полученных с двух различных ракурсов r_1 и r_2 , основанная на использовании разнотипных идентификационных параметров $\{D_{\text{OI}}, D_{\text{SI}}, D_{\text{RI}}\}$ и прогнозирования относительных идентификационных параметров D_{RI} , отличающаяся от известных моделей идентификации низкоуровневых геометрических объектов, основанных на окрестных идентификационных параметрах D_{SI} и полном переборе вариантов соответствий окрестных дескрипторов $\{D_{\text{RI}}(r_1, n_{\text{RI}})\}_{(n_{\text{RI}}=0, \overline{N_{\text{RI}}(r_1)-1})}$, $\{D_{\text{RI}}(r_2, n_{\text{RI}})\}_{(n_{\text{RI}}=0, \overline{N_{\text{RI}}(r_2)-1})}$, использованием для сопоставления одновременно собственных, окрестных и относительных идентификационных параметров $\{D_{\text{OI}}, D_{\text{SI}}, D_{\text{RI}}\}$ для повышения точности идентификации и прогнозирования локализации $D_{\text{RI}}(r, n_{\text{КО}})$ второго и следующих компонентов относительного дескриптора, а также $(x_{\text{КО}}(r_2, n_{\text{КО}}), y_{\text{КО}}(r_2, n_{\text{КО}}))$ второго и следующих высокоуровневых геометрических объектов $D_{\text{RI}}(r_1, n_{\text{RI}})$ ($n_{\text{КО}} \geq 1$) по первому компоненту относительного дескриптора D_{RI} и первому высокоуровневому геометрическому объекту ($n_{\text{КО}} = 0$) для повышения скорости идентификации:

$$\begin{aligned} & \{(x_{\text{КО}}(r_1, n_{\text{КО}}), y_{\text{КО}}(r_1, n_{\text{КО}})), (x_{\text{КО}}(r_2, n_{\text{КО}}), y_{\text{КО}}(r_2, n_{\text{КО}}))\}_{(n_{\text{КО}}=0, \overline{N_{\text{КО}}-1})} = \\ & = f_I \left(\begin{array}{c} \left\{ \left((x_{\text{КО}}(r_1, n_{\text{КО}}), y_{\text{КО}}(r_1, n_{\text{КО}})), \right. \right. \\ \left. \left. \left\{ D_{\text{OI}}(r_1, n_{\text{КО}}), D_{\text{SI}}(r_1, n_{\text{КО}}), D_{\text{RI}}(r_1, n_{\text{КО}}) \right\} \right\}_{(n_{\text{КО}}=0, \overline{N_{\text{КО}}(r_1)-1})} \right. \\ \left. \left. \left\{ \left((x_{\text{КО}}(r_2, n_{\text{КО}}), y_{\text{КО}}(r_2, n_{\text{КО}})), \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \left\{ D_{\text{OI}}(r_2, n_{\text{КО}}), D_{\text{SI}}(r_2, n_{\text{КО}}), D_{\text{RI}}(r_1, n_{\text{КО}}) \right\} \right\}_{(n_{\text{КО}}=0, \overline{N_{\text{КО}}(r_2)-1})} \right\} \right. \end{array} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Модели определения расстояний до объектов и их размеров

Для реализации SLAM в системе нескольких БЛА, области обзора камер которых могут перекрываться, предлагается модель итеративного определения расстояний d_{O} до объекта и его размера s_{O} по стереопаре $(I(r_1), I(r_2))$, сформированной с помощью двух камер, установленных на двух БЛА и имеющих существенное (более 50 %) перекрытие областей обзора (ракурсы (r_1, r_2)), отличающаяся от известных моделей определения расстояний до объектов по стереопаре с фиксированной стереобазой d_{S} , использованием стереопары с переменной стереобазой $d_{\text{S}}(I(r_3))$, итеративно подбираемой с учетом расстояния до объекта и ошибки определения стереобазы $e_{\text{B}}(d_{\text{S}}(I(r_3)))$ по изображению БЛА известного размера на калибровочном изображении $I(r_3)$ за счет согласования положения второго БЛА, что позволяет уменьшить ошибки определения расстояния до объекта $e_{\text{d}}(d_{\text{O}})$ и его размера $e_{\text{S}}(d_{\text{O}})$:

$$\begin{cases} (d_o, s_o) = f(f_s(I(r_1), I(r_2)), d_s(I(r_3))), \\ \min(e_d(d_o)), \\ d_s(I(r_3)) = \arg(\min(e_b(d_s(I(r_3))))), \end{cases} \quad (12)$$

где $f_s(I(r_1), I(r_2))$ – функция вычисления смещения объекта на изображении $I(r_2)$, получаемого от второго БЛА, относительно изображения $I(r_1)$.

Заключение

Разработаны общие модели одновременной локализации и построения карты, позволяющие повысить точность определения координат одного или нескольких БЛА вертолетного типа, оснащенных многокамерными видеосистемами, и объектов трехмерных карт окружения при отсутствии сигналов навигационной системы и управления.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ) и Национального фонда естественных наук Китая (НФЕНК) в рамках проекта T25КИ-054 «Технология многокамерной локализации и построения карты открытого пространства».

MODELS OF SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAP CONSTRUCTION OF OPEN SPACE OF UAVS USING A MULTI-CAMERA VIDEO SYSTEM

S.I. SIROTKA, J. MA, M.I. ZORKO, S.V. LITVINOV, V.YU. TSVIATKOU

Abstract. The problem of simultaneous localization and mapping (SLAM) of an unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with a multi-camera video system or a network of UAVs equipped with single-camera or multi-camera video systems is considered. General models for the formation of three-dimensional maps of the surrounding space, detection, feature extraction and identification of objects, determination of distances to objects and their sizes are proposed. The advantage of using high-level geometric and semantic objects compared to low-level objects (points) for localization and mapping is shown.

Keywords: helicopter-type UAV, simultaneous localization and environment mapping, SLAM, multi-camera video system.

Список литературы

1. Thrun S., Burgard W., Fox D. Probabilistic robotics. MIT Press, 2005.
2. <https://uvr.aero/ru/what-we-do-ru/>.
3. Конопелько В.К., Цветков В.Ю. Формирование и обработка образов в помехоустойчивом кодировании и передаче изображений. Минск: Бестпринт, 2015.
4. Журавлёв А.А., Цветков В.Ю. // Информатика. 2014, С. 85–96.
5. Lowe D. // IJCV. 2004. Vol. 60. P. 91–110.
6. Bay H., Tuytelaars T., Gool L.V. // Proc. of the 9th European Conference on Computer Vision (ECCV'06), ser. Lecture Notes in Computer Science. 2006. 3951. P. 404–410.

УДК 621.311.25-027.45

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ КОНТРОЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ГОСАТОМНАДЗОРА

С.М. САЦУК, С.В. ДРОБОТ, В.Н. РУСАКОВИЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 04 апреля 2025

Аннотация. В статье представлены результаты разработки программного средства, предназначенного для поддержки принятия решений при организации контрольных (надзорных) мероприятий по обеспечению ядерной и радиационной безопасности при эксплуатации Белорусской АЭС. Представлено краткое описание составных частей программного средства, а также основных решаемых задач.

Ключевые слова: атомная электростанция, показатели безопасной эксплуатации, обеспечение ядерной и радиационной безопасности.

Введение

Атомные электростанции (АЭС) являются источниками потенциальной опасности или источниками риска радиационного воздействия на персонал, население и окружающую среду. Степень риска радиационного воздействия напрямую зависит от уровня обеспечения ядерной и радиационной безопасности АЭС. Безопасность АЭС является одним из основных свойств, определяющих возможность использования АЭС в качестве источников тепловой и электрической энергии [1].

Согласно Закону Республики Беларусь от 10.10.2022 № 208-З «О регулировании безопасности при использовании атомной энергии» [2] республиканские органы государственного управления при государственном регулировании деятельности по обеспечению безопасности при использовании атомной энергии осуществляют государственный надзор в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности.

Достижение заданного уровня безопасности Белорусской АЭС и других объектов использования атомной энергии контролируется посредством осуществления государственного надзора в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности, который в соответствии с Указом Президента Республики Беларусь от 14 ноября 2022 г. № 405 «О Министерстве по чрезвычайным ситуациям» возложен на Департамент по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (Госатомнадзор).

В настоящее время решающим элементом обеспечения качественной организации и осуществления контроля (надзора) за ядерной и радиационной безопасностью в рамках интегрированной системы управления Госатомнадзора [3] является один из ее основных процессов – «Надзор за обеспечением ядерной и радиационной безопасности в области использования атомной энергии». Этот процесс формализует процедуры взаимодействия между подразделениями Госатомнадзора, вовлеченными в надзорную деятельность, и в конечном итоге позволяет повысить оперативность принятия решений в рамках отработанных механизмов. При этом, процесс оценки безопасности – это непрерывный, повторяющийся и длительный процесс, связанный с накоплением большого объема информации по опыту эксплуатации АЭС, ее анализом и выработкой мер, направленных на обеспечение безопасности.

В связи с этим актуальной является задача разработки программного средства, предназначенного для сбора, накопления, хранения и анализа информации, а также поддержки принятия решений, при реализации основного процесса Госатомнадзора.

Разработка программного средства

Создание программного средства включало два взаимосвязанных этапа, во-первых, разработку информационного справочника (ИС) показателей безопасной эксплуатации Белорусской АЭС и во-вторых, разработку многофункциональной среды (МФС) для управления этим справочником.

В процессе выполнения работ по созданию ИС был проведен анализ функциональных требований к справочнику, подготовленных Госатомнадзором, а также ряда нормативных правовых актов Республики Беларусь [2, 4], регулирующих обеспечение ядерной и радиационной безопасности, и документов МАГАТЭ [5–6].

К основным общим задачам, решаемым ИС, относятся:

- накопление, учет и хранение данных о показателях безопасной эксплуатации энергоблоков № 1 и № 2 Белорусской АЭС;
- накопление, учет и хранение результатов расчета и анализа данных показателей безопасной эксплуатации;
- накопление, учет и хранение результатов анализа причин, вызывающих изменения показателей безопасной эксплуатации энергоблоков;
- разграничение уровней доступа пользователей к информационным ресурсам справочника;
- создание условий накопления, хранения и применения информации, данных и знаний на уровне, обеспечивающем безопасное, устойчивое и эффективное развитие атомной отрасли Республики Беларусь.

ИС представляет собой реляционную базу данных, которая структурно включает три раздела, предназначенных для хранения и обработки взаимосвязанной в пределах разделов информации, содержащей показатели безопасной эксплуатации Белорусской АЭС и их значения. Четвертый раздел информационного справочника представляет собой файловый архив используемых в процессе организации надзора документов.

ИС создан с использованием СУБД MySQL со свободной лицензией и ориентирован на работу с числовыми значениями показателей безопасной эксплуатации энергоблоков Белорусской АЭС и другими данными, а также документами, отчетами, регламентами и различной технической документацией.

Разработанная с учетом требований Госатомнадзора МФС позволяет решать следующие общие задачи:

- предоставление удобного графического интерфейса для пользователей;
- ввод и представление данных о пользователях;
- обеспечение многопользовательской работы над данными;
- обеспечение определения авторства всех операций;
- разграничение уровней доступа пользователей к ресурсам ИС;
- ввод данных как списками с использованием специальных форм, так и путем заполнения соответствующих полей графического интерфейса;
- обеспечение быстрого доступа к ресурсам ИС;
- быстрый поиск и сортировку данных по различным критериям;
- формирование отчетов;
- ввод и хранение в организованном файловом хранилище различных типов документов и их атрибутов, предназначенных для их однозначной идентификации;
- отображение отчетов и передача выбранной информации в офисные приложения для просмотра, хранения или печати.

МФС представляет собой web-приложение, состоящее из серверной и клиентской части, реализованное на скриптовом языке программирования JavaScript с использованием программной платформы Node.js для создания серверной части приложения.

Приложение представляет собой совокупность подсистем, выполняющих отдельные задачи управления. Основная часть МФС (подсистема управления программными сущностями) построена в виде пяти компонентов: энергоблок 1, энергоблок 2, анализ, документы, конструктор пользовательских отчетов. Особое внимание уделено подсистеме авторизации, обеспечивающей защиту информации.

В МФС реализован ряд алгоритмов для анализа, визуализации данных и поддержки принятия решений при организации надзорной деятельности на этапе эксплуатации Белорусской АЭС. Разработаны алгоритмы выявления систем (элементов) энергоблоков АЭС, требующих особого внимания для обеспечения безопасной эксплуатации АЭС, а также прогнозирования изменения значений показателей безопасной эксплуатации энергоблоков Белорусской АЭС во времени и по заданному значению.

Заключение

Созданное программное средство в настоящее время находится на этапе внедрения в контрольную (надзорную) деятельность Госатомнадзора, что позволит повысить ее эффективность путем использования предложенных алгоритмов при планировании и осуществлении надзора на этапе эксплуатации Белорусской АЭС. Оно может также выступать прототипом для разработки новых программных продуктов для дальнейшего развития цифровых технологий в сфере государственного регулирования деятельности в области использования атомной энергии.

SOFTWARE FOR PROCESSING OF INFORMATION IN ORGANIZING OF CONTROL ACTIVITIES OF GOSATOMNADZOR

S.M. SATSUK, S.V. DROBAT, U.M. RUSAKOVICH

Abstract. The article presents the results of the development of a software tool designed to support decision-making in organizing of control (supervisory) activities to provide nuclear and radiation safety during the operation of the Belarusian NPP. A brief description of the components of the software tool, as well as the main tasks it solves are presented.

Keywords: nuclear power plant, indicators of safe operation, providing of nuclear and radiation safety.

Список литературы

1. Зацепин, Е.Н., Дробот С.В. // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэнічных навук. 2015. № 1. С. 118–122.
2. Закон Республики Беларусь № 208-3 от 10.10.2022 «О регулировании безопасности при использовании атомной энергии». [Электронный ресурс]. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H12200208>.
3. О выполнении Конвенции о ядерной безопасности. Национальный доклад Республики Беларусь 2022. Минск, Госатомнадзор, 2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/ce3/cns-belarus-national-report-2022-ru.pdf>.
4. НП ЯРБ «Общие положения обеспечения безопасности атомных электростанций», утвержденные постановлением МЧС Республики Беларусь от 13.04.2020 № 15. [Электронный ресурс]. URL: https://pravo.by/upload/docs/op/W22035399p_1590526800.pdf.
5. Государственная, правовая и регулирующая основа обеспечения безопасности. Нормы безопасности МАГАТЭ. Общие требования безопасности. № GSR Part 1 (Rev. 1) МАГАТЭ. Вена, 2016. [Электронный ресурс]. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1713_R_web.pdf.
6. Оценка безопасности установок и деятельности. Нормы безопасности МАГАТЭ. Общие требования безопасности. № GSR Part 4 (Rev. 1) МАГАТЭ. Вена, 2016. [Электронный ресурс]. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1714_R_web.pdf.

МУЛЬТИМОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ

В.В. КРАСНОПРОШИН, А.А. СТАРОВОЙТОВ

Белорусский государственный университет, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 05 апреля 2025

Аннотация. В работе изложены принципы построения и реализации проактивной мультимодельной системы управления критичных ИТ-сервисов в условиях неопределенности профиля внешней нагрузки и ограничений по ресурсам.

Ключевые слова: принятие решений, информационная система, проактивное управление, неопределенность внешней нагрузки, нейронные сети, мультимодельная система.

Введение

Поддержка критичных ИТ-сервисов и систем (банковских, телекоммуникационных, промышленных и др.) в рабочем состоянии (с гарантированным объемом вычислительных ресурсов) является актуальной проблемой современного цифрового общества.

Неопределенность внешней нагрузки, отказы вычислительного оборудования приводят к сбоям в работе и деградации производительности критичных ИТ-систем в целом. В результате теряется оперативность обработки информации и проведения банковских и других операций, что в свою очередь может иметь серьезные последствия (финансовые потери, крупные аварии и т.п.).

С наступлением эры облачных вычислений появилась возможность автоматически адаптировать объем вычислительных ресурсов критичных ИТ-систем под текущую нагрузку. Появились автономные решения, способные оперативно управлять масштабированием критических ИТ-сервисов без участия человека.

Автоматизация позволяет системам в реальном времени реагировать на изменение нагрузки, обеспечивая стабильное качество работы в соответствии с требуемым уровнем обслуживания. Автоматическое масштабирование напрямую влияет на бизнес-ценность ИТ-сервисов, поскольку определяет, как эксплуатационные расходы, так и качество обслуживания клиентов. Таким образом, развитие автоматизированных методов управления ресурсами является важным направлением для обеспечения надежности и экономической эффективности критически важных систем.

В общем случае масштабирование является задачей автоматизированного управления вычислительными ресурсами при изменяющейся, высокодинамичной, сложной нагрузке. Идеальный механизм автоматического масштабирования способен минимизировать как затраты, так и нарушения качества предоставления сервиса.

Несмотря на активные исследования в этой области, существует достаточно сильное отличие между методами масштабирования, предлагаемыми в научных статьях и используемыми в крупных промышленных инсталляциях [1].

Промышленные решения по автоматическому масштабированию Microsoft Azure [2], Amazon Web Services [3], Google Cloud Engine [4], Kubernetes Horizontal Pod Autoscaler (HPA) [5] и др. построены на относительно простых подходах (с возможностью заранее определять пороговые значения), предполагающих линейную зависимость между ресурсами и целевыми метриками.

Исследовательские решения [6] менее адаптированы к промышленному использованию, часто являются более сложными. Они, как правило, имеют большое число параметров настройки

и специфичные особенности, связанные с функционированием конкретного типа ИТ-системы (альтернативный набор метрик, заранее заданные пороги для метрик, специфичные профили нагрузки, характерные для данных систем и др.).

В работе предлагается вариант развития метода динамической локальной аппроксимации [7], основанного на мульти모델ном подходе (DLANNLIB).

Мульти모델ный метод прогнозирования

С оперативным принятием корректных решений, связаны следующие ключевые аспекты:

1. Адекватность прогноза основных параметров системы.
2. Скорость подготовки прогноза.
3. Заблаговременность прогноза.

Используемые в настоящее время подходы (позволяющие делать предсказания по большим выборкам исторических данных) могут в процессе работы терять качество прогнозирования. На начальном этапе работы они требуют подготовки обучающей выборки данных за большой период наблюдений. Используются достаточно сложные модели нейросетей (например, слой LSTM с памятью и др.), которые на данном наборе данных требуют длительного времени обучения и высокопроизводительных ресурсов.

В результате исследований стало понятно, что модель, заранее обученная на большой выборке, может иметь недостаточную обобщающую способность, и не сможет в ряде случаев давать адекватный прогноз для нового характера нагрузки. Кроме того, все критичные системы имеют совершенно разные профили нагрузки и поэтому модель, обученная на данных одной системы, может не подойти для другой. Пример исторических данных (средняя утилизация CPU по вычислительным модулям за 4 ч. работы системы) представлен на рис. 1.

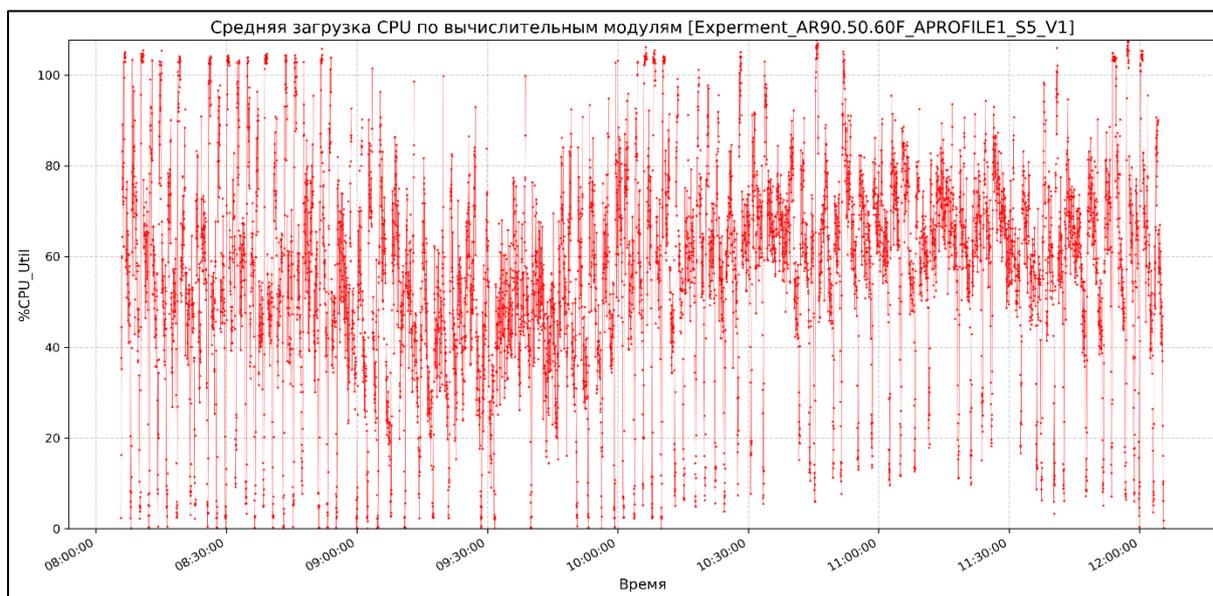


Рис. 1. Пример исторических данных работы системы (средняя утилизация CPU по вычислительным модулям за 4 ч.)

В итоге появилась идея о том, что не так важно, что происходило с системой в течение длительного промежутка времени. Важно уметь делать адекватные прогнозы по небольшому количеству данных, накапливаемых в реальном времени. Обучение модели на этих данных и последующие предсказания должны выполняться достаточно быстро, параллельно с накоплением новых данных.

Фактически идея сводится к тому, что в процессе работы системы профиль нагрузки может быть разделен на небольшие области. И для каждой области за время ее существования может быть построена модель, описывающая ее поведение и позволяющая сделать набор прогнозов, по результатам которых система перейдет в новую область. Таким образом, будет накапливаться набор моделей, которые будут иметь лучшую точность в области своей компетенции. По

сравнению с глобальной моделью, которая обучалась на данных, подготовленных за более длительный период времени. Иллюстрация идеи представлена на рис. 2.

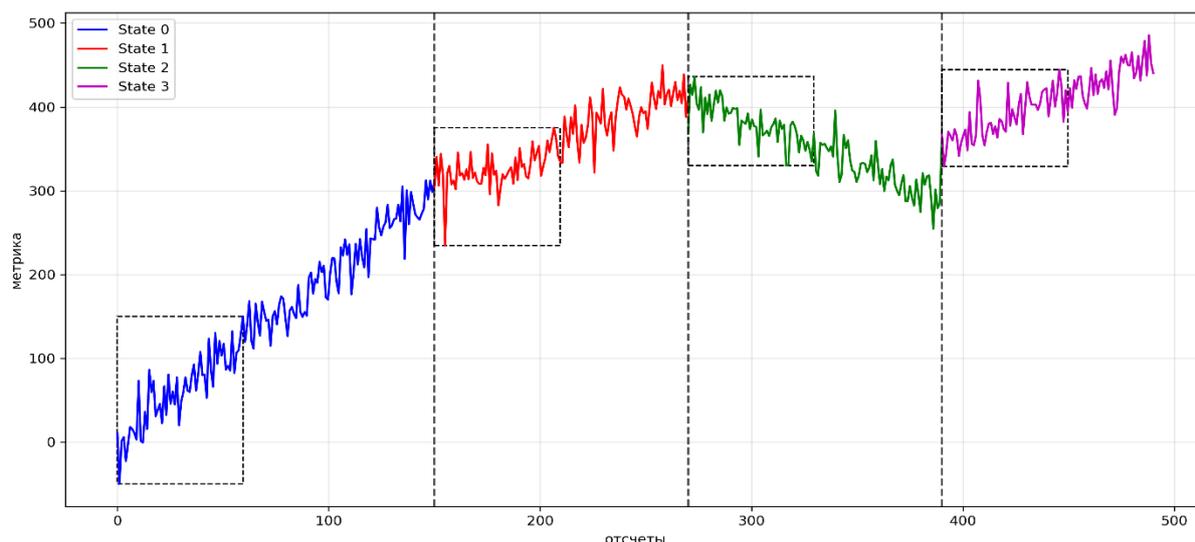


Рис. 2. Разделение профиля нагрузки на состояния и выбор данных внутри состояния для подготовки локальной модели

В рассматриваемом случае состояние критичной системы связано с объемом вычислительных ресурсов, который требуется для нормального функционирования системы для конкретной нагрузки. Состояние определяется количеством используемых вычислительных модулей. Данные для построения модели берутся из локальной временной области, соответствующей конкретному состоянию системы. В качестве метрики используется среднее значение %CPU по набору вычислительных модулей.

Локальная временная область требует отдельного рассмотрения. Время жизни конкретного состояния зависит от характера нагрузки. Переход в другое состояние определяется уровнем измеряемой метрики (уровнем перехода). Задаются максимальный уровень средней утилизации %CPU по вычислительным модулям, при котором система автоматически переходит в новое состояние с большим количеством ресурсов, и минимальный уровень, при котором система переходит в состояние с меньшим количеством ресурсов.

Локальные временные области для различных состояний могут иметь различное количество отсчетов. В это количество должны входить отсчеты, необходимые для обучения модели. На самообучение также требуется определенное время.

Построение прогноза в локальной временной области приводит к следующей задаче:

Пусть задана критическая система, которая может находиться в конечном множестве состояний $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, которые определяются воздействием на систему и уровнями переходов. В каждом состоянии S_i система генерирует дискретный сигнал в виде временного ряда $X_i^{S_i}$ (или набора рядов). Необходимо по части этого сигнала $\tilde{X}_i^{S_i}$ построить предиктор в виде нейронной сети, который прогнозирует переход системы в новое состояние S_{i+1} .

Для решения данной задачи был разработан метод динамической локальной аппроксимации нейросетевыми моделями (Dynamic Local Approximation by Neural Network models – DLANN).

Суть метода заключается в следующем: в процессе работы системы для каждого ее состояния строится простая нейросетевая модель (с одним скрытым и одним выходным слоем), которая учится на части данных локальной временной области. Предполагается, что модель, обученная на части данных, будет адекватно делать прогнозы для всей локальной области (идея восходит к принципу Парето). В процессе обучения для каждой модели сохраняется критерий качества обучения – ошибка на валидации. После обучения, на основе новых поступающих данных, формируются прогнозы среднего значения %CPU по набору вычислительных модулей

с заданной заблаговременностью. Эти прогнозы сравниваются с уровнями переходов, и при их достижении вырабатывается управляющее решение. Далее процесс повторяется.

Для упрощения параметры, которые определяют размер временной области для обучения и заблаговременность, определяются заранее и могут быть связаны со спецификой конкретной системы. Возможен автоматический подбор параметров в зависимости от характеристик сигнала. Используются нейросети с одинаковой архитектурой. Возможен вариант с автоматическим подбором архитектуры (например, изменение количества нейронов в скрытом слое или добавление скрытых слоев нейронов), в зависимости от сложности сигнала, которую можно оценивать какой-либо метрикой или их комбинацией (дисперсией, энтропией, различными размерностями и т.д.).

Допустимы ситуации, когда из-за резкой смены характера нагрузки, невозможно собрать достаточное количество данных для обучения модели и подготовить предсказания для принятия управляющего решения. В этом случае управляющее решение вырабатывается на основе текущего среднего значения %CPU по вычислительным модулям, которое сравнивается с уровнями переходов (реактивный тип).

В результате объединения работы двух предикторов получаем комбинированную систему управления, в которой реализуется комбинация реактивности и проактивности.

На основе метода DLANN был разработан мультимодельный метод, использующий библиотеку моделей (Dynamic Local Approximation by Neural Network models with Library – DLANNLIB). Метод позволяет выполнять адаптацию к новым паттернам нагрузки, связанной с неопределенностью, за счет аппроксимации данных, получаемых в режиме реального времени с помощью моделей нейронных сетей. Эти модели вместе с метаданными (метрики по качеству обучения, характеристики данных) запоминаются в процессе работы в библиотеке моделей и в дальнейшем используются для прогнозирования при переходе системы в новые состояния.

В описанном выше процессе происходит создание различных нейросетевых моделей, связанных с определенным состоянием, которое определяется количеством вычислительных модулей. В каждой модели происходит запоминание характеристик конкретного состояния системы.

Набор моделей сохраняется и накапливается в виде библиотеки. Для состояния может быть несколько моделей. Для каждой модели сохраняется метрика по качеству обучения (ошибка на валидации) и оценка сложности сигнала. Библиотеку моделей можно использовать для прогнозов до обучения новой модели в различных вариантах (указаны не все):

А. Использование модели для предыдущего состояния. Самый простой способ выбора модели. Не требуется рассчитывать никакие метрики текущего сигнала. Если для предыдущего состояния модель не была построена, то предиктор по моделям из библиотеки не используется.

Б. Выбор лучшей модели для состояния по ошибке валидации. При переходе системы в одно из известных состояний происходит выбор модели из библиотеки, для которой ошибка на валидации имеет наименьшее значение.

В. Создание ансамбля из набора моделей, которые соответствуют одному состоянию. В этом случае создается ансамбль (композиция без обучения) из прогнозов, существующих N моделей для одного состояния, с весами, связанными с ошибками валидации

$$\hat{y}_{predict} = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \hat{y}_{model_i}, \quad \varepsilon_i = \frac{E_i^{-1}}{\sum_{i=1}^N E_i^{-1}}. \quad (1)$$

Г. Создание ансамбля из набора моделей, которые соответствуют разным состояниям. В этом случае создается ансамбль (композиция без обучения) существующих моделей для разных состояний, с весами, связанными со сложностью сигнала.

Все эти варианты можно использовать во время обучения новой модели, в виде дополнительного предиктора, когда модель для текущего сигнала еще не готова. На рис. 3 схематически показаны области данных, которые необходимы для выполнения прогнозов с помощью библиотеки моделей и для создания новой модели для состояния.

Использование библиотеки моделей повышает оперативность прогнозирования, т.к. позволяет получить управляющее решение до готовности модели, которая обучится на данных

для конкретного состояния. Это шаг по оперативности в сторону реактивного типа, но с возможностью использования знаний, которые были накоплены системой в течение предыдущих состояний.

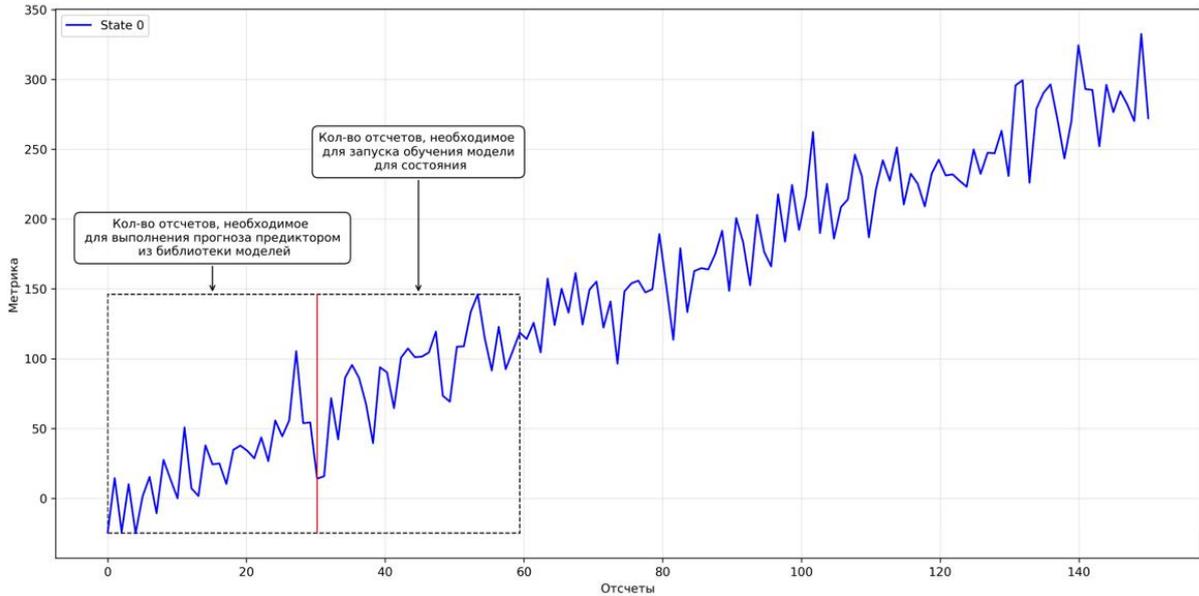


Рис. 3. Разделение профиля нагрузки на состояния и выбор данных внутри состояния для подготовки локальной модели

Создание предиктора из набора моделей можно рассматривать как самостоятельную задачу. Как было показано выше, таких вариантов может быть достаточно много. В том числе можно использовать отдельную нейросеть, которая будет производить классификацию паттернов и выбирать подходящие модели для создания предиктора. Со временем библиотека моделей увеличивается, можно предусмотреть механизм забывания, оставляя лучшие модели.

Оценка качества управления

Для оценки качества управления рассмотрим задачу, где целевая функция отражает компромисс между оптимизацией затрат на вычислительные ресурсы и выполнением требований к уровню обслуживания SLO. Переменные задачи: $\Omega(t)$ – динамически изменяющаяся внешняя нагрузка на систему с неопределенностью, $R_k(t)$ – количество вычислительных ресурсов, выделенных системе на k -том шаге (ресурсы системы меняются дискретно, считаем, что k -му шагу изменения соответствует состояние S_k), $Cost(R_k(t))$ – стоимость использования ресурсов на k -том шаге, $SLO_k(t)$ – метрика уровня обслуживания на k -том шаге, $Violation(SLO_k(t))$ – штраф за нарушение уровня обслуживания SLO. $Cost(R_k(t))$ и $Violation(SLO_k(t))$ нормированы в интервале $[0,1]$ суммарно по всем состояниям S_k . Целевая функция, которую нужно минимизировать

$$\underset{A}{\operatorname{argmin}} \left(\lambda \sum_{k=1}^N Cost(R_k[A(\Omega(t))]) + (1-\lambda) \sum_{k=1}^N Violation(SLO_k[A(\Omega(t))]) \right), \quad (2)$$

при ограничении на скорость изменения ресурсов $|R_k - R_{k-1}| \leq \gamma$, где γ – максимальное допустимое изменение ресурсов.

В итоге задача свелась к минимизации целевой функции, которая достигается выбором оптимального алгоритма A , работа которого порождает N состояний системы, при внешней нагрузке $\Omega(t)$ с неопределенностью. Точное решение данной задачи мы построить не можем,

поэтому предлагается строить эвристический алгоритм, оценивающий целевую функцию. Из множества алгоритмов выбираем тот, который доставляет минимум целевой функции.

Нагрузочная система позволяет получить усредненную статистику по времени отклика на один запрос в интервале усреднения 5 с. Введем бинарный индикатор штрафа для системы в случае превышения среднего времени отклика за 5 с в следующем виде

$$B_i = \begin{cases} 1 & \text{if } R_i^5 > R_{\max} \\ 0 & \text{if } R_i^5 \leq R_{\max} \end{cases}, \quad (3)$$

где R_i^5 – среднее время отклика за 5 с, R_{\max} – заданное максимальное время отклика.

Пусть $N_{\Delta t_j}^5$ – общее число 5 с интервалов за время жизни Δt_j состояния S_j , тогда суммарное число штрафов за Δt_j , суммарное число штрафов по состояниям и нормированный штраф

$$V^{norm} = \frac{V}{N_{\max}}, \quad V = \sum_{j=1}^N V_{\Delta t_j}, \quad V_{\Delta t_j} = \sum_{j=1}^{N_{\Delta t_j}^5} B_j, \quad (4)$$

где N_{\max} – общее число 5 с интервалов во всех состояниях S_j : $N_{\max} = \sum_{j=1}^N N_{\Delta t_j}^5$.

Оценим стоимость ресурсов состояния S_j за время жизни Δt_j как $C_j \Delta t_j$, где C_j – число вычислительных модулей состояния S_j . Суммарная стоимость ресурсов и нормированная по всем состояниям

$$C = \sum_{j=1}^N C_j \Delta t_j, \quad C^{norm} = \frac{C}{C_{\max} \Delta t}, \quad (5)$$

где C_{\max} – максимальное число вычислительных модулей и Δt – суммарное время жизни всех состояний S_j : $\Delta t = \sum_{j=1}^N \Delta t_j$. В итоге, с учетом (2) – (5), получаем следующую целевую функцию для оценки качества управления

$$F = \lambda \left[\frac{\sum_{j=1}^N C_j \Delta t_j}{C_{\max} \sum_{j=1}^N \Delta t_j} \right] + (1 - \lambda) \left[\frac{\sum_{j=1}^N \sum_{j=1}^{N_{\Delta t_j}^5} B_j}{\sum_{j=1}^N N_{\Delta t_j}^5} \right]. \quad (6)$$

Среднее время отклика мало информативно, используем 95 процентиль времени отклика.

Модельная система

Модельная система представляет собой набор вычислительных модулей, на которых функционируют инстансы прикладного программного обеспечения, между которыми осуществляется балансировка внешних запросов. Система поддерживает механизм масштабирования. Для генерации запросов используется нагрузочная система, позволяющая задавать нагрузку и получать статистику по обработанным запросам.

Кратко опишем основные блоки системы. В качестве вычислительных модулей используется Docker Compose [8]. Для балансировщика нагрузки по контейнерам с инстансами прикладного web сервиса используется HAProxy [9]. Web приложение реализовано на популярном фреймворке echo.labstack [10], на языке Go [11]. Инстансы сервиса реализуют функционал в виде REST API. Для генерации нагрузки используется Locust [12], написанный на Python [13]. На рис. 4 представлена схема системы.

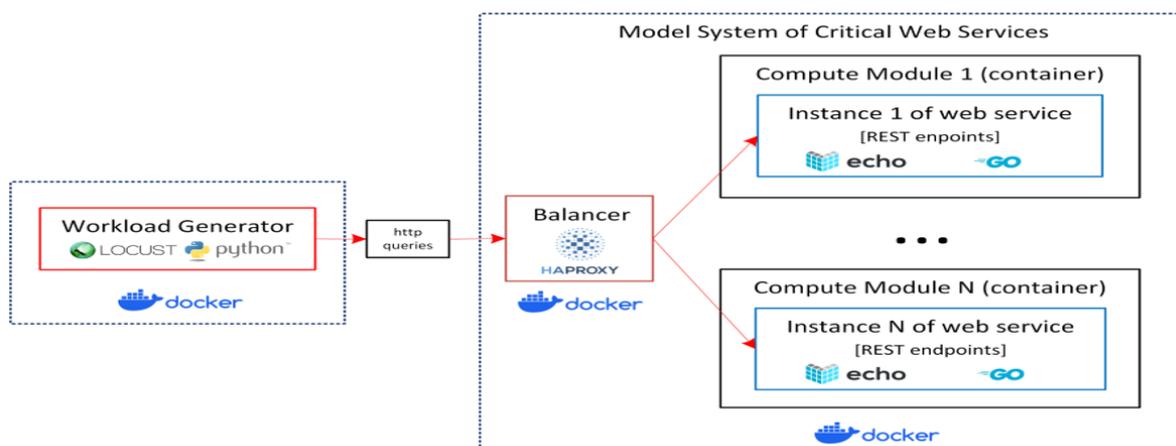


Рис. 4. Схема модельной системы

Профили нагрузки

Для каждого профиля создается свой тестовый класс на Python, который реализует механизм поэтапного управления нагрузкой. Для генерации синтетических профилей в Locust написан скрипт на Python, который на вход получает описание этапов в виде списка словарей, в котором определяются длительности этапов, целевые функции, ширина дисперсии, функция для изменения дисперсии и др. Для генерации профилей на основе реальных данных реализован скрипт на Python, который позволяет формировать структуру этапов для запуска нагрузки в Locust. На рис. 5 и 6 представлены профили пользовательской нагрузки "треугольник" и "треугольник с шумом" и графики целевой метрики для состояния S_0 .

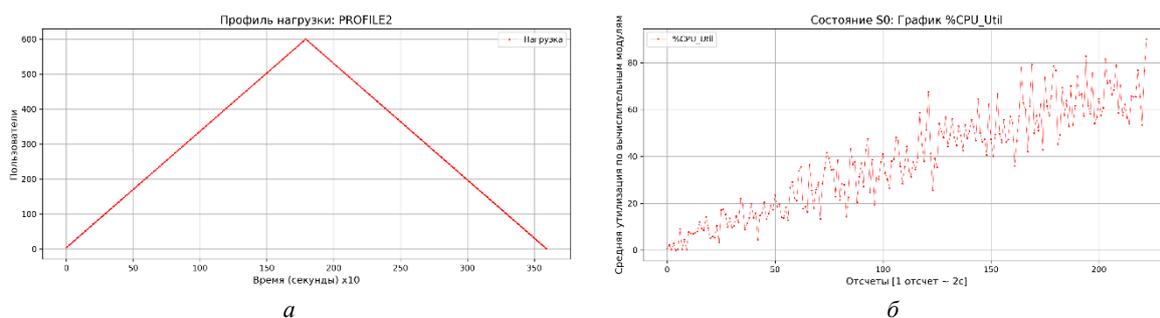


Рис. 5. Профиль нагрузки "треугольник": *a* – изменение числа пользователей в течении 1 ч; *б* – график %CPU_Util для состояния S_0 длительностью ~ 7 мин

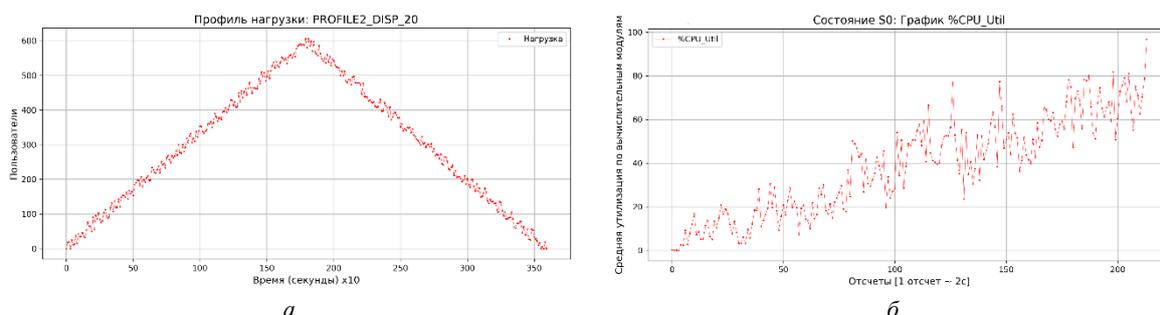


Рис. 6. Профиль нагрузки "треугольник с шумом": *a* – изменение числа пользователей в течении 1 ч; *б* – график %CPU_Util для состояния S_0 длительностью ~ 7 мин

Профиль нагрузки на рис. 7, основанный на реальных данных [14], описывает число пользовательских запросов в единицу времени (RPS – Requests per Second) к различным ручкам web сервиса Космического центра НАСА им. Кеннеди во Флориде (NASA Kennedy Space Center)

за 24 часа 6 июля 1995 г. Данные представлены в общий доступ в репозитории Internet Traffic Archive на сайте Национальной лаборатории им. Лоуренса в Беркли (Lawrence Berkeley National Laboratory) [15].

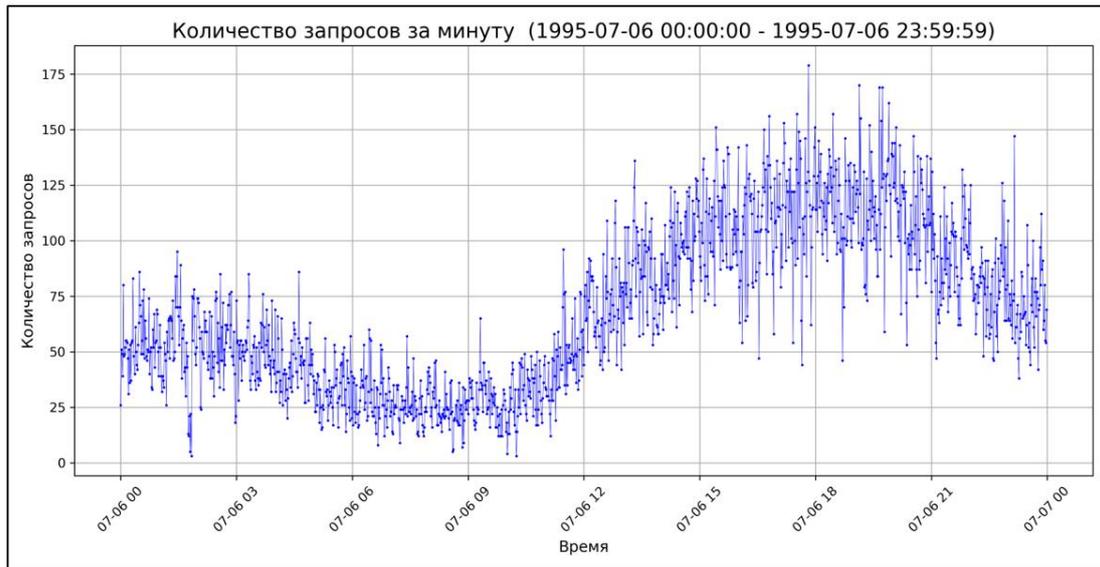


Рис. 7. Запросы пользователей к web-серверу
Космического центра Кеннеди НАСА во Флориде 6 июля 1995 г.

Исходный профиль был сжат с 24 часов до 4 часов, отмасштабирован до 600 пользователей, преобразован в нагрузочный профиль для Locust. На рис. 8 представлен получившийся профиль пользовательской нагрузки "НАСА_06.07.1995_4Н" и график целевой метрики для состояния S_{13} .

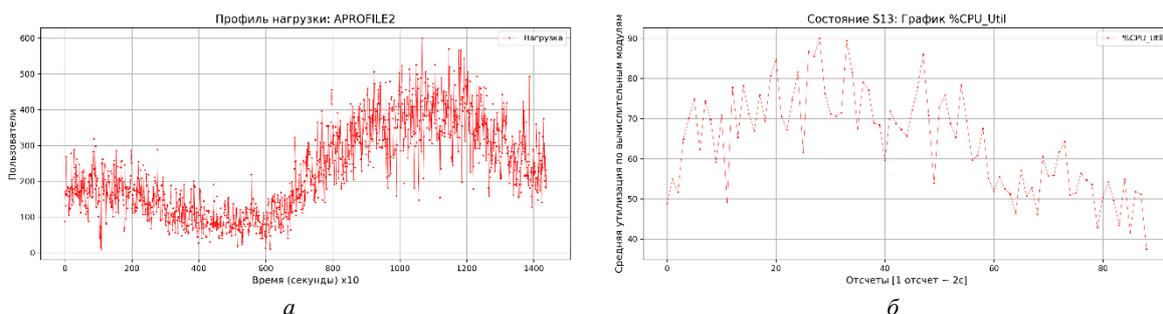


Рис. 8. Профиль нагрузки "НАСА_06.07.1995_4Н": *а* – изменение числа пользователей в течении 1 ч;
б – график %CPU_Util для состояния S_{13} длительностью ~ 3 мин

Комбинированная система управления

Для управления ресурсами модельной системы был разработан агент, который в реальном времени получает данные утилизации вычислительных модулей и принимает решение о масштабировании управляемой системы. Агент использует комбинацию реактивного и проактивного управления. При этом для каждого состояния управляемой системы автоматически формируется выборка данных, на которой обучается нейросетевая модель. Данная модель сохраняется в библиотеку моделей, выполняются предсказания параметров утилизации ресурсов разными предикторами (на основе обученной модели и библиотеки моделей).

Агент сравнивает текущие данные средней нагрузки по вычислительным модулям и результаты прогноза для конкретного состояния системы и принимает решение об изменении состояния. Архитектурно система содержит 6 основных модулей, которые представлены на рис. 9.

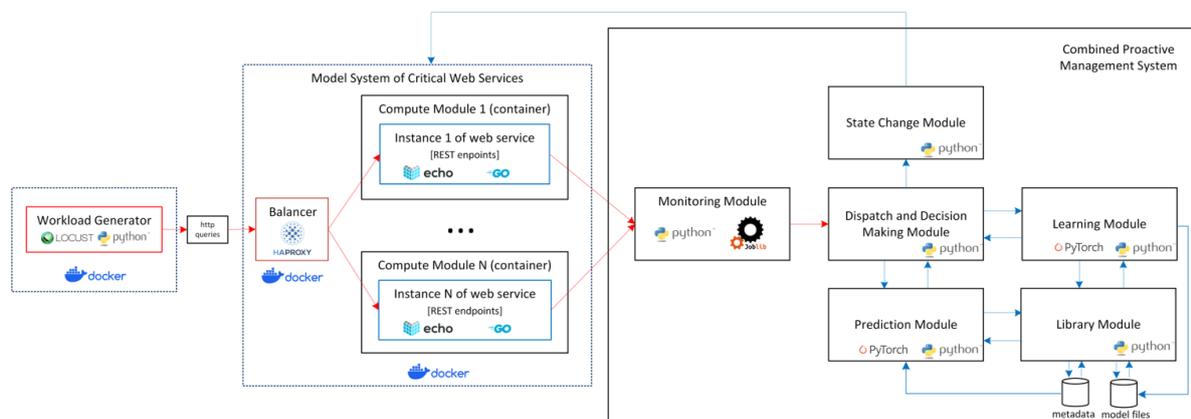


Рис. 9. Структурная схема комбинированной системы управления

Модуль мониторинга, отвечает за сбор метрик производительности вычислительных модулей системы и добавление/удаление новых метрик (при изменении состояния системы). Для сбора метрик (каждые 2 с) используется библиотека joblib [16]. Модуль изменения состояния, отвечает за отправку управляющих команд и контроль корректности изменения состояния. Модуль диспетчеризации и принятия решений является центральным. Он и остальные модули реализованы на Python.

Модули обучения и прогнозирования используют библиотеку PyTorch [17]. Модуль обучения создает модели нейросетей по наборам данных для различных состояний управляемой системы и сохраняет модели в библиотеку моделей. Каждая модель кодируется индексом состояния. Модуль прогнозирования по индексу загружает модели из библиотеки нейросетевых моделей и выполняет прогнозы утилизации с определенной заблаговременностью для различных состояний управляемой системы. Для хранения метаданных моделей используется БД SQLite [18]. Взаимодействие между процессами реализовано с помощью библиотеки multiprocessing [19]. Схема взаимодействия процессов комбинированной системы управления представлена на рис. 10.

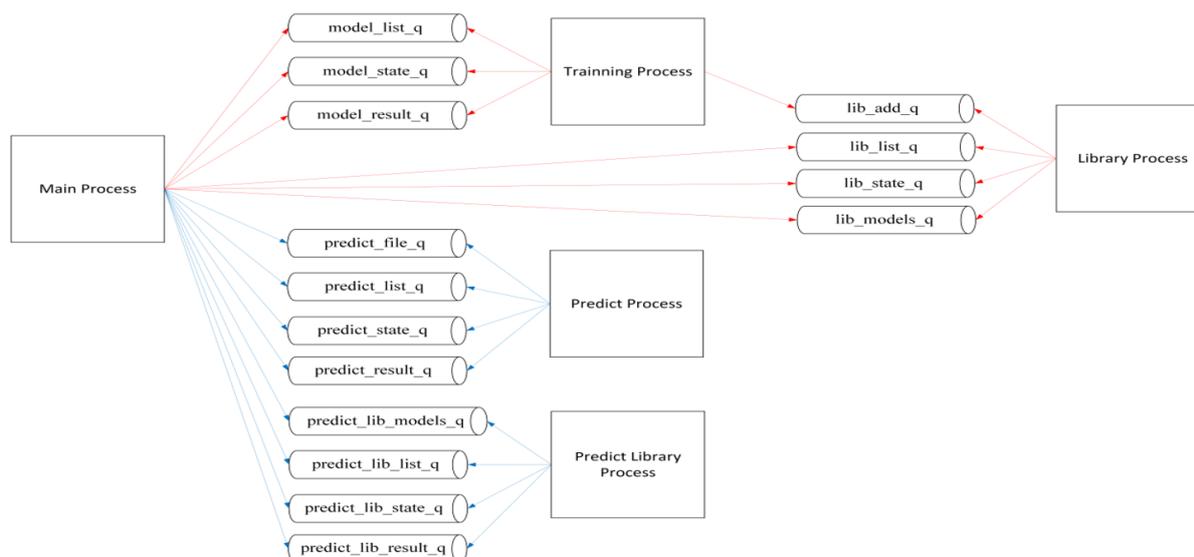


Рис. 10. Схема взаимодействия процессов комбинированной системы управления

Описание экспериментальной среды и результаты тестов

Модельная система, сервис балансировки, нагрузочная система функционируют в Docker-контейнерах на виртуальной машине под управлением ОС семейства Linux – Ubuntu 22.04.1 LTS. Система управления развернута непосредственно в ОС. Тесты производились на различном

физическом оборудовании. Финальные тесты проводились на виртуальной машине с параметрами: vCPU – 8 ядер, ОЗУ – 16 ГБ.

Качество работы комбинированной системы управления автоматическим масштабированием оцениваем с помощью ранее описанной методики. Используем метрику качества F с регулируемым весом λ для уточнения желаемого соотношения стоимости и штрафа. В качестве порогового значения для штрафующей функции по времени отклика используем 24 мс. Для расчета максимальной стоимости используем $C_{\max} = 6$. В экспериментах используются 3 профиля нагрузки, в табл. 1 представлено краткое описание.

Табл. 1. Описание профилей для нескольких типов нагрузки

Профиль нагрузки	Описание профиля	Время, ч
PROFILE2	Профиль "треугольник" без дисперсии. Возрастающая линейная нагрузка от 1 до 600 пользователей в течение 30 мин и убывающая линейная нагрузка от 600 до 0 пользователей в течение 30 мин	1
PROFILE2_DISP20	Профиль "треугольник" с случайным шумом. Возрастающая линейная нагрузка со случайным шумом от 1 до 600 пользователей в течение 30 мин и убывающая линейная нагрузка со случайным шумом от 600 до 0 пользователей в течение 30 мин	1
APROFILE1	Профиль НАСА_06.07.1995_4Н. Основан на реальной нагрузке, описывающей запросы пользователей к web-серверу Космического центра им. Кеннеди НАСА во Флориде 6 июля 1995 г. Исходный профиль был сжат с 24 часов до 4 часов и отмасштабирован до 600 пользователей (при этом исходное количество отсчетов было сохранено) и преобразован в нагрузочный профиль для Locust	4

Каждый профиль тестировался на 3-х различных алгоритмах. В названии алгоритма закодированы основные параметры работы. Расшифровка кода представлена в табл. 2. В каждой группе тестов, соответствующих определенному профилю, тест с реактивным алгоритмом рассматривается как базисный. Работа других алгоритмов сравнивается по метрикам качества с базисным алгоритмом.

Табл. 2. Расшифровка кода алгоритмов

Код алгоритма	Тип	Порог добавления, %CPU_Util	Порог удаления, %CPU_Util	Период стабилизации, с
AR90.50.60	Реактивный	90	50	60
AR90.50.60F	Гибридный (Реактивный + DLANN)	90	50	60
AR90.50.60F NNL_LM	Гибридный (Реактивный + DLANN + DLANNLIB самая простая реализация Last Model)	90	50	60

В табл. 3 представлены результаты экспериментов работы автоматизированной системы управления для 3-х различных профилей нагрузки. Метрики качества рассчитывались после проведения экспериментов, исходя из полученной статистики нагрузочной системы и логов работы системы управления.

Табл. 3. Результаты экспериментов с 3 типами нагрузки

Профиль нагрузки	Название алгоритма	Нормализованные значения		Целевая функция		
		C^{norm}	V^{norm}	$2F_{1/2}$	$F_{1/3}$	$F_{2/3}$
PROFILE2	AR90.50.60	0.387	0.727	1.115	0.501	0.351
	AR90.50.60F	0.434	0.515	0.949	0.461	0.367
	AR90.50.60FNNL_LM	0.463	0.467	0.930	0.465	0.377
PROFILE2_DISP20	AR90.50.60	0.382	0.793	1.176	0.519	0.350
	AR90.50.60F	0.431	0.544	0.975	0.469	0.366
	AR90.50.60FNNL_LM	0.420	0.595	1.015	0.478	0.362
APROFILE1	AR90.50.60	0.341	0.732	1.073	0.471	0.336
	AR90.50.60F	0.349	0.699	1.048	0.466	0.339

	AR90.50.60FNNL_LM	0.356	0.668	1.024	0.460	0.341
--	-------------------	-------	-------	-------	-------	-------

Рис. 12–14 используются в качестве иллюстрации различий работы алгоритмов для профилей нагрузки PROFILE2, PROFILE2_DISP20, APROFILE1. Цветом показаны данные для различных состояний.

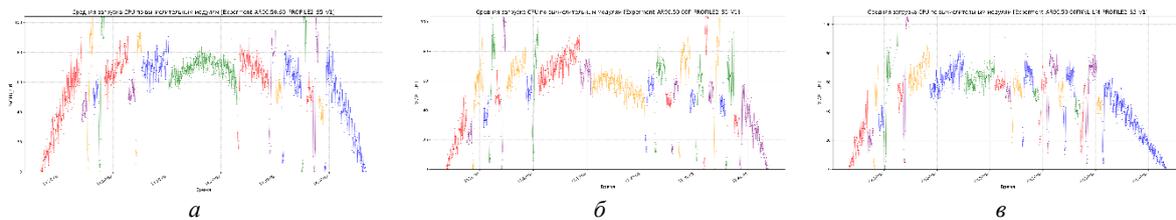


Рис. 12. Иллюстрация работы алгоритмов для профиля PROFILE2: *a* – AR90.50.60; *б* – AR90.50.60F; *в* – AR90.50.60FNNL_LM

Анализ результатов для профиля PROFILE2 показывает, что по сумме нормированных метрик стоимости и штрафов $2F_{1/2}$ самым эффективным оказался алгоритм с библиотекой моделей DLANNLIB. Он примерно на 20 % лучше реактивного и на 2 % лучше алгоритма DLANN.

Если сравнивать по отдельным метрикам, то самым экономным по ресурсам, как и ожидалось, является реактивный алгоритм, который экономнее DLANN на 12% и DLANNLIB на 20 %. По штрафам для времени отклика самым лучшим оказался DLANNLIB, который почти на 57 % лучше реактивного алгоритма и на 10 % лучше DLANN.

Для целевой функции $F_{1/3}$ с большим весом в сторону штрафов, лучшими почти с одинаковыми результатами оказались DLANN и DLANNLIB, которые примерно на 8 % эффективнее реактивного.

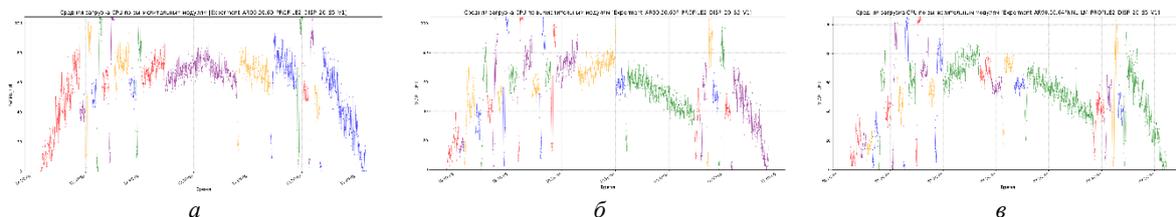


Рис. 13. Иллюстрация работы алгоритмов для профиля PROFILE2_DISP20: *a* – AR90.50.60; *б* – AR90.50.60F; *в* – AR90.50.60FNNL_LM

Анализ результатов для профиля PROFILE2_DISP20 показывает, что по целевой функции $2F_{1/2}$ самым эффективным оказался DLANN. Он примерно на 21% лучше реактивного и на 4 % лучше DLANNLIB.

Наиболее экономичным по ресурсам, является реактивный алгоритм, который оказался экономичнее DLANNLIB на 10 % и DLANN на 13 %. По штрафам по времени отклика самым лучшим оказался DLANN, который почти на 46 % лучше реактивного алгоритма и на 9% лучше DLANN.

Для целевой функции $F_{1/3}$, лучшими почти с одинаковыми результатами оказались алгоритмы DLANN и DLANNLIB, которые примерно на 10% оказались эффективнее реактивного.

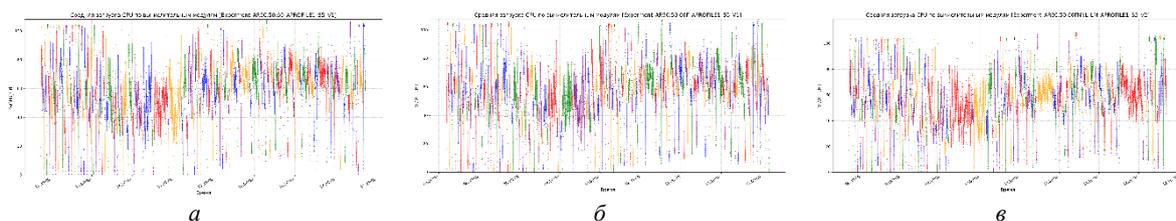


Рис. 14. Иллюстрация работы алгоритмов для профиля APROFILE1: *a* – AR90.50.60; *б* – AR90.50.60F; *в* – AR90.50.60FNNL_LM

Анализ результатов для профиля APROFILE1 показывает, что по целевой функции $2F_{1/2}$ самым эффективным оказался алгоритм DLANNLIB. Он примерно на 5 % лучше реактивного и на 2 % лучше алгоритм DLANN. Наиболее экономным по ресурсам, является реактивный алгоритм, который экономнее DLANNLIB на 4 % и DLANN на 2 %. По штрафам по времени отклика самым лучшим оказался DLANNLIB, который почти на 10 % лучше реактивного алгоритма и на 5 % лучше DLANN.

Для целевой функции $F_{1/3}$ лучшими (почти с одинаковыми результатами) оказались алгоритмы DLANNLIB и DLANN, которые примерно на 2 % эффективнее реактивного.

Полученные результаты показывает, что алгоритмы, работающие хорошо на синтетических данных, серьезно снижают свою эффективность на сложно устроенном профиле, основанном на реальной нагрузке (с 20 % до 5 % по целевой функции $2F_{1/2}$). Но вместе с тем по времени отклика остаются примерно на 10 % эффективнее реактивного алгоритма.

Базовый реактивный алгоритм сохраняет свое преимущество по экономии ресурсов. При этом алгоритм DLANNLIB в самой простой конфигурации (с использованием модели для предыдущего состояния) демонстрирует лучшие показатели по большинству метрик качества на нагрузке, приближенной к реальной.

Заключение

В статье рассмотрена проблема, связанная с управлением вычислительными ресурсами критичного ИТ-сервиса в условиях неопределенности внешней нагрузки.

Предложен оригинальный мультимодельный подход (с использованием библиотеки моделей) к прогнозированию управляющего решения, повышающий адаптационные свойства и устойчивость управляемой системы. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие работоспособность указанного подхода и используемых технологий.

Результаты экспериментов показывают, что алгоритмы, хорошо работающие на синтетических нагрузках, серьезно снижают свою эффективность на сложно устроенном профиле, основанном на реальной нагрузке. Но при этом остаются на 10 % эффективнее реактивного алгоритма по времени отклика.

По совокупности показателей при работе с нерегулярной и сложной нагрузкой комбинированные алгоритмы оказались эффективнее реактивных.

MULTI-MODEL APPROACH TO BUILDING PROACTIVE COMPUTATIONAL RESOURCE MANAGEMENT SYSTEMS

V.V. KRASNOPROSHIN, A.A. STAROVOITOV

Abstract. The paper outlines the principles of designing and implementing a proactive multi-model management system for critical IT services under conditions of uncertain external load profiles and resource constraints.

Keywords: local decision-making, information system, proactive management, external load uncertainty, neural networks, multi-model system.

Список литературы

1. Straesser M., Grohmann J., von Kistowski J., Eismann S., Bauer A., Kounev S. Why Is It Not Solved Yet?: Challenges for Production-Ready Autoscaling // In ICPE '22: ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering, Beijing, China, April 9 - 13, 2022, P. 105–115, ACM, 2022.
2. Microsoft Azure. Get started with autoscale in Azure [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/azure-monitor/autoscale/autoscale-get-started>. Дата доступа: 05.04.2025
3. Amazon Web Services. Predictive Scaling for EC2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://aws.amazon.com/en/blogs/aws/new-predictive-scaling-for-ec2-powered-by-machine-learning/>. Дата доступа: 05.04.2025.
4. Google Cloud Docs. Autoscaling groups of instances [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cloud.google.com/compute/docs/autoscaler/>. Дата доступа: 05.04.2025.
5. The Kubernetes Authors. Horizontal Pod Autoscaler [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kubernetes.io/docs/tasks/run-application/horizontal-pod-autoscale/>. Дата доступа: 05.04.2025.
6. Singh P., Gupta P., Jyoti K., Nayyar A. Research on auto-scaling of web applications in cloud: survey, trends and future directions // Scalable Computing: Practice and Experience. 2019. Vol. 20, № 2. P. 399–432.
7. Starovoytov A. A., Krasnoproshin V. V. Technology for making real-time decisions based on neural network forecasting // Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'2023): Proceedings of the 16th International Conference, October 17–19, 2023, Minsk, Belarus. Minsk, 2023. P. 58–63.
8. Docker Compose Overview [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.docker.com/compose/>. Дата доступа: 05.04.2025.
9. HAProxy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.haproxy.org/>. Дата доступа: 05.04.2025.
10. Echo LabStack High performance extensible minimalist Go web framework [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://echo.labstack.com/>. Дата доступа: 05.04.2025.
11. Go an open-source programming language supported by Google [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://go.dev/>. Дата доступа: 05.04.2025.
12. Locust [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://locust.io/>. Дата доступа: 05.04.2025.
13. Python [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.python.org/>. Дата доступа: 05.04.2025.
14. Aslanpour M. S., Ghobaei-Arani M., Toosi A. Auto-scaling Web Applications in Clouds: A Cost-Aware Approach // Journal of Network and Computer Applications. 2017. Vol. 95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.07.012>. Дата доступа: 05.04.2025.
15. Lawrence Berkeley National Laboratory. Internet Traffic Archive. NASA-HTTP [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ita.ee.lbl.gov/html/contrib/NASA-HTTP.html/>. Дата доступа: 05.04.2025.
16. Joblib Python library [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://joblib.readthedocs.io/en/latest/parallel.html/>. Дата доступа: 05.04.2025.
17. Pytorch [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pytorch.org/>. Дата доступа: 05.04.2025.
18. SQLite [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sqlite.org/>. Дата доступа: 05.04.2025.
19. Multiprocessing Python library [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.python.org/3/library/multiprocessing.html/>. Дата доступа: 05.04.2025.

РАЗРАБОТКА КОГНИТИВНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА В ОБРАБОТКЕ ТЕКСТОВОЙ ИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

К.Э. ЧЕРНЯВСКИЙ, А.В. СИТНИКОВ, А.Н. МАРКОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 3 марта 2025

Аннотация. В статье представлена разработка когнитивно-ориентированного подхода к обработке текстовой информации с использованием искусственного интеллекта (ИИ). Предложенная модель учитывает когнитивные особенности человеческого восприятия текста, включая контекстное понимание, адаптацию к индивидуальным характеристикам пользователя и устранение неоднозначности значений слов и выражений. Разработана архитектура системы, включающая модули контекстного анализа, пользовательской адаптации и модуль разрешения смысловых неопределённостей. В рамках исследования проведен эксперимент, сравнивающий эффективность когнитивно-ориентированного подхода с традиционными методами обработки текстов. Результаты показали, что предложенная модель улучшает точность анализа информации на 15% и повышает удовлетворенность пользователей на 25%. В статье рассматриваются преимущества, ограничения и перспективы применения данного подхода в различных областях, таких как медицина, образование и социальные исследования.

Ключевые слова: искусственный интеллект, обработка текстовой информации, когнитивно-ориентированный подход, контекстный анализ, адаптация к пользователю, обработка естественного языка (NLP), машинное обучение, глубокое обучение, интеллектуальные системы.

Введение

Современные подходы к обработке текстовой информации на основе искусственного интеллекта (ИИ) преимущественно ориентированы на обеспечение высокой точности выполнения следующих задач: автоматический перевод, анализ текста, классификация или извлечение информации [1]. При этом учет когнитивных особенностей человека, таких как восприятие текста, контекстное понимание и интуитивная обработка данных, представляет значительную сложность при разработке подобных систем [2]. В результате возникают ограничения в областях, где важна адаптация к особенностям человеческого восприятия, например, в образовательных системах и медицинских приложениях [3].

Основной задачей данной работы является разработка новой теоретической модели когнитивно-ориентированного подхода к обработке текстовой информации. Такой подход включает моделирование процесса анализа текста с учетом когнитивных особенностей человеческого мышления.

Когнитивные аспекты обработки текста

Когнитивно-ориентированный подход к обработке текстовой информации основан на том, что алгоритмы ИИ должны учитывать следующие аспекты:

1. Контекстное понимание текста. Человеческий мозг обрабатывает информацию, опираясь на широкий спектр контекстов: культурный, социальный, психологический [4]. Например, одно и то же слово может приобретать разное значение в зависимости от ситуации.

2. Динамическая адаптация к пользователю. Восприятие информации зависит от уровня образования, возраста, эмоционального состояния и других факторов [5]. Алгоритмы ИИ должны адаптировать обработку текста с учетом индивидуальных особенностей.

3. Разрешение смысловых неопределённостей. Человеческий мозг интерпретирует текст даже при наличии ошибок, пропусков или двусмысленностей, и ИИ-системы должны имитировать этот процесс [6].

Модель когнитивно-ориентированного подхода

Для реализации когнитивно-ориентированного подхода предлагается использовать архитектуру, включающую три основных компонента:

1. Модуль контекстного анализа. Использует расширенные модели обработки естественного языка (например, BERT или GPT), дополненные контекстными метаданными (культурные особенности, тематические связи).

2. Модуль пользовательской адаптации. Собирает данные о пользователе (например, его предпочтения, уровень знаний) и динамически адаптирует обработку текста.

3. Модуль разрешения смысловых неопределённостей. Анализирует возможные варианты интерпретации текста и определяет наиболее соответствующий контексту смысл. Разрабатывается на основе нейросетевых моделей.

Оценка предложенного подхода

Оценка эффективности когнитивно-ориентированной архитектуры проводилась путем сравнения с традиционными методами обработки текстовой информации.

Для проверки эффективности архитектуры были разработаны две системы обработки текста:

1. Традиционная система на базе стандартной модели обработки естественного языка (например, BERT) [7].

2. Когнитивно-ориентированная система, реализующая предложенную архитектуру [8].

Сравнение проводилось на основе обработки одного и того же набора текстов, анализируемого по следующим критериям:

1. Точности анализа текста.

2. Уровня удовлетворенности пользователей.

Для тестирования были выбраны следующие категории текстов:

1. Тексты статей из научных журналов.

2. Текстовые описания медицинских случаев.

Результаты тестирования

Когнитивно-ориентированная система показала на 15% большую точность при обработке текстов с неоднозначностями.

Уровень удовлетворенности пользователей вырос на 25% благодаря адаптации системы к их когнитивным особенностям.

Скорость обработки когнитивно-ориентированного подхода оказалась на 10% ниже традиционного из-за необходимости обработки дополнительных параметров, однако это не оказало существенного влияния на итоговую эффективность.

Полученные результаты подтверждают, что когнитивно-ориентированный подход обеспечивает более высокую точность анализа текста и лучшую адаптацию к пользователям по сравнению с традиционными методами, несмотря на небольшое снижение скорости обработки.

Анализ результатов тестирования когнитивно-ориентированного подхода позволил выделить его ключевые преимущества и ограничения:

1. Преимущества.

1.1 Улучшение точности анализа текста.

1.2 Повышение удовлетворенности пользователей.

1.3 Возможность работы с текстами, содержащими ошибки или неоднозначности.

2. Ограничения.

2.1. Большие вычислительные затраты из-за усложненной архитектуры.

2.2. Необходимость предварительной настройки системы под каждого пользователя.

Заключение

Когнитивно-ориентированный подход к обработке текстовой информации представляет собой перспективное направление в развитии ИИ. Его использование позволяет повысить точность анализа текста и улучшить взаимодействие системы с пользователем за счет учета когнитивных особенностей [9]. Перспективы развития включают адаптацию данной модели для применения в образовании, медицине и социальных исследованиях, что позволит расширить её функциональность и повысить практическую ценность.

DEVELOPMENT OF A COGNITIVE-ORIENTED APPROACH TO TEXT INFORMATION PROCESSING USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

K.E. CHERNYAVSKY, A.V. SITNIKOV, A.N. MARKOV

Abstract. This article presents the development of a cognitive-oriented approach to text information processing using artificial intelligence (AI). The proposed model takes into account the cognitive characteristics of human text perception, including contextual understanding, adaptation to individual user characteristics, and processing of textual ambiguities. An architecture for the system has been developed, incorporating modules for contextual analysis, user adaptation, and ambiguity processing. As part of the research, an experiment was conducted comparing the effectiveness of the cognitive-oriented approach with traditional text processing methods. The results showed that the proposed model improves the accuracy of information analysis by 15% and increases user satisfaction by 25%. The article also discusses the advantages, limitations, and prospects for applying this approach in various fields such as medicine, education, and social research.

Keywords: artificial intelligence, text information processing, cognitive-oriented approach, contextual analysis, user adaptation, ambiguity processing, natural language processing (NLP), machine learning, deep learning, intelligent systems.

Список литературы

1. Norvig P., Russell S. / Artificial Intelligence: A Modern Approach. Moscow: Williams. 2020.
2. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. / Deep Learning. Moscow: DMK Press. 2018.
3. Zhabin S. / Big Data Processing: From Algorithms to Applications. Moscow: Eksmo. 2019.
4. Weston D. / Machine Learning and Data Analysis. Moscow: Alpina Publisher. 2021.
5. Topol E. / Artificial Intelligence and the Future of Medicine. Moscow: Alpina Publisher. 2020.
6. Chollet J., Barbier M. / Artificial Intelligence: Theory and Practice. St. Petersburg: Piter. 2021.
7. Legg S., Hassabis D. / Machines That Learn. Moscow: Knowledge Lab. 2022.
8. Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. // arXiv preprint. 2018.
9. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., et al. // Advances in Neural Information Processing Systems. 2017.

ГРАДИЕНТНЫЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ В КОМПЬЮТЕРНОМ ЗРЕНИИ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

К.А. СКАЛОЗУБ, С.Н. НЕСТЕРЕНКОВ, А.Д. ЯРМОШ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 10 февраля 2025

Аннотация. В статье рассматриваются градиентные методы оптимизации, применяемые в компьютерном зрении для медицинской диагностики. Описаны основные методы, такие как SGD, Adagrad, RMSprop, Adam и L-BFGS, их особенности и влияние на точность обучения нейросетей. Приведены примеры их использования в анализе медицинских изображений, включая диагностику опухолей, распознавание патологий и обработку ультразвуковых снимков. Подчеркивается важность выбора метода оптимизации для повышения точности диагностики и сокращения количества ошибок.

Ключевые слова: градиентные методы, оптимизация, компьютерное зрение, медицинская диагностика, нейронные сети, анализ изображений.

Введение

Компьютерное зрение играет ключевую роль в медицинской диагностике, обеспечивая анализ медицинских изображений, таких как рентгеновские снимки, МРТ, КТ и ультразвуковые исследования. Градиентные методы оптимизации являются основой обучения глубоких нейронных сетей, используемых в диагностических системах. В данной статье рассмотрены основные градиентные методы, их применение и влияние на точность медицинского анализа.

Градиентные методы оптимизации широко используются для минимизации функции потерь в моделях машинного обучения. Среди них стоит выделить стохастический градиентный спуск (SGD), который основывается на вычислении градиента по случайным мини-батчам данных. Этот метод обеспечивает быструю сходимость, однако он подвержен колебаниями, что может негативно сказаться на стабильности обучения.

Основные градиентные методы оптимизации

Градиентные методы оптимизации используются для минимизации функции потерь в моделях машинного обучения. Среди них наиболее популярны:

1. Стохастический градиентный спуск (SGD). Основан на вычислении градиента по случайным мини-батчам данных; обеспечивает быструю сходимость, но подвержен колебаниям.

2. Адаптивный градиентный спуск (Adagrad). Использует разные темпы обучения для разных параметров; хорошо работает с разреженными данными, но скорость обучения со временем снижается.

3. RMSprop. Улучшает Adagrad за счет экспоненциального усреднения градиентов; применяется для стабилизации обучения и эффективен в задачах компьютерного зрения.

4. Adam (Adaptive Moment Estimation). Комбинирует идеи Adagrad и RMSprop, учитывая момент градиента; один из наиболее популярных методов для глубоких нейросетей.

5. L-DFGS (Limited-memory Droyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno). Используется в задачах, где требуется высокая точность при небольшом количестве данных; позволяет находить более точные локальные минимумы.

Применение в медицинской диагностике

Градиентные методы оптимизации используются в обучении нейросетей для различных областей медицинской диагностики. Например, в распознавании патологий на рентгеновских снимках активно используются сверточные нейросети (CNN), где оптимизация моделей с помощью Adam или RMSprop позволяет эффективно выявлять аномалии. Классификация опухолей на МРТ и КТ также становится более точной благодаря глубоким нейросетям, таким как ResNet и U-Net, которые сегментируют изображения и минимизируют ошибку классификации.

Анализ ультразвуковых изображений представляет собой еще одну область применения, где гибридные модели, использующие LSTM и CNN, оптимизируются с помощью SGD. Это позволяет значительно уменьшить количество ложноположительных результатов за счет корректной настройки параметров обучения. В диагностике кожных заболеваний нейросети обучаются на фотографиях кожных поражений, и здесь градиентный спуск помогает повысить эффективность анализа. Применение методов регуляризации в таких случаях улучшает обобщающую способность сети, что в свою очередь повышает точность диагностики.

Влияние оптимизации на точности диагностики

Грамотный выбор метода оптимизации существенно влияет на качество диагностики. Например, использование Adam в глубоких сетях не только ускоряет сходимость, но и предотвращает переобучение благодаря адаптивному изменению темпа обучения. Метод RMSprop помогает стабилизировать процесс обучения на сложных наборах данных, что критически важно для достижения высокой точности в медицинской практике.

Совместные методы, такие как AdamW, демонстрируют улучшенные результаты при работе с реальными медицинскими изображениями, что подтверждает необходимость дальнейших исследований в этой области. Все это подчеркивает, что выбор конкретного метода оптимизации зависит от характера данных и требует внимательного подхода.

Использование гибридных моделей

С развитием методов машинного обучения и нейросетевых архитектур растет интерес к комбинированным подходам. Например, для диагностики опухолей на медицинских изображениях используют гибридные модели, такие как сочетание сверточных нейронных сетей и долгой краткосрочной памяти (LSTM), что позволяет улучшить обработку пространственно-временных данных (например, в ультразвуковых изображениях). Применение градиентных методов, таких как Adam и RMSprop, в таких моделях помогает эффективно обучать сеть с минимизацией ошибок и повышением точности.

Заключение

Градиентные методы оптимизации являются неотъемлемой частью обучения нейросетей в медицинской диагностике. Выбор конкретного метода зависит от характера данных и требует точности. Значимость методов нельзя переоценить, так как правильный выбор может существенно повысить точность компьютерного анализа медицинских изображений и, следовательно, эффективность диагностики заболеваний. Продолжение исследований в этой области позволит не только улучшить существующие подходы, но и разработать новые, более эффективные методы, что в конечном итоге будет способствовать улучшению качества медицинской помощи.

GRADIENT OPTIMIZATION METHODS IN COMPUTER VISION FOR MEDICAL DIAGNOSTICS

K.A. SKALOZUB, S.N. NESTERENKOV, A.D. YARMOSH

Abstract. This article discusses gradient optimization methods used in computer vision for medical diagnostics. It describes the main methods, such as SGD, Adagrad, RMSprop, Adam, and L-BFGS, their characteristics, and their impact on the accuracy of neural network training. Examples of their use in the analysis of medical images are provided, including tumor diagnostics, pathology recognition, and ultrasound image processing. The importance of selecting an optimization method to enhance diagnostic accuracy and reduce the number of errors is emphasized.

Keywords: gradient methods, optimization, computer vision, medical diagnostics, neural networks, image analysis.

Список литературы

1. Гасников А. Современные численные методы оптимизации. М., 2021. Р. 163–183.
2. Клетте Р. Компьютерное зрение Теория и алгоритмы. М., 2019. Р. 117–147.
3. Конушин А. Компьютерное зрение. М, 2021. Р. 24–51.
4. Szeliski R. // Computer Vision: Algorithms and Applications. 2010. Р. 207–238.
5. Гулицкий А. Применение сверточных нейронных сетей для задачи детектирования объектов в реальном времени. 2020. Р. 63–86.

УДК 330.342.24

КОНЦЕПЦИЯ, МОДЕЛЬ, ПРИМЕРЫ СИСТЕМ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В.А. ВИШНЯКОВ, М.Ю. МАКСАК

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 2 апреля 2025

Аннотация. Представлены основные концепции интернета вещей (IoT) в энергетике. IoT позволяет создавать "умные сети" (smart grids), которые обеспечивают более эффективное управление энергопотреблением. Обсуждены ключевые компоненты таких систем. Математическая модель для системы IoT, ориентированной на энергосбережение представлена как задача оптимизации, где целевой функцией является минимизация энергопотребления.

Ключевые слова: IoT, умные сети, энергопотребление, задача оптимизации, структура, энергосбережение.

Введение

Современный мир сталкивается с растущими вызовами в области энергопотребления и управления энергетическими ресурсами. Рост населения, урбанизация и увеличение спроса на электроэнергию требуют внедрения инновационных технологий для оптимизации процессов генерации, распределения и потребления энергии. Одной из таких технологий является интернет вещей (IoT), который позволяет создавать интеллектуальные системы управления энергоснабжением [1]. В данной статье рассматриваются возможности IoT для повышения эффективности электроснабжения, приводятся математическая модель и примеры внедрения таких систем и анализируются их преимущества.

Основные концепции интернета вещей в энергетике

Интернет вещей представляет собой сеть взаимосвязанных устройств, которые собирают, обмениваются и анализируют данные в реальном времени. В контексте энергетике IoT позволяет создавать "умные сети" (smart grids), которые обеспечивают более эффективное управление энергопотреблением. Ключевыми компонентами таких систем являются:

1. Сенсоры и устройства сбора данных: измеряют параметры, такие как напряжение, ток, потребление энергии и состояние оборудования.
2. Системы передачи данных: обеспечивают обмен информацией между устройствами и центрами управления.
3. Аналитические платформы: обрабатывают данные и предоставляют insights для принятия решений.
4. Автоматизированные системы управления: регулируют работу энергосистемы на основе полученных данных.

Преимущества IoT для электроснабжения:

1. Оптимизация энергопотребления: IoT позволяет отслеживать потребление энергии в режиме реального времени и выявлять узкие места. Например, умные счетчики могут предоставлять данные о пиковых нагрузках, что помогает снижать затраты на электроэнергию.
2. Прогнозирование и планирование: Анализ данных, собранных IoT-устройствами, позволяет прогнозировать спрос на энергию и оптимизировать генерацию.

3. Снижение потерь: IoT помогает выявлять утечки энергии и неэффективное использование ресурсов.

4. Повышение надежности: мониторинг состояния оборудования в реальном времени позволяет предотвращать аварии и минимизировать downtime.

Для достижения эффективного энергосбережения требуется разработка математических моделей и структурированных систем, которые позволяют оптимизировать потребление энергии на основе данных, получаемых от IoT-устройств.

Математическая модель энергосбережения

Математическая модель для системы IoT, ориентированной на энергосбережение, может быть представлена как задача оптимизации, где целевой функцией является минимизация энергопотребления при соблюдении определенных ограничений. Рассмотрим пример модели для умного здания, где IoT-устройства управляют освещением, отоплением и кондиционированием воздуха.

Пусть $E(t)$ – общее энергопотребление системы в момент времени t ; $x_i(t)$ – состояние i -го устройства (например, включено/выключено или уровень мощности); $C(t)$ – ограничения, такие как комфортная температура или уровень освещенности.

Целевая функция может быть записана как

$$\text{Min} \sum E(t), (t = 1, T),$$

где T – временной горизонт оптимизации.

Ограничения могут включать

$$C_{\min} \leq C(t) \leq C_{\max},$$

где C_{\min} и C_{\max} – допустимые границы комфортных условий.

Для решения такой задачи могут использоваться методы линейного программирования, генетические алгоритмы или методы машинного обучения, такие как обучение с подкреплением (reinforcement learning), которые адаптивно настраивают параметры системы на основе данных.

Примеры внедрения IoT в энергетике

1. Умные сети в Европе: в странах ЕС активно внедряются smart grids, которые используют IoT для управления распределением энергии. Например, в Германии проект "E - Energy" объединяет более 1000 IoT-устройств, что позволило снизить потери энергии на 15 % [2].

2. Умные города в Китае: в Шэньчжэне внедрена система умного уличного освещения, которая использует IoT для регулирования яркости в зависимости от времени суток и погодных условий. Это позволило сократить энергопотребление на 30 % [3].

3. Промышленные IoT-решения: компания Siemens внедрила IoT-платформу MindSphere для мониторинга энергопотребления на производственных объектах. Это позволило снизить затраты на энергию на 20 % [4].

Несмотря на преимущества, внедрение IoT в энергетике сталкивается с рядом вызовов [5]:

1. Кибербезопасность: увеличение числа подключенных устройств повышает риск кибератак.

2. Стоимость внедрения: развертывание IoT-систем требует значительных инвестиций.

3. Сложность интеграции: совместимость различных устройств и платформ остается проблемой.

Структура системы IoT для энергосбережения

Система IoT для энергосбережения состоит из нескольких ключевых компонентов:

1. Датчики и устройства: сбор данных о температуре, освещенности, влажности и других параметрах.

2. Сеть передачи данных: обеспечение связи между устройствами и центральным сервером (например, через Wi-Fi, Zigbee или LoRaWAN).

3. Центр обработки данных: анализ данных и принятие решений на основе математической модели.

4. Актуаторы: устройства, которые выполняют команды, такие как регулировка температуры или включение/выключение света.

Примером такой системы может служить умное здание, где датчики отслеживают наличие людей в помещении и адаптируют освещение и отопление в реальном времени. Например, если в комнате никого нет, система автоматически снижает энергопотребление.

Рассмотрим пример умного дома, где система IoT управляет энергопотреблением. Датчики движения и освещенности отслеживают активность в помещении. Если в комнате нет людей, система автоматически выключает свет и снижает мощность отопления. Математическая модель оптимизирует энергопотребление, учитывая прогноз погоды и тарифы на электроэнергию. В результате такая система может снизить энергопотребление на 20-30 % [6].

Умная энергетика в Беларуси

В соответствии с Национальной стратегией устойчивого развития Республики Беларусь до 2035 года [7], развитие энергетика будет нацелено на обеспечение стабильного и надежного функционирования системы энергообеспечения всех потребителей, повышение эффективности использования энергоносителей при снижении нагрузки на окружающую среду.

Важным направлением станет обеспечение доступа к надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех потребителей, что соответствует ЦУР 7 Повестки – 2030.

Одна из важнейших задач – экономически и экологически целесообразное развитие энергоисточников, использующих местные виды топлива.

Активизируется работа по диверсификации поставщиков топливноэнергетических ресурсов (ТЭР), для чего предусматривается формирование общих энергетических рынков Евразийского экономического союза и участие во взаимной торговле на них и других международных рынках, а также развитие безуглеродных источников энергии.

Особый акцент будет сделан на оптимальное вовлечение в топливноэнергетический баланс возобновляемых источников энергии, включая их активную интеграцию в энергосистему за счет развития "умных" сетей, применения технологий аккумулирования электрической и тепловой энергии, распространения технологий использования возобновляемых источников энергии для собственных нужд. В этих целях энергоисточники, работающие на традиционных энергоресурсах, будут с учетом экономической целесообразности поэтапно заменяться объектами возобновляемой генерации.

На развитие информационных систем в отечественной энергетике оказывает влияние концепция Smart Grid. Smart Grid ("интеллектуальные сети электроснабжения") – это модернизированные сети электроснабжения, которые используют информационные и коммуникационные сети и технологии для сбора информации об энергопроизводстве и энергопотреблении, позволяющей автоматически повышать эффективность, надежность, экономическую выгоду, а также устойчивость производства и распределения электроэнергии [8].

В основу концепции Smart Grid положена целостная и всесторонне согласованная система взглядов на роль и место электроэнергетики в настоящем и будущем, целей и требований к ее развитию, подходов к их реализации и созданию необходимого технологического базиса.

На настоящем этапе развития под Smart Grid понимается набор программно-аппаратных средств, которые способствуют повышению эффективности производства, распределения и передачи электроэнергии.

При этом под эффективностью подразумевается:

1. Децентрализация функций генерации и управления потоками электроэнергии и информации в энергетической системе.

2. Снижение затрат на генерацию, распределение и передачу электроэнергии.

3. Оперативное устранение неисправностей.

4. Возможность передачи электроэнергии и информации в двух направлениях, что является важным условием для более интенсивного развития распределенной и возобновляемой энергетики.

Концепция Smart Grid предполагает активную роль потребителя энергии, когда он становится, с одной стороны, активным субъектом разработки и принятия решений по развитию и функционированию энергосистемы, а с другой – объектом управления, обеспечивающим реализацию ключевых требований. Появилось даже новое понятие "Prosumer" (от англ. producer + consumer).

Более того, интеллектуальная сеть должна быть результатом активного взаимодействия государства, энергокомпаний и потребителя, когда всем трем сторонам одинаково не выгодно нарушать общие правила работы внутри сети и при этом каждый участник получает свою экономическую выгоду [9].

По состоянию на апрель 2023 года уровень цифровизации энергетического комплекса Беларуси превышает 60 %. Ключевые направления внедрения технологий автоматизации и цифровизации в отрасли. Среди них - управление электрическими сетями и строительство новых цифровых подстанций.

Подстанция 330 кВ "Могилев" – первая в стране полностью цифровая подстанция такого класса напряжения. Ввод объекта в эксплуатацию позволил повысить надежность электроснабжения Могилевского энергоузла, вдвое сократить размеры площадей под оборудование. Благодаря высокой автоматизации процессов на подстанции не требуется постоянного присутствия персонала. Это существенно сокращает эксплуатационные и трудовые затраты по ее обслуживанию. Автоматизированные системы диспетчерского управления Минских тепловых сетей, контроллерное оборудование, а также автоматизированное рабочее места операторов внедрены в Минской ГЭЦ-3. РУП "Гродноэнерго" оборудовано программным комплексом "АМПЕР-М", который предназначен для автоматизации сбора и обработки информации о энергосбытовой деятельности. РУП "Брестэнерго" внедрило шкаф управления уличным освещением с функцией дистанционного съема показаний потребленной электроэнергии.

Всего в стране 1,4 тыс. подстанций с элементами цифровизации, шесть – полностью цифровых. "Умные" электрические сети в автоматическом режиме оперативно реагируют на изменения различных параметров и позволяют осуществлять бесперебойное электроснабжение с высокой экономической эффективностью. Пилотные проекты по внедрению технологии Smart Grid реализованы в Борисовском, Бобруйском, Лиознинском, Пинском районах электрических сетей.

Внедрение современных IT-решений – это и дополнительные возможности по предоставлению качественно новых услуг потребителям. В электроэнергетике для автоматизации учета электрической энергии электронные счетчики бытовых абонентов объединяются в автоматизированную систему "АСКУЭ-быт" с последующей интеграцией в ЕРИП. Это дает возможность бытовым потребителям рассчитываться за электрическую энергию по тарифам, дифференцированным по временным периодам, а также снижать свои расходы. К настоящему времени заменено уже более 4 млн счетчиков на электронные – это 90,6 % от их общего количества [10].

Заключение

1. Интернет вещей открывает новые возможности для повышения эффективности электроснабжения. Благодаря IoT можно оптимизировать энергопотребление, снизить потери и повысить надежность энергосистем. Однако для успешного внедрения необходимо учитывать такие факторы, как кибербезопасность и стоимость реализации. Примеры из Европы, Китая и промышленного сектора демонстрируют, что IoT уже сегодня приносит значительные преимущества в управлении энергетическими ресурсами.

2. Математические модели и структурированные системы IoT играют ключевую роль в эффективном энергосбережении. Они позволяют оптимизировать энергопотребление, снижая затраты и уменьшая воздействие на окружающую среду. Примеры внедрения таких систем, такие

как умные здания, демонстрируют их высокую эффективность и потенциал для широкого применения.

CONCEPT, MODEL, EXAMPLES OF INTERNET OF THINGS SYSTEMS FOR EFFICIENT POWER SUPPLY

U.A. VISHNIAKOU, M.Yu MAKSAK

Abstract. The basic concepts of the Internet of Things (IoT) in the energy sector are presented. IoT allows to create "smart grids" that provide more efficient energy management. The key components of such systems are discussed. The mathematical model for an energy-saving IoT system is presented as an optimization problem, where the objective function is to minimize energy consumption. Keywords:

Keywords: IoT, smart grids, energy consumption, optimization problem, structure, energy saving.

Список литературы

1. Вишняков В. А. Технология блокчейн в образовании и ИТ-медицине: модели, алгоритмы, программные средства: [монография] / В. А. Вишняков, Д. А. Качан. – Минск: РИВШ, 2023. – 184 с.
2. European Commission. (2021). Smart Grids and IoT: A European Perspective. Brussels.
3. Zhang Y., Li X., & Wang H. (2022). IoT-based Smart Lighting Systems in Shenzhen: A Case Study. *Journal of Smart Cities*, 7(2), 45-60.
4. Siemens. (2023). MindSphere: IoT Platform for Energy Management. Siemens White Paper.
5. International Energy Agency. (2020). The Role of IoT in Energy Efficiency. IEA Reports.
6. Saylim Z. A., Zaman N. (2020). A review on smart home present state and challenges: linked to context-awareness internet of things (IoT). *Wireless Networks*, 26(5), 3641-3656.
7. Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь до 2035 года [Электронный ресурс]/Сайт Министерства экономики Беларуси. – Режим доступа: <https://economy.gov.by/uploads/files/ObsugdaemNPA/NSUR-2035-1.pdf> – Дата доступа: 29.03.2025.
8. Государственная программа "Энергосбережение" на 2021 – 2025 годы [Электронный ресурс] / Сайт "Госстандарт". – Режим доступа: <https://gosstandart.gov.by/approved-state-program-energy-saving-for-2021-2025-years>. – Дата доступа: 29.03.2025.
9. Оганезов И. А. Перспективные решения "Интеллектуальных сетей электроснабжения" Smart Grid на сельских территориях Республики Беларусь / И. А. Оганезов, Н. В. Щербина, А. В. Буга // BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня : сборник научных статей VIII Международной научно-практической конференции, Минск, 11-12 мая 2022 года / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2022. – С. 124–133.
10. Минэнерго: уровень цифровизации энергетического комплекса Беларуси превышает 60% [Электронный ресурс] / Сайт "БелТА". – Режим доступа: <https://belta.by/economics/view/minenergo-uroven-tsifrovizatsii-energeticheskogo-kompleksa-belarusi-prevyshaet-60-561987-2023/>. – Дата доступа: 29.03.2025.

УДК 621.391

**ФОРМИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ
ИЗОБРАЖЕНИЙ НА БАЗЕ ОДНОПЛАТНОГО КОМПЬЮТЕРА**И.И. ЛЕВОНЕНКО^{1,2}, А.Д. РОБАЧЕВСКИЙ¹, М.Ю. ЛОВЕЦКИЙ¹, Е.Г. МАКЕЙЧИК¹

1 – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь,
2 – ОАО «Пеленг», Республика Беларусь

Поступила в редакцию 18 февраля 2025

Аннотация. Рассматривается задача оценки вычислительной эффективности алгоритма локальной корреляции применительно к задачам обработки изображений на одноплатном компьютере Rockchip AIO-3588MQ. С целью выявления оптимальных стратегий ускорения и оптимизации, проведено сравнительное исследование производительности различных реализаций алгоритма, адаптированных к архитектурным особенностям процессора Rockchip RK3588.

Ключевые слова: одноплатный компьютер, оценка качества комбинирования изображений, корреляция изображений, взвешенное сложение изображений.

Введение

Формирование и анализ многоканальных изображений, полученных методами инфракрасной и видимой спектроскопии, играет ключевую роль в исследовании поверхности материалов. Каждый канал в таких изображениях соответствует определенному спектральному диапазону, кодируя интенсивность отраженного или поглощенного излучения в виде яркости пикселей двумерной матрицы. Особую информативность часто демонстрируют каналы ближнего (NIR), среднего (MIR) инфракрасного и видимого (VIS) диапазонов.

Визуализация многоканальных спектральных данных требует объединения нескольких каналов в единое представление, адаптированное для отображения на устройствах с ограниченным динамическим диапазоном. Визуализация данных может быть осуществлена посредством цветового кодирования, например, путем преобразования интенсивности сигнала в ближнем инфракрасном диапазоне в компоненты видимого спектра [1], или с использованием монохромного отображения. При этом критически важно минимизировать артефакты и сохранить важные детали, характеризующие спектральные особенности материала. В данной работе исследуется формирование комбинированных полутоновых изображений на основе двух спектральных каналов. Особое внимание уделяется анализу производительности алгоритма локальной корреляции применительно к оценке качества такого объединения, а также сравнению эффективности различных стратегий оптимизации его реализации на вычислительной платформе AIO-3588MQ.

Основной акцент сделан на сравнении производительности разработанного алгоритма локальной корреляции при различных стратегиях оптимизации, включая параллельные вычисления и использование аппаратного ускорения, предоставляемого платформой AIO-3588MQ.

Цель работы – определение наиболее эффективного способа обработки спектральных данных для задач визуализации и анализа, направленного не только на повышение точности оценки качества комбинированных изображений, но и на оптимизацию вычислительных процессов с целью обеспечения возможности обработки данных в режиме, близком к реальному времени.

Формирование комбинированных изображений

При обработке данных, полученных в различных спектральных диапазонах (например, инфракрасном (IR) и видимом (VIS)), ключевой задачей является формирование комбинированного изображения, сохраняющего наиболее информативные особенности каждого канала. Исходя из того, что эффективность методов объединения не влияет на объективные показатели качества результирующего изображения, был выбран простой и эффективный метод взвешенного сложения, изображенный на рис. 1.

Согласно данному методу значения пикселей $m_c(y, x)$ комбинированного изображения $M_c = m_c(y, x)_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ (где y и x обозначают координаты пикселя) вычисляются как взвешенная сумма значений пикселей исходных изображений $M_1 = m_1(y, x)_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ и $M_2 = m_2(y, x)_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$, полученных, соответственно, в первом и втором каналах, на основе следующего выражения

$$m_c(y, x) = \left[km_1(y, x) + (1 - k)m_2(y, x) \right], \quad (1)$$

где $y = \overline{0, Y-1}$, $x = \overline{0, X-1}$; k – коэффициент, определяющий вклад значений пикселей каждого компонентного изображения M_1 и M_2 в значения пикселей комбинированного изображения M_c , $0 < k < 1$; Y, X – размеры (в пикселях) компонентных и комбинированного изображений по вертикали и горизонтали; $[]$ – операция округления значений пикселей до ближайшего целого.

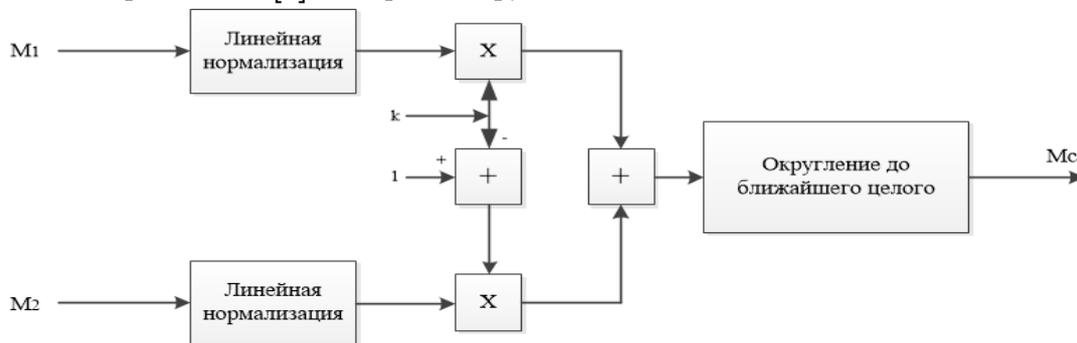


Рис. 1. Схема формирования комбинированного изображения на основе взвешенного сложения компонентных изображений

Меньшие значения коэффициента k на рис. 1 указывают на снижение относительного вклада значений пикселей исходного изображения M_1 в формирование комбинированного изображения M_c , по сравнению с вкладом исходного изображения M_2 . Таким образом, варьируя значение k , можно контролировать баланс между информацией, представленной в каждом из исходных каналов, в результирующем комбинированном изображении.

Оценка качества комбинирования изображений на основе коэффициента локальной корреляции

Повышение точности корреляционной оценки качества комбинирования изображений достигается за счет учета локальных особенностей распределений значений пикселей в компонентных и комбинированном изображениях. Для этого используется коэффициент $r_L(A, B)$ локальной корреляции двух изображений $A = a(y, x)$ и $B = b(y, x)$ при $y = \overline{0, Y-1}$, $x = \overline{0, X-1}$, вычисляемый с помощью выражения

$$r_L(A, B, p) = \frac{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} |a(y, x) - a_L(y, x, p)| |b(y, x) - b_L(y, x, p)|}{\sqrt{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (a(y, x) - a_L(y, x, p))^2 \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (b(y, x) - b_L(y, x, p))^2}}, \quad (2)$$

где $a_L(y, x, p)$, $b_L(y, x, p)$ – средние значения яркостей пикселей изображений A и B в окрестности пикселя с координатами (y, x) размером $p \times p$ пикселей.

Для комплексной оценки качества комбинирования изображений, учитывающей взаимосвязь между результирующим комбинированным изображением, каждым из его компонент, а также между самими компонентами, в работе [1] предложена локальная корреляционная метрика $D_L(k)$, вычисляемая с помощью выражения (большее значение соответствуют более высокому качеству комбинирования и лучшему сохранению информации из исходных каналов)

$$D_L(k) = \frac{r_L(M_C, M_1, k) + r_L(M_C, M_2, k)}{|r_L(M_C, M_1, k) - r_L(M_C, M_2, k)| r_L(M_1, M_2, 0.5)}. \quad (3)$$

В отличие от глобальных корреляционных метрик, локальная корреляционная метрика $D_L(k)$ обеспечивает возможность определения оптимального значения коэффициента k , которое позволяет достичь наилучшего баланса между вкладами исходных изображений в результирующее комбинированное изображение, максимизируя сохранение полезной информации из каждого канала.

Вычислительные возможности одноплатной системы Rockchip AIO-3588MQ для работы с мультиспектральными данными

Платформа Rockchip AIO-3588MQ представляет собой высокопроизводительный одноплатный компьютер, предназначенный для обработки видеопотоков в реальном времени. В рамках данного исследования она была выбрана в качестве аппаратной основы благодаря своей вычислительной универсальности, поддержке различных операционных систем и широким возможностям подключения периферийных устройств.

Архитектура платформы включает набор интерфейсов, обеспечивающих гибкость подключения внешних устройств изображены на рис. 2.

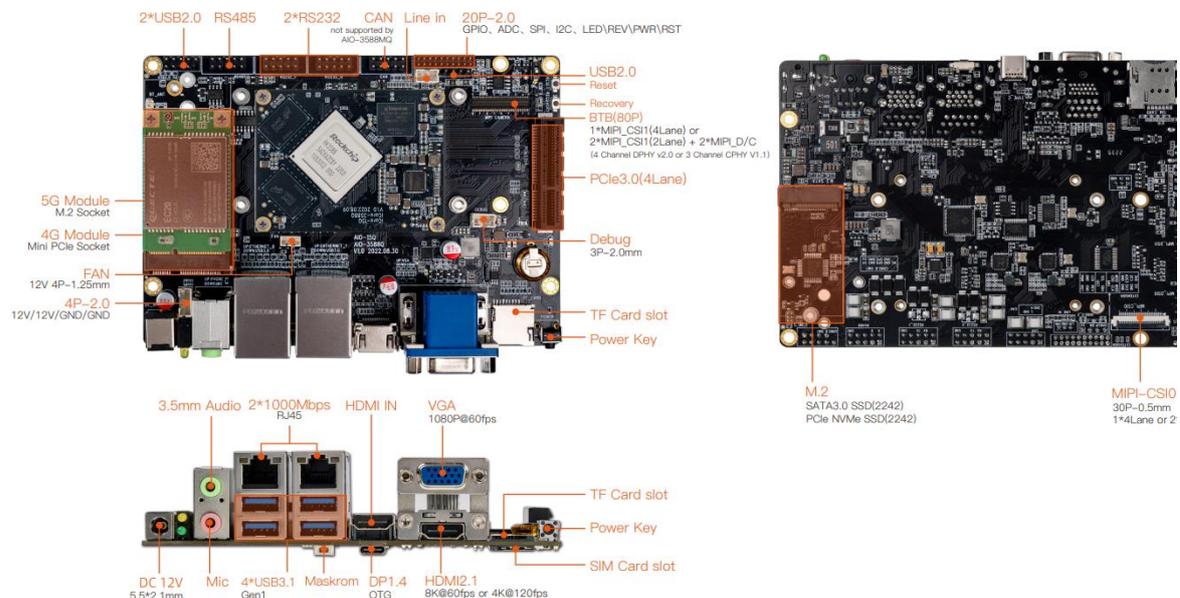


Рис. 2. Интерфейсы Rockchip AIO-3588MQ

Видеовходы и выходы представлены интерфейсом HDMI 2.1 с поддержкой разрешения 8K при 60 кадрах в секунду или 4K при 120 кадрах в секунду, HDMI-IN 2.0 для приема внешних сигналов, а также DisplayPort 1.4 в качестве альтернативного решения для вывода изображения. Для подключения периферийных устройств предусмотрены интерфейсы USB 3.0 OTG и Type-C, а также специализированные MIPI-разъемы. MIPI-CSI предназначен для подключения камер и поддерживает до 4 линий передачи данных со скоростью до 4 Гбит/с на основе стандартов D-PHY или C-PHY. MIPI-DSI обеспечивает высокоскоростную передачу данных для дисплеев с минимальными задержками.

Вычислительная архитектура Rockchip AIO-3588MQ основана на гетерогенной вычислительной системе, интегрирующей центральный процессор, графический ускоритель и нейропроцессор в единую вычислительную платформу. Центральный процессор реализован по гибридной архитектуре ARM DynamIQ big.LITTLE, сочетающей кластер высокой производительности с четырьмя ядрами Cortex-A76, работающими на частоте до 2.4 ГГц с поддержкой одновременной многопоточности, и энергоэффективный кластер из четырех ядер Cortex-A55 с тактовой частотой 1.8 ГГц. Система кэширования включает выделенный L2-кэш объемом 512 КБ для каждого процессорного комплекса и общий L3-кэш объемом 3 МБ, реализующий сквозную модель согласованности между всеми вычислительными ядрами.

Графическая подсистема построена на базе процессора Mali-G610 MP4, использующего микроархитектуру Valhall третьего поколения. Подсистема содержит четыре унифицированных шейдерных ядра с тактовой частотой до 800 МГц и поддерживает современные графические API, включая OpenGL ES 3.2 с расширениями для вычислений в фрагментных шейдерах, Vulkan 1.2 с аппаратной акселерацией трассировки лучей и OpenCL 2.2 с полной поддержкой общей виртуальной памяти. Аппаратный видекодек обеспечивает обработку видеопотоков формата H.265/HEVC Main10 10-bit с разрешением до 8K@60fps, включая поддержку HDR10+ и динамических метаданных Dolby Vision. Применение технологии AFBC (Arm Frame Buffer Compression) версии 1.3 позволяет реализовать адаптивное сжатие с потерями, снижая требования к пропускной способности памяти на 50–70 % для типичных сценариев работы с изображениями.

Нейронный процессор платформы обеспечивает пиковую производительность 6 TOPS при выполнении 8-битных целочисленных операций. Его архитектура включает блок предварительной загрузки весовых коэффициентов с поддержкой работы с разреженными нейронными сетями, матричный вычислительный массив с аппаратной акселерацией операций и модуль постобработки с поддержкой различных активационных функций. Особое внимание уделено поддержке основных фреймворков машинного обучения, включая TensorFlow Lite с оптимизированными операторами для сверточных нейронных сетей, Quantized PyTorch с автоматическим распределением вычислительной нагрузки между CPU и NPU, а также ONNX Runtime с возможностью использования специализированных операторов для задач спектрального анализа. Такая архитектура обеспечивает детерминированное выполнение нейросетевых моделей с задержкой менее 2 мс при обработке мультиспектральных изображений высокого разрешения.

Благодаря сочетанию высокой пропускной способности интерфейсов, параллельных вычислительных ресурсов и аппаратного ускорения ИИ, платформа Rockchip AIO-3588MQ является оптимальным решением для задач формирования комбинированных мультиспектральных изображений в режиме реального времени.

Оптимизация алгоритма локальной корреляции для обработки изображений в реальном времени на платформе AIO-3588MQ

При анализе алгоритма локальной корреляции выделяются ключевые этапы обработки изображений. На начальном этапе реализуется поэлементное умножение пикселей соответствующих изображений, за которым следует суммирование полученных значений в пределах окна корреляции фиксированного размера. Эта вычислительная операция имеет квадратичную сложность $O(N^2)$, где N – линейный размер изображения. Завершающий этап

включает вычисление среднего значения в пределах окна и сохранение результата в результирующую матрицу, что также требует $O(N^2)$ операций.

Производительность алгоритма существенно ограничена несколькими критическими факторами. Архитектура вложенных циклов (по координатам изображения и радиусу окна) обуславливает квадратичную сложность относительно радиуса окна и квадратичную относительно размера изображения, что даёт общую сложность $O(N^2 \cdot r^2)$, где r – радиус окна корреляции. Значительное влияние оказывает неэффективное использование кэш-памяти, вследствие пространственной некогерентности доступа к данным при обработке скользящим окном. При работе с изображениями высокого разрешения пропускная способность подсистемы памяти становится узким местом, ограничивающим скорость доступа к пиксельным данным при их многократном использовании.

С целью преодоления выявленных ограничений реализован комплекс оптимизаций, направленных на повышение утилизации ресурсов процессорной платформы. В частности, рассматривались различные подходы к оптимизации, включая стандартную реализацию на C++ с использованием библиотеки OpenCV, а также оптимизации с применением набора инструкций NEON, библиотеки OpenMP и их комбинации. Сравнение производительности этих подходов представлено в табл. 1.

Табл. 1. Сравнение производительности оптимизаций алгоритма локальной корреляции

Методы	Время обработки, мс	Ускорение, разы
Базовая реализация (CPU)	300	1.0
+ Параллелизм (8 ядер)	120	2.5
+ Векторизация (NEON)	40	7.5

Параллельная обработка достигается посредством декомпозиции входного изображения на независимые горизонтальные полосы, которые распределяются между доступными вычислительными ядрами многоядерного процессора. Реализация, базирующаяся на стандарте OpenMP [3], обеспечивает динамическое распределение нагрузки между ядрами, учитывая их текущую загрузку и архитектурные особенности (тактовую частоту), для достижения оптимального соотношения между производительностью и энергопотреблением.

Дополнительное повышение производительности обеспечивается использованием векторных вычислений на основе набора инструкций NEON, доступного на платформах с архитектурой ARM [4]. Ключевые операции алгоритма переписаны с применением SIMD-примитивов (Single Instruction, Multiple Data), обеспечивающих параллельную обработку до четырех пикселей за одну инструкцию. В частности, инструкции VMULL.u8 (умножение с накоплением для 8-битных беззнаковых целых) и VPADD.s32 (горизонтальное суммирование для 32-битных целых) позволяют существенно ускорить базовые вычислительные операции корреляции. Оптимизация доступа к памяти включает применение механизмов предвыборки данных и организацию последовательного чтения данных, что снижает задержки и максимизирует эффективность кэш-памяти при работе с большими массивами изображений. Как видно из таблицы, комбинированная оптимизация NEON + OpenMP демонстрирует наилучшие показатели производительности, однако выбор оптимального подхода определяется конкретными требованиями к проекту и доступными ресурсами, включая квалификацию разработчиков и целевую платформу. В результате применения оптимизаций достигнуто семикратное увеличение производительности по сравнению с исходной, скалярной реализацией алгоритма.

Дальнейшее повышение эффективности алгоритма локальной корреляции требует комплексного подхода, учитывающего архитектурные особенности современных процессоров и специфику обработки изображений. Проведенные исследования демонстрируют значительный потенциал оптимизации, однако существуют дополнительные возможности для улучшения производительности.

Особого внимания заслуживает анализ поведения алгоритма при различных параметрах обработки. Экспериментальные данные показывают нелинейную зависимость времени выполнения от размера окна корреляции. При малых радиусах окна (менее 16 пикселей)

доминирующим фактором становятся накладные расходы на организацию параллельной обработки, тогда как для больших окон основным ограничением выступает пропускная способность памяти. Это обуславливает необходимость адаптивного выбора стратегии оптимизации в зависимости от рабочих параметров алгоритма.

Перспективным направлением развития является создание гибридной реализации, сочетающей преимущества различных подходов. Для малых окон оптимальной оказывается векторная обработка с использованием NEON-инструкций, в то время как средний диапазон размеров окна наиболее эффективно обрабатывается при параллельном выполнении на нескольких ядрах. Большие окна требуют принципиально иного подхода с применением частотных методов обработки, что открывает новые возможности для оптимизации.

Дополнительный резерв производительности кроется в оптимизации работы с памятью. Практические измерения показывают, что организация данных по принципу SOA (Structure of Arrays) обеспечивает прирост производительности на 12–15 % по сравнению с традиционным подходом AOS [5]. Использование 64-байтового выравнивания для векторных операций становится критически важным для полного раскрытия потенциала SIMD-инструкций, а предварительная загрузка данных в кэш позволяет сократить время выполнения на 15–20 %.

Критически важным аспектом в контексте агрессивной оптимизации алгоритмов обработки изображений является сохранение приемлемой точности вычислений. Проведенный сравнительный анализ показал, что использование 16-битных целочисленных представлений данных с аккумуляцией промежуточных результатов в 32-битных регистрах обеспечивает достаточную точность для широкого спектра приложений, при этом агрессивная оптимизация оказывает незначительное влияние на конечную точность. Для задач, требующих повышенной точности, необходимо применение 32-битных вычислений с плавающей точкой. Применение аппроксимационных методов, при условии сохранения допустимой погрешности в диапазоне 2–3 %, позволяет достичь небольшого дополнительного ускорения.

Перспективные направления развития включают интеграцию с специализированными аппаратными ускорителями, такими как GPU (Graphics Processing Units) и NPU (Neural Processing Units), разработку адаптивных алгоритмов, реализующих автоматическую конфигурацию параметров обработки в зависимости от характеристик входных данных и целевой платформы, создание специализированных расширений набора инструкций для процессоров ARM и применение методов машинного обучения для предиктивного выбора оптимальных стратегий обработки. Реализация указанных подходов позволит приблизиться к достижению производительности, необходимой для обработки видео в режиме реального времени для изображений высокого разрешения, даже на платформах с ограниченными вычислительными ресурсами, что откроет новые возможности для разработки и внедрения мобильных и встраиваемых систем компьютерного зрения.

Заключение

В результате проведенного исследования разработан оптимизированный алгоритм локальной корреляции, предназначенный для эффективной работы на платформе AIO-3588MQ. Применение комплекса современных техник оптимизации, включая использование SIMD-инструкций NEON, распараллеливание посредством API OpenMP и усовершенствованные методы управления памятью, позволило достичь значительного семикратного ускорения обработки данных по сравнению с исходной, последовательной реализацией.

Ключевым результатом является успешная адаптация алгоритма к архитектуре Rockchip RK3588, что позволило максимально эффективно использовать доступные вычислительные ресурсы. Разработанная гибридная вычислительная схема обеспечивает динамическую адаптацию к изменяющимся условиям обработки за счет выбора оптимальной стратегии, в зависимости от размера окна корреляции.

Практическая значимость разработки заключается в значительном повышении скорости обработки изображений и видео на встраиваемых системах. Это открывает перспективы для использования в широком спектре приложений, таких как системы машинного зрения, автономная навигация и обработка мультимедийных данных на мобильных устройствах.

FORMATION OF COMBINED MULTISPECTRAL IMAGES BASED ON A SINGLE-BOARD COMPUTER

I.I. LIAVONENKA, A.D. ROBACHEVSKIY, M.YU. LAVETSKI, E.G. MAKEICHIK

Abstract. This paper investigates the computational efficiency of a local correlation algorithm for image processing tasks on the AIO-3588MQ single-board computer. A comparative performance analysis of different algorithm implementations was conducted, specifically adapted to the architectural features of the Rockchip RK3588 processor, to identify optimal acceleration and optimization strategies.

Keywords: embedded computing system, image combination quality assessment, image correlation, weighted image summation.

Список литературы

1. Gao Y., Gu L., Liu Q., Fu Y. // Computer Vision – ECCV 2024. Lecture Notes in Computer Science. 2024. Vol. 15081. P. 6.
2. Ловецкий М.Ю. [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 78–86.
3. Mattson T.G., He Y., Koniges A.E. The OpenMP Common Core: Making OpenMP Simple Again. Cambridge, MIT Press, 2019.
4. Hohl W., Hinds C. ARM Assembly Language: Fundamentals and Techniques. 2nd ed. Boca Raton, CRC Press, 2015.
5. Carlson T.E. // Handbook of Computer Architecture / Ed. by Chattopadhyay A. Singapore, 2025. Ch. 68.

УДК 004.4'277+78.06

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АУДИОКОДЕКОВ НА КАЧЕСТВО ЗВУЧАНИЯ СТРИМИНГОВЫХ ПЛАТФОРМ

А.Д. ВАСЮТИЧ^{1,2}, Н.С. ДАВЫДОВА¹

1 – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь,
2 – ОАО «Пеленг», Республика Беларусь

Поступила в редакцию 3 апреля 2025

Аннотация. В работе представлены оптимальные решения по выбору аудиокодеков для стриминговых платформ, обеспечивающие баланс между качеством звучания и размером файла. Экспериментально подтверждена зависимость характеристик аудиосигнала от типа используемого кодека.

Ключевые слова: кодек аудио без потерь, кодек аудио с потерями, частота дискретизации, битовая разрядность, стриминговые сервисы, АЧХ.

Введение

Рост популярности медиаконтента в современном мире привел к развитию стриминговых платформ, которые позволяют пользователям получать доступ к разнообразным медиаресурсам посредством мультисервисных сетей. Отличительными особенностями стриминговых платформ являются потоковое вещание, интерактивность и адаптивность, что делает их удобными и востребованными сетевыми сервисами [1].

Качество и производительность потокового медиа зависит от параметров мультисервисной сети и, в первую очередь, от средней пропускной способности. Для уменьшения последствий задержек и изменений пропускной способности сети применяют различные методы, такие как буферизация данных на клиентской стороне, предварительная загрузка данных и адаптивное изменение качества медиа в зависимости от пропускных возможностей канала [2].

Наиболее эффективной технологией является DASH. Dynamic Adaptive Streaming over HTTP – технология адаптивной потоковой передачи данных по HTTP, которая позволяет клиентам с разным качеством сетевого соединения потреблять медиаконтент с разной шириной потока. То есть DASH динамически подстраивает качество медиа в реальном времени в зависимости от условий сети и возможностей устройства пользователя. Это возможно благодаря тому, что все медиафайлы на стриминговой платформе имеют несколько версий с разной шириной потока (битрейта) и, соответственно, с разным качеством [3].

Получение нескольких версий одного и того же медиафайла с несколькими уровнями качества возможно с помощью алгоритмов сжатия посредством аудио- и видеокодеков. При этом цифровые аудиоданные имеют более низкие требования к пропускной способности сети, чем видеоданные. И несмотря на то, что по сравнению с видеоданными звуковые файлы имеют значительно меньший размер, пользователи в целом более чувствительны именно к аудиопомехам.

Целью представленной работы является исследование влияния аудиокодеков на качество звучания стриминговых платформ.

Методология

Кодеки аудио – это алгоритмы сжатия аудиоданных. Их можно разделить на два основных типа: с потерями (loosy) и без потерь (lossless). Форматы с потерями вырезают из исходного трека

звуковые данные, которые по мнению алгоритмов человеческого уха не заметит. При этом размер итогового файла получается относительно небольшим, однако теряется некоторая частотная информация, особенно на высоких частотах, что в свою очередь влияет на детальность звучания. Среди наиболее часто используемых кодеков аудио с потерями можно выделить такие, как MP3, AAC, OGG [4]. В настоящее время одним из самых популярных среди них является MP3, однако его постепенно заменяет AAC. В случае, если качество звучания стоит на первом месте, выбор отдается форматам без потерь. Они идеальны для прослушивания музыки на высококачественной аудиотехнике и хорошо подходят для хранения аудиофайлов студийного качества. В качестве примера можно привести такие кодеки аудио без потерь, как WAV, AIFF, FLAC. При экспорте музыкального трека из проекта в кодек аудио без потерь, например, FLAC, можно также выбирать и степень сжатия. Она будет напрямую влиять на качество звучания полученного файла. Чем меньше степень сжатия, тем более качественное звучание будет получено. На рис. 1 и рис. 2 представлены графики АЧХ одного и того же музыкального трека с использованием разных аудиокодеков.

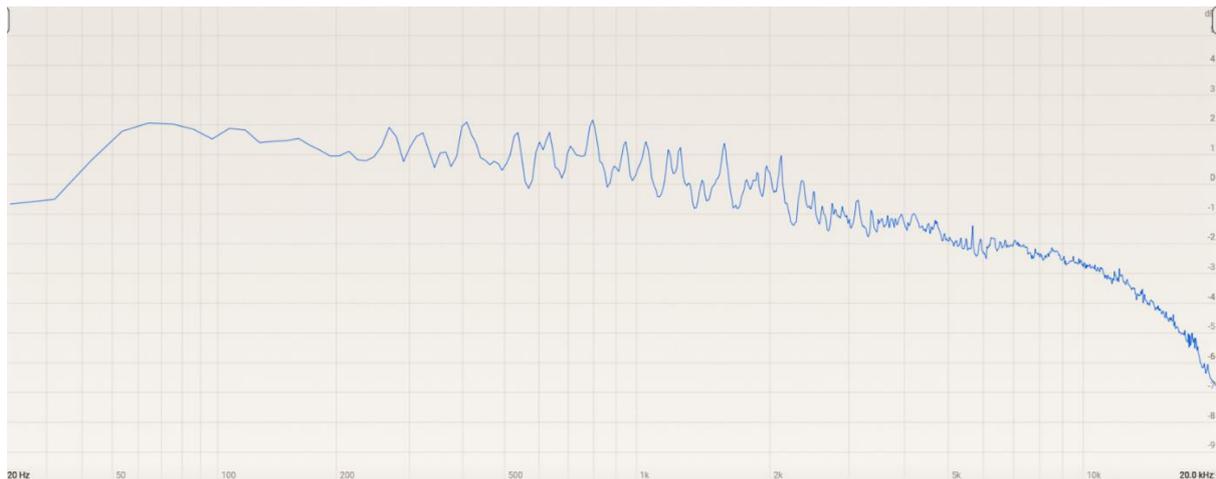


Рис. 2. График АЧХ музыкального трека с использованием кодека аудио без потерь (lossless) WAV 44,1 кГц, 24 бит



Рис. 2. График АЧХ музыкального трека с использованием кодека аудио с потерями (loosy) MP3 44,1 кГц, 128 kbps

Из полученных графиков АЧХ видно, что при использовании кодека аудио без потерь частотный диапазон (20 Гц – 20 кГц), в том числе и на верхних частотах, сохраняется. Кодек аудио с потерями приводит к обрезанию частот, находящихся выше 16 кГц и вносит некоторые искажения в исходный сигнал. На рис. 3 представлен график АЧХ, показывающий различие в спектрах между кодеком аудио без потерь и с потерями (серым цветом). Наиболее явные отличия находятся в области высоких частот (около 16 – 20 кГц).

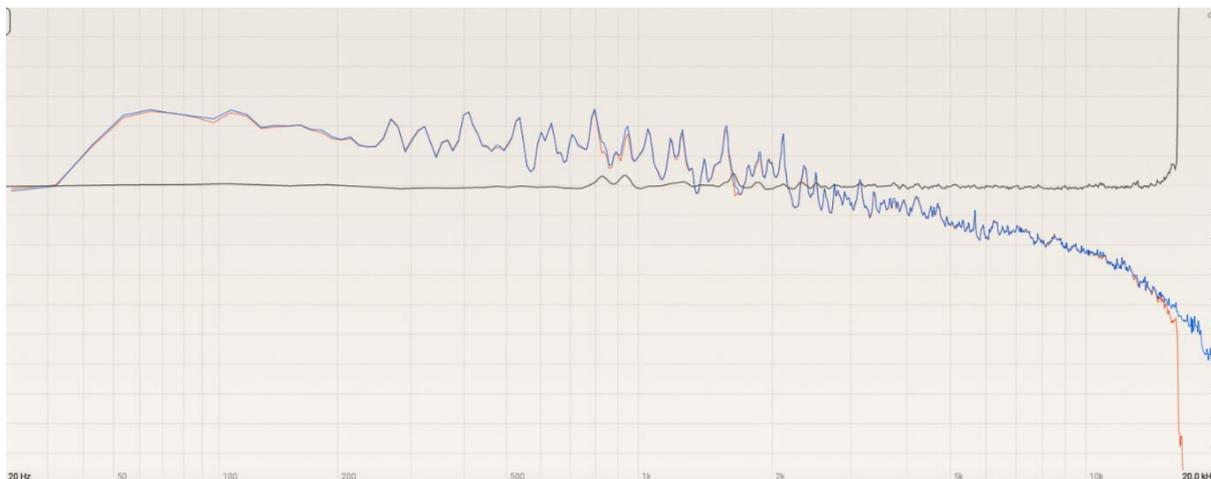


Рис. 3. Разность спектров WAV и MP3

Факторы, влияющие на качество аудио

Частота дискретизации звукового сигнала определяет количество выборок данных в единицу времени, взятых из непрерывного сигнала для последующей оцифровки и хранения в памяти [5]. Человеческое ухо способно слышать звуки в частотном диапазоне примерно от 20 Гц до 20 кГц. Согласно теореме Котельникова-Найквиста, для точного воспроизведения звука частота дискретизации должна быть как минимум в два раза больше максимальной частоты в сигнале. Учитывая диапазон частот, которые может услышать человек, и данную теорему, получаем, что минимальная частота дискретизации должна быть 40 кГц. В настоящее время в студийных записях используются следующие частоты дискретизации: 44,1 кГц; 48 кГц; 88 кГц; 96 кГц; 192 кГц. Поэтому минимальной частотой дискретизации для полной передачи качества звучания трека является 44,1 кГц. Стандарт CD использует данную частоту дискретизации [6]. Более высокие значения частоты дискретизации в основном используются в профессиональных условиях при студийной записи, сведении и мастеринге. Это связано с тем, что они улучшают качество передачи быстрых переходных процессов в треке (транзиентной составляющей), таких как атака барабанов, щелчок медиатора по гитарной струне, нажатие на клавишу пианино. Также улучшается точность в слышимом диапазоне за счет уменьшения алиасинга (искажений).

Битовая разрядность (bit depth) влияет на динамический диапазон музыкального трека – разность между самым тихим и самым громким звуком в треке [5]. Стандарт CD использует битовую разрядность, равную 16 битам, что обеспечивает динамический диапазон равный 96 дБ [5]. Данного значения динамического диапазона достаточно для большинства аудиозаписей. Однако в студийных условиях, особенно при сведении, чаще всего используется значение, равное 24 или даже 32 бит. Данные значения снижают шум квантования аудиосигнала и позволяют работать с более тонкими нюансами, например, с тихими пассажами в классической музыке.

Инструментарий и сбор данных

Выбор аудиокодеков для исследования обоснован целевой аудиторией стриминговых платформ. Стриминговыми платформами могут пользоваться как обычные пользователи с низкокачественными устройствами воспроизведения аудио, так и продвинутые пользователи с высококачественной звуковой аппаратурой и развитым профессиональным слухом. Соответственно, от данного выбора будут зависеть и используемые в сервисе кодеки аудио. Стоит сразу отметить, что в большинстве случаев нет никакого смысла использовать высококачественные кодеки аудио без потерь, если исходный трек был экспортирован в формат с потерями, плохо сведен и нет возможности переэкспортировать его из оригинального проекта в формат без потерь. Также бессмысленно перекодировать аудиофайл с использованием кодека с частотой дискретизации или битовой разрядностью большей, чем в нем сейчас используется, так как невозможно добавить в него то, чего уже нет. Соответственно, при такой

переконвертации мы получим такое же качество звучания, которое и было, но вес файла увеличится, что будет означать нежелательное использование памяти.

Если пользователи сервиса слушают треки в наушниках среднего ценового класса, через встроенные динамики смартфона или ноутбука, через Bluetooth-колонку, то нет смысла использовать кодеки аудио без потерь, так как разница будет неощутима, однако сам звуковой файл будет занимать намного больше места.

Если же пользователи будут использовать высококачественные наушники, динамики, качественные цифро-аналоговые преобразователи и обладать натренированным профессиональным слухом, то форматы без потерь раскроют весь потенциал аудиозаписей. С высокими значениями частоты дискретизации и битовой разрядности, хорошо сведенными исходниками профессионально созданный трек в формате без потерь сохранит даже такие нюансы, как дыхание вокалиста и реверберацию комнаты, в которой он записывался.

Для исследования использовались профессиональный аудиointерфейс с максимальной частотой дискретизации 96 кГц и битовой разрядностью 24 бит, профессиональные студийные наушники с сопротивлением 250 Ом, чувствительностью 102 дБ/мВт и частотным диапазоном 5 Гц – 40 кГц, проект в цифровой рабочей станции с профессионально сведенным треком.

Целью работы было определение оптимального кодека аудио с минимальным размером файла, но приемлемым качеством звучания. В ходе эксперимента слушателем с развитым профессиональным слухом оценивалось качество звучания трека с использованием разных аудиокодеков. Для оценки использовались как количественные, так и качественные критерии оценки качества звука.

Количественные критерии:

1. Сохранность АЧХ оценивалась через сравнение спектров исходного и сжатого аудио с помощью программного спектрального анализатора. Из спектра исходного файла вычитался спектр сжатого аудио. Результат вычитания – разностный спектр, который визуализирует отклонения, вызванные сжатием. На графике разностного спектра фиксировалось максимальное значение отклонения (Δ , дБ) в пределах всего частотного диапазона (20 Гц – 20 кГц). Например, если на частоте 10 кГц разница между исходным и сжатым сигналом составила 2,5 дБ, а на 15 кГц 4 дБ, максимальной дельтой было 4 дБ. Чем меньше максимальная дельта, тем выше сохранность АЧХ. На основе этого значения применялась 5-балльная шкала, которая представлена в табл. 1.

Табл. 1. Шкала оценки сохранности АЧХ

Оценка	Максимальная дельта (разность спектров)	Интерпретация
5	≤ 0.5 дБ	Идеальная сохранность АЧХ. Отличия от оригинала отсутствуют.
4	0.6 – 1 дБ	Минимальные искажения. Потери заметны только при детальном анализе.
3	1.1 – 3 дБ	Умеренные искажения. Приемлемо для непрофессионального использования.
2	3.1 – 6 дБ	Значительные потери. Ухудшение качества, особенно в высоких частотах.
1	> 6 дБ	Неприемлемые искажения. Частотный диапазон обрезан или искажен.

2. Размер файла соответствовал размеру полученного выходного файла при экспорте музыкального трека из проекта цифровой рабочей станции.

Качественные критерии:

1. Проведено слепое тестирование с использованием цифровой рабочей станции, в ходе которого оценивался трек с разными аудиокодеками. Оценка слушателя по 10-балльной шкале:

- 1) 9, 10 – неотлично от оригинала (артефакты отсутствуют).
- 2) 6–8 – приемлемо (минимальные искажения).
- 3) ≤ 5 – неприемлемо (заметные артефакты, шумы).

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования представлены в табл. 2 и 3. Условием работы был поиск кодека аудио с приемлемым качеством звучания, но минимальным размером, поэтому использовалась частота дискретизации 44,1 кГц. Итоговые результаты были разделены на две таблицы. В табл. 2 представлены результаты эксперимента с использованием кодеков аудио без потерь.

Табл. 2. Сравнение кодеков аудио без потерь

Кодек	Частота дискретизации	Битовая разрядность	Размер файла	Оценка сохранности АЧХ	Оценка звучания слушателем
WAV	44,1 кГц	64 бит Float	127 МБ	5	10
WAV	44,1 кГц	32 бит Float	63,5 МБ	5	10
WAV	44,1 кГц	24 бит	47,6 МБ	5	10
WAV	44,1 кГц	16 бит	31,8 МБ	4	9
WAV	44,1 кГц	8 бит	15,9 МБ	2	6
AIFF	44,1 кГц	32 бит Float	63,5 МБ	5	10
AIFF	44,1 кГц	24 бит	47,6 МБ	5	10
AIFF	44,1 кГц	16 бит	31,8 МБ	4	9
AIFF	44,1 кГц	8 бит	15,9 МБ	2	6
FLAC	44,1 кГц	32 бит	50,3 МБ	5	10
FLAC	44,1 кГц	24 бит	34,5 МБ	4	10
FLAC	44,1 кГц	16 бит	18,9 МБ	4	8
ALAC	44,1 кГц	24 бит	35,2 МБ	4	10
ALAC	44,1 кГц	16 бит	19,3 МБ	4	9

В табл. 3 представлены результаты эксперимента с использованием кодеков аудио с потерями.

Табл. 3. Сравнение кодеков аудио с потерями

Кодек	Частота дискретизации	Битовая разрядность	Размер файла	Оценка сохранности АЧХ	Оценка звучания слушателем
MP3	44,1 кГц	320 kbps	7,2 МБ	4	7
MP3	44,1 кГц	256 kbps	5,8 МБ	1	6
MP3	44,1 кГц	192 kbps	4,3 МБ	1	5
MP3	44,1 кГц	128 kbps	2,9 МБ	1	3
MP3	44,1 кГц	64 kbps	1,4 МБ	1	1
AAC	44,1 кГц	256 kbps	5,7 МБ	4	7
AAC	44,1 кГц	224 kbps	5 МБ	4	6
AAC	44,1 кГц	192 kbps	4,3 МБ	1	5
AAC	44,1 кГц	160 kbps	3,6 МБ	1	3
AAC	44,1 кГц	128 kbps	2,9 МБ	1	3
AAC	44,1 кГц	96 kbps	2,2 МБ	1	2
OGG	44,1 кГц	Variable	5,4 МБ	4	5

Анализ полученных данных показывает, что среди кодеков аудио без потерь оптимальным вариантом с приемлемым качеством, но минимальным размером файла, будет кодек FLAC или ALAC с частотой дискретизации 44,1 кГц и битовой разрядностью 16 бит. Наилучшим по качеству вариантом будет использование кодека WAV или AIFF. Однако, как уже было упомянуто ранее, чем больше частота дискретизации и битовая разрядность, меньше степень сжатия, тем более качественное звучание будет получено на профессиональных устройствах воспроизведения. При этом следует отметить, что треки должны быть изначально отличного качества и экспортированы из проекта в формат без потерь. Если же сервис ориентирован на обычных пользователей, не использующих высококачественные устройства воспроизведения, то оптимальным вариантом будет кодек MP3 или AAC с частотой дискретизации 44,1 кГц и битрейтом 256 или 320 кбит/с. В современных сервисах можно использовать и оба варианта

кодеков. В таком случае для продвинутых пользователей можно предложить формат без потерь, а для всех остальных – формат с потерями. Данный вариант разделения используется в некоторых стриминговых сервисах: платная подписка позволяет слушать музыкальные треки в формате без потерь.

Заключение

Результаты проведенных исследований показали, что для аудио без потерь оптимальным выбором являются кодеки FLAC и ALAC (16 бит; 44,1 кГц), обеспечивающие малый размер файла (18,9 МБ; 19,3 МБ) при оценке сохранности АЧХ в 4 балла и оценке качества звучания в 8, 9 баллов. Для пользователей с высокими требованиями к качеству звучания рекомендованы WAV/AIFF (24, 32 бит), несмотря на увеличенный размер (47,6 МБ; 63,5 МБ). Среди кодеков с потерями лучшие результаты продемонстрировали MP3 (320 kbps) и AAC (256 kbps) с оценкой сохранности АЧХ в 4 балла и размером 7,2 МБ; 5,7 МБ.

Полученные данные могут быть использованы стриминговыми сервисами для гибкой настройки аудиопотоков: предоставление lossless-форматов (FLAC/ALAC) пользователям с профессиональным оборудованием и lossy-форматов (MP3/AAC) – основной аудитории. Это позволит сократить затраты на хранение и передачу данных без значимого ухудшения качества звучания в целевых сегментах. Внедрение многоуровневой системы (например, платной подписки для lossless форматов) повысит удовлетворенность пользователей и оптимизирует ресурсы платформы.

STUDY OF THE IMPACT OF AUDIO CODECS ON THE SOUND QUALITY OF STREAMING PLATFORMS

A.D. VASIUTICH, N.S. DAVYDOVA

Abstract. The paper presents optimal solutions for choosing audio codecs for streaming platforms, providing a balance between sound quality and file size. The dependence of audio signal characteristics on the type of codec used is experimentally confirmed.

Keywords: lossless audio codec, lossy audio codec, sampling rate, bit rate, streaming services, AFC.

Список литературы

1. Arditi D. Streaming culture: Subscription platforms and the unending consumption of culture. – Emerald Publishing Limited, 2021.
2. Куроуз Д., Росс К. Компьютерные сети. Нисходящий подход. – Litres, 2022.
3. Michalos M. G., Kessanidis S. P., Nalmpantis S. L. Dynamic Adaptive Streaming over HTTP // Journal of Engineering Science & Technology Review. – 2012. – Т. 5. – №. 2.
4. Bosi M., Goldberg R.E. Introduction to Digital Audio Coding and Standards. Springer, 2003.
5. Райков В. Цифровая обработка сигналов: теория и практика. М.: Энергия, 2005.
6. Watkinson J. The Art of Digital Audio. Focal Press, 2013.

УДК 517.18.(075.8)

ЗАЩИТА ОТ ПОМЕХ В КВАНТОВО-КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ КАНАЛАХ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ МЕТОДИК РАСЧЕТА ПРОСТРАНСТВ И МАССЫ ВОДОРОДОПОДОБНЫХ АТОМОВ

И.П. КОБЯК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь**Поступила в редакцию февраля 2024*

Аннотация. В представляемой работе рассмотрены параметры водородоподобных атомов с точки зрения релятивистского взаимодействия ядра с энергетикой струн. Выполнены исследования принципов преобразования массы электрона и ядра на скоростях вращения до и выше скорости света. Полученные зависимости сформированы с учетом представления параметров атомов с использованием комплексной плоскости или пространства, а также с учетом методов формирования соотношений для данных пространств. Кроме того, получены единицы измерения для энергии электрона, определяемые как «Франклин» с представлением их в системе СГСМ. Показано, что сверхвысокая точность представления параметров в расчетах ведет к прецизионным результатам в подсистемах квантовых каналов связи, отвечающих за стабильность и практическую надежность проектируемых схем.

Ключевые слова: водородоподобный атом, комплексное пространство, ядро атома, энергетика струн, релятивизм электрона, Лоренц-фактор, черная материя.

Введение

Природа существования материи и энергообмена в макром мире неразрывно связана с процессами взаимодействия частиц микромира и плазмы в различных пространственных измерениях. При этом, чем точнее формальное представление моделей параметров и их физико-математическая системность, тем стабильнее оказываются проекты атомарных наносхем и выше их практическая надежность.

Базовым элементом для исследования структуры атомов и энергетических процессов в них, как правило, служит организация материи водородоподобных систем с одним электроном и ядром внутри атомной оболочки. Кажущаяся простота такой модели однозначно приводит к мысли о законченности научных направлений в данной области. Однако, более детальный анализ известных параметров, а также формальных зависимостей в задачах взаимодействия поля ядра и электрона указывает на отсутствие системности в результатах компьютерных исследований, а, следовательно, и в практических испытаниях [1,2].

Ограниченность взглядов на механизмы взаимодействия частиц внутри водородоподобных атомов, как правило, связана с концепцией классического представления электронов и ядер с точки зрения элементов пространства третьего измерения. Это не позволяет получить достоверные соотношения для пространств атома и соответствующих компонентов $\pm Re$ и $\pm Im$ пространственного энергообмена.

Наиболее общие зависимости в области квантовой механики и электроники, с учетом современных достижений теории, могут быть получены при представлении параметров атомов с использованием комплексной плоскости или пространства и методов формирования соотношений для данных пространств. Такой подход позволяет достаточно точно установить природу перехода материи из одного измерения в другое, а также получить численные значения параметров, характеризующих компоненты атома. Соответственно, в представляемой работе рассматривается классический атом водорода с точки зрения релятивизма материи и

взаимодействия полей внутри атома, а также свойств ядра как объекта энергообмена с энергетикой струн [3].

Принцип образования релятивистского боровского радиуса атома водорода

Рассмотрим принцип образования первого $\tau=1$ релятивистского радиуса $\vec{r}_0^{\tau=1}$ боровской орбиты с учетом Лоренц-фактора для составляющих формулы вида:

$$\vec{r}_{0,L} = \frac{\hbar^2}{\vec{m}_0 e}, \quad (1)$$

где индекс L - учитывает наличие в практически полученном результате (1) поправки Лоренца, а векторность массы покоя определяет природа существования позитрона и его энергетика.

Очевидно, что для сохранения численного результата в равенстве (1), единицы измерения заряда электрона должны быть представлены в виде [4]:

$$[e] = \left[\frac{e \cdot \text{см}^3}{c^2} \right] = [\text{Франклин}]. \quad (2)$$

Здесь и далее изменение параметров в новых соотношениях будем выполнять с использованием соответствующих единиц измерения в системе СГСМ.

Итак, на первом этапе расчетов констатируем факт, что скорость движения электрона по радиусу $\vec{r}_{0,L}$ создает собственную материальную копию шестого измерения в комплексном пространстве, не изменяя массы покоя \vec{m}_0 . Данное обстоятельство вытекает из следующих рассуждений.

Радиус-вектор вращения копии электрона может быть рассчитан с использованием релятивистских поправок к формуле (1), что приводит к функции вида:

$$\vec{r}_0^{\tau=1} = \frac{\hbar^2}{\vec{m}_0 (\gamma_{0,L} - 1) e}, \quad (3)$$

где $\gamma_{0,L}$ - Лоренц-фактор боровского радиуса $\vec{r}_{0,L}$ при вычисленной скорости движения массы электрона $\vec{v}_{0,L} = 95,4824 \text{ м.км/с}$ [4], при этом $\Delta \vec{m}_0 = \vec{m}_0 (\gamma_{0,L} - 1)$ - приращение массы электрона, переносимая на уровень $\tau=1$.

Следствием соотношения (2) является факт отсутствия релятивистских поправок в (3) у отношения $\hbar^2 e^{-1}$ так как: $[\hbar^2 e^{-1}] = [e \cdot \text{см}]$.

Таким образом, в знаменателе соотношения для радиуса $\vec{r}_{0,L}$ будем использовать только поправку Лоренца $\beta_{0,L}$ для массы покоя электрона \vec{m}_0 .

Знак плюс в соотношении (3) говорит о том, что радиус-вектор нового параметра принадлежит комплексному пространству радиуса $\vec{r}_{0,L}$ со скоростью движения материи совпадающей по направлению со скоростью объектов третьего измерения. Однако приведенный результат не учитывает поправки Лоренца для параметров, изменяющих скорость движения объектов по орбитам атома. В связи с этим, определим значение угловой частоты электрона на радиусе $\vec{r}_{0,L}$ текущего пространства по формуле:

$$\omega_{0,L} = \frac{\vec{v}_{0,L}}{2\pi \vec{r}_{0,L}}. \quad (4)$$

Учитывая теперь, что данное значение определено на основании косвенно измеренной скорости $\vec{v}_{0,L}$ [4], а угловая частота вращения релятивистской копии $\omega_0^{\tau=1} = \omega_{0,L} \beta_{0,L}$, линейная

псевдо скорость первой релятивистской орбиты, для линейной скорости борковского радиуса $\vec{v}_{0,l}$, определяется формулой:

$$\vec{v}_{0,l}^{\tau=1} = \pi\sqrt{2} \cdot \vec{r}_0^{\tau=1} \omega_0^{\tau=1}$$

или

$$\vec{v}_{0,l}^{\tau=1} = \vec{v}_{0,l} \frac{\beta_{0,L}^2}{1 - \beta_{0,L}}, \quad (5)$$

при этом разница в двух полученных значениях определяется только точностью представления в расчетах поправки $\beta_{0,L}$, а также других параметров скорости. Кроме того, если параметр $\vec{v}_{0,l}^{\tau=1}$ превышает скорость света, то над соответствующим обозначением ставим знак \leftrightarrow , что означает шаровую поверхность плазмы, движущейся со скоростью выше скорости света.

Соответственно, релятивистская поправка для орбиты электрона $\vec{r}_0^{\tau=1}$ с учетом скорости (5) будет иметь мнимое значение:

$$j\beta_0^{\tau=1} = \sqrt{1 - \frac{(\vec{v}_{0,l}^{\tau=1} \sqrt{2})^2}{c^2}}.$$

Таким образом, радиус $\vec{r}_{0,L}^{\tau=1}$ с учетом поправки $\beta_0^{\tau=1}$ к радиусу (1) определится формулой:

$$j\vec{r}_{0,L}^{\tau=1} = \vec{r}_{0,L} \beta_0^{\tau=1}.$$

Вычислим теперь массу электроннои копии на первой релятивистской орбите с учетом формулы для скорости радиуса $\vec{r}_{0,L}$ и соотношения для поправки $\beta_0^{\tau=1}$. При этом имеем:

$$-j\vec{m}_{0,L}^{\tau=1} = \vec{m}_0 \frac{1 - \beta_{0,L}}{\beta_{0,L} \beta_0^{\tau=1}}. \quad (6)$$

Иными словами при величине массы третьего измерения $\Delta\vec{m}_0$, переносимой на уровень $\tau = 1$, определяемой из знаменателя формулы (1), в соответствии с соотношением (6) на скорости (5) получаем переход массы в шестое измерение пространства $-Im$ или массу позитронного типа:

$$-j\vec{m}_{0,L}^{\tau=1} = \frac{\Delta\vec{m}_0}{\beta_0^{\tau=1}}, \quad (7)$$

что и требовалось доказать.

Далее, скорость орбиты $j\vec{r}_{0,L}^{\tau=1}$ с учетом (4) будет равна:

$$-\vec{v}_{0,L}^{\tau=1} = 2\pi(j\vec{r}_{0,L}^{\tau=1})(j\omega_{0,L}^{\tau=1}).$$

Тогда энергия, поглощаемая электроннои копией на первой релятивистской орбите, может быть определена стандартным соотношением на основании вышеуказанной скорости $-\vec{v}_{0,L}^{\tau=1}$ и массы (7):

$$-j\vec{E}^{\tau=1} = \frac{(-j\vec{m}_{0,L}^{\tau=1})(-\vec{v}_{0,L}^{\tau=1})^2}{2} + \vec{J} \frac{(j\omega_{0,L}^{\tau=1})^2}{2}, \quad (8)$$

где параметр \vec{J} определяется одним из классических соотношений:

$$j\vec{J} = \frac{2}{5}(-j\vec{m}_{0,L}^{\tau=1})(j\vec{r}_{0,L}^{\tau=1})^2.$$

Из приведенной выше формулы (8), имеем энергетическую релятивистскую копию электрона, определяемую через первоначальные параметры нулевого радиуса, равную:

$$-j\vec{E}^{\tau=1} = \frac{1-\beta_{0,L}}{\beta_{0,L}} (\beta_0^{\tau=1})^3 \frac{\bar{m}_0 \bar{v}_{0,L}^2}{2} \left(\frac{10\pi^2 - 1}{10\pi^2} \right).$$

Итак, результат (8) указывает на поглощение релятивистской массой электрона энергии ведущей частицы в пространстве $-Im$ (то есть формируется шар «черной» материи мнимого пространства или объект позитронного типа).

Масса ядра атома водорода с учетом скорости струн

Анализ физики взаимодействия объектов и полей нано мира позволяет заключить, что внутреннее пространство атома водорода обладает следующей квазистандартной динамикой собственного существования.

Вращение ядерной оболочки со скоростью близкой к скорости света порождается поглощением внешней энергии струн и сжатием радиуса ядра \vec{r}_s до некоторого критического значения $\vec{r}_{s,c}$. На данном радиусе скорость массы ядра становится равной $\vec{v}_{s,c} = \vec{c} - \Delta_1 \vec{c}$ (где $\Delta_1 \vec{c}$ - бесконечно малая), что фактически и приводит к формированию самого радиуса $\vec{r}_{s,c}$.

При скорости пятого измерения $-\vec{v}_s = -\vec{c} - \Delta_2 \vec{c}$ выполняется переход радиуса ядра в мнимое отрицательное пространство $-Im$ ортогональное пространству $+Re$ критической сферы ядра $\vec{r}_s \rightarrow -j\vec{r}_s$. При увеличении скорости вращения ядра до значения $-\vec{v}_s = -\vec{c}\sqrt{2} + \Delta_3 \vec{c}$ выполняется преобразование пространств вида $-j\vec{r}_s \rightarrow -j\vec{r}_{0,L}(1-\psi)$.

Рассмотрим теперь массу ядра при указанной скорости вращения оболочки равной $-\vec{v}_s = -\vec{c}\sqrt{2} + \Delta_3 \vec{c}$. При этом считаем, что

$$\bar{m}_s = \frac{m_{s,0}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\vec{v}_s}{\vec{c}}\right)^2}}. \quad (9)$$

где $m_{s,0}$ - масса покоя ядра, при этом: $\bar{m}_s = m_{s,0}\gamma_s$.

Масса покоя ядра, может быть определена по следующей технологии. Очевидно, что:

$$\bar{m}_{s,0} = \bar{m}_s \beta_s(\vec{v}_s), \quad (10)$$

где \bar{m}_s - это практически измеренное стандартное значение. Таким образом, при $\beta_s(\vec{v}_s) = \gamma_s^{-1}$ с учетом простых преобразований имеем $\bar{m}_{s,0} = 1,16507 \cdot 10^{-28} \text{ з}$.

Из соотношений (9) и (10), следует, что реально в критической точке $\vec{r}_{s,c}$ Re -пространственная масса $\Delta \bar{m}_s$ должна быть равна:

$$\bar{m}_{s,0}\gamma_s(\Delta_1 \vec{c}) - \bar{m}_{s,0} = \Delta \bar{m}_s.$$

При этом теоретически осуществляется сжатие радиуса ядра \vec{r}_s до практического нуля $\vec{r}_{s,c}$. Однако, численное значение параметра $\Delta \bar{m}_s$ может быть определено только при известном $\Delta_1 \vec{c}$.

Учитывая далее закон изменения радиусов вида [4] $\vec{r}_{s,c} \rightarrow -j\vec{r}_{s,c}$ можем констатировать факт перетекания массы в j -пространство при $-\vec{v}_s = -\vec{c} - \Delta_2 \vec{c}$:

$$-j\vec{m}_s = \frac{\vec{m}_{s,0}}{\sqrt{\frac{2\Delta_2\vec{c}}{\vec{c}}}}, \quad \vec{m}_s \rightarrow -j\vec{m}_s. \quad (11)$$

Так как скорость в соотношении (11) превышает уровень скорости света необходимо умножить левую и правую части данного соотношения на Лоренц-фактор $\gamma_s(\Delta_2\vec{c})$. При этом имеем:

$$-j\vec{m}_s \sqrt{\frac{\vec{c}}{2\Delta_2\vec{c}}} = -j\vec{m}_{s,c} \quad (12)$$

или $-j\vec{m}_s \rightarrow -j\vec{m}_{s,c}$. Иными словами из (11)-(12) следует, что в процессе перемещения массы в мнимое пространство параметр \vec{m}_s становится равным $-j\vec{m}_{s,c}$, то есть вся масса ядра перемещается в мнимое отрицательное пространство.

Последующее преобразование сформированного соотношения для массы осуществляется при достижении ядром скорости $-\vec{c}\sqrt{2} + \Delta_3\vec{c}$ по правилу:

$$m_{s,0} \rightarrow \vec{m}_{s,0} [-\gamma_s(\Delta_3\vec{c})][\gamma_s(\Delta_3\vec{c})] = -j\vec{m}_s (1-\psi)^{\frac{1}{2}}, \quad (13)$$

где

$$-j\vec{m}_s \sqrt{\frac{\vec{c}}{2\Delta_2\vec{c}}} = -j\vec{m}_{s,c},$$

а значение ψ легко определяется из поправки Лоренца для указанной скорости.

Таким образом, можно заключить, что на теоретической скорости $-\vec{c}\sqrt{2}$ вся масса \vec{m}_s является объектом перемещения в пространство $-Im$, образуя новую оболочку ядра в мнимом отрицательном пространстве. В пространстве Re -ядра при этом масса практически равна нулю.

Итак, можем констатировать, что перемещение массы вида $\vec{m}_s \rightarrow -j\vec{m}_{s,c}$ в пространствах атома приводит к образованию кванта времени Δt с исчезновением массы Re оболочки ядра.

Выполним интегрирование массы ядра на скорости $\vec{v}_s \rightarrow \vec{v}_s + \Delta\vec{v}_s$. При этом имеем:

$$\vec{m}_s + \Delta\vec{m}_s = \frac{m_{s,0}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\vec{v}_s + \Delta\vec{v}_s}{\vec{c}}\right)^2}}. \quad (14)$$

Используя ряд преобразований из математического анализа из (14) достаточно просто получить соотношение:

$$\frac{\Delta\vec{m}_s}{\Delta\vec{v}_s} = \frac{m_{s,0}}{c^2} \vec{v}_s \left[1 - \left(\frac{\vec{v}_s}{\vec{c}}\right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}},$$

откуда при $\Delta\vec{v}_s \rightarrow 0$ имеем подинтегральную функцию вида:

$$d\vec{m}_s = \frac{m_{s,0}}{c^2} \vec{v}_s \left[1 - \left(\frac{\vec{v}_s}{\vec{c}}\right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} d\vec{v}_s.$$

Интегрирование данного равенства приводит к соотношению:

$$\vec{m}_s = \vec{m}_{s,0} \vec{c} \frac{1}{\sqrt{c^2 - v_s^2}}. \quad (15)$$

В случае определенного интеграла для шара ядра (15) должны быть использованы пределы скорости $\vec{v}_s \div \vec{v}_s + \Delta\vec{v}_s$ или $\vec{v}_s \div \vec{c} - \Delta_1\vec{c}$. При этом учитывая только нижний предел интегрирования, достаточно просто получить значение близкое к стандартному, то есть:

$$\left. \bar{m}_s \right|_{\vec{v}_s} = 1,6749333 \cdot 10^{-24} \text{ з.}$$

Следовательно, верхний предел интеграла $\vec{c} - \Delta_1\vec{c}$ дает нам право говорить о примерном удвоении стандартного значения массы ядра на около световой скорости:

$$\left. \bar{m}_{s,c} \right|_{\vec{c} - \Delta_1\vec{c}} = 2 \cdot 1,6749275 \cdot 10^{-24} \text{ з.}$$

Далее, факт увеличения массы ядра до $2\bar{m}_s$ за счет связи со струной и дальнейший набор энергии обуславливают перемещения наночастицы с радиуса $\vec{r}_{s,c}$ на уровень $-j\vec{r}_s$. Соответственно масса при этом преобразуется в позитронную и будет равна:

$$\bar{m}_s = -j\bar{m}_{s,0} \sqrt{\frac{\vec{c}}{2\Delta_2\vec{c}}}.$$

Умножая, далее, обе части данного соотношения на Лоренц-фактор, при скорости $-\vec{c}\sqrt{2} + \Delta_3\vec{c}$, получаем аналог (13):

$$-j \frac{\bar{m}_s}{\sqrt{1-\psi}} = -j\bar{m}_{s,c}.$$

При этом радиус $-j\vec{r}_s \rightarrow -j\vec{r}_{s,c}$ или $-j\vec{r}_s = -j\vec{r}_{0,L}(1-\psi)$. Следует считать, что переход пространства данного радиуса на уровень $\vec{r}_{s,c}$ и далее на уровень \vec{r}_s определяет выход массы ядра в седьмое измерение: $-j\bar{m}_{s,c} \rightarrow 2\bar{m}_s$, а за счет периодического исчезновения энергии струны преобразование вида $2\bar{m}_s \rightarrow \bar{m}_s$.

Заключение

В представленной работе рассмотрены релятивистские параметры нано частиц как возможных источников помех в системах квантово-криптографических систем связи. Определено, что уровень радиусов релятивистских объектов может существенно превышать радиусы исходных нано частиц, что при формировании квантов может привести к поглощению энергии за счет резонансных явлений в системах. На основании выполненных расчетов получены следующие результаты:

1) определены релятивистские поправки к параметрам водородоподобных атомов, позволяющие учитывать в расчетах каналов связи действие $-Im$ пространства на природу квантов;

2) выполнен расчет энергии первого релятивистского уровня $\tau=1$, определяющего факт поглощения квантов в мнимом пространстве (формируется шар «черной» материи $-Im$ пространства или объект позитронного типа);

3) рассчитана масса ядра водородоподобного атома при отсутствии скоростей вращения «порождающей» массы покоя.

4) показано, что на скорости $-\vec{c}\sqrt{2}$ вся масса \bar{m}_s является объектом перемещения в пространство $-Im$, образуя новую оболочку ядра в мнимом отрицательном пространстве;

5) интегрирование массы ядра на скорости $\vec{v}_s \rightarrow \vec{v}_s + \Delta\vec{v}_s$ показало, что на скорости $\vec{c} - \Delta_1\vec{c}$ масса нано объекта удваивается относительно стандартного значения на радиусе \vec{r}_s ;

б) дальнейший набор энергии ядром обуславливает перемещение наночастицы с радиуса $\vec{r}_{s,c}$ на уровень $-j\vec{r}_{s,c}$. Соответственно позитронная масса при этом будет равна $-j\vec{m}_{s,c}$;

7) при скорости $\sqrt{2}\vec{c} - \Delta_3\vec{c}$ выполняется переход массы данного нанообъекта в седьмое измерение в виде $-j\vec{m}_{s,c} \rightarrow 2\vec{m}_s$, а также торможение массы и преобразование $2\vec{m}_s \rightarrow \vec{m}_s$ в связи с циклическим исчезновением энергии струны.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании квантово-электронных каналов связи с высокой защищенностью от помех, порождаемых схемотехническими факторами информационных сетей.

INTERFERENCE PROTECTION IN QUANTUM CRYPTOGRAPHIC COMMUNICATION CHANNELS BASED ON METHODS FOR CALCULATING THE SPACES AND MASSES OF HYDROGEN-LIKE ATOMS OF THE ARTICLE

I.P. KOPYAK

Abstract. In this paper, the parameters of hydrogen-like atoms are considered from the point of view of the relativistic interaction of the nucleus with the energy of strings. The principles of electron and nuclear mass transformation at rotational speeds up to and above the speed of light have been studied. The obtained dependences are formed taking into account the representation of the parameters of atoms using a complex plane or space, as well as taking into account the methods of forming relationships for these spaces. In addition, units of measurement for the energy of an electron have been obtained, defined as "Franklin" with their representation in the CGSM system. It is shown that the ultra-high accuracy of parameter representation in calculations leads to precision results in subsystems of quantum communication channels responsible for the stability and practical reliability of the designed circuits.

Keywords: hydrogen-like atom, complex space, atomic nucleus, string energy, electron relativism, Lorentz factor, black matter.

Список литературы

1. Соколов А.А., Тернов И.М. Квантовая механика и атомная физика. М.: Просвещение, 1970. 203 с.
2. Гольдин Л.Л., Новикова Г.И. Введение в квантовую физику: М.: Наука. Гл. ред. физ.- мат. лит., 1988, 328 с.
3. Барбашов Б.М., Нестеренко В.В. Суперструны – новый подход к единой теории фундаментальных взаимодействий // Успехи физических наук. Том 150, № 4. М.: 1986, с. 489-524.
4. Кобяк И.П. Основы теории атома водорода для задач синтеза квантово-электронных схем // Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС : Материалы II Международной науч.-техн.конф. (Республика Беларусь, Минск, 27-28 апреля 2021 г.). Минск.: БГУИР, 2021. С. 207-212.

ПРИМЕНЕНИЕ ПИЛОТ-СИГНАЛА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ

Я.В. РОЩУПКИН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 4 апреля 2025

Аннотация. В работе произведено моделирование волоконно-оптической системы передачи, реализующей метод передачи оптических сигналов, основанный на введении в спектр сигнала дополнительной однонаправленной компоненты – пилот-сигнала и его узкополосном усилении на приеме. Определены оптимальные параметры узкополосного волоконного усилителя и схем последетекторной обработки сигнала.

Ключевые слова: волоконно-оптическая система передачи, приемный оптический модуль, вынужденное рассеивание Манделъштама-Бриллюэна, оптический усилитель.

Введение

Для повышения энергетической эффективности оптических систем передачи применяются когерентные методы приема, альтернативой которым является использование авто-когерентного метода, когда принимаемый оптический сигнал детектируется путем смешения не с излучением местного гетеродина, а с особой составляющей – пилот-сигналом, передаваемым вместе с информационным сигналом и выделяемым на приемной стороне. В этом случае существенно упрощается приемный оптический модуль, поскольку не требуются технически сложные устройства стабилизации частоты и фазы местного гетеродина. Недостатком такого подхода являются затраты энергии на передачу пилот-сигнала большой мощности, что в конечном итоге не позволяет добиться существенного улучшения энергетической эффективности. С целью преодоления данного недостатка может быть использовано узкополосное усиление на приемной стороне передаваемого пилот-сигнала малой мощности. Необходимо использование оптического усилителя, который будет обеспечивать усиление только узкой полосы спектра в окрестности пилот-сигнала. Большинство существующих волоконно-оптических усилителей имеют очень широкую полосу усиления, достигающую нескольких терагерц, что неприемлемо для избирательного усиления. Наилучшим образом для данных целей подходит распределенный оптический усилитель на эффекте вынужденного рассеивания Манделъштама-Бриллюэна, который обладает узкой полосой усиления (десятки МГц), значительным коэффициентом усиления (более 30 дБ) и где в качестве усилительной среды выступает сама оптическая линия связи [1]. Метод построения волоконно-оптической системы передачи с введением пилот-сигнала на стороне передачи и его избирательным усилением на приеме подробно рассматривается в работе [2].

На передающей стороне в спектр информационного сигнала перед модуляцией оптической несущей вводится однонаправленный сигнал с частотой f_d , превышающей верхнюю частоту информационного сигнала. В результате модуляции в спектре оптического сигнала помимо информационных составляющих появятся две дополнительные составляющие с частотами $f_c \pm f_d$, где f_c – частота несущего колебания. В волокне со стороны приема производится избирательное усиление составляющей с частотой $f_c + f_d$. Далее сформированный таким образом сигнал подается на вход фотодетектора.

Данный приемный оптический модуль функционирует по принципу гетеродинного приемника, а в качестве сигнала местного гетеродина выступает усиленная составляющая ($f_c + f_d$).

Значительный коэффициент усиления позволяет получить существенное увеличение мощности этой составляющей. На выходе фотодетектора будет получен информационный сигнал на поднесущей частоте $f_{п} = f_{д}$. Частота лазера накачки усилителя не будет попадать в полосу информационного сигнала, поэтому метод может быть использован для любых скоростей передачи.

Для оценки эффективности применения данного метода необходимо произвести его имитационное моделирование.

Имитационная модель волоконно-оптической системы передачи

Моделирование производилось с помощью программного пакета OptiSystem компании OptiWave Inc. OptiSystem – это инновационный пакет моделирования оптических систем телекоммуникаций, разработанный для проектирования, тестирования и оптимизации каналов практически любого типа на физическом уровне. Симулятор системного уровня, основанный на реалистичном моделировании волоконно-оптических систем телекоммуникаций, OptiSystem обладает мощной средой моделирования и иерархическим определением компонентов и систем. OptiSystem подходит для широкого спектра приложений, включающих в себя проектирование оптических передатчиков, каналов, усилителей и приемников. Он имеет большую базу активных и пассивных компонентов, от простых лазерных диодов и фотодиодов, волокон, разветвителей, аттенуаторов, модуляторов до комплексных передающих и приемных оптических модулей, волоконных усилителей, регенераторов и т.д. Также широко представлены измерительные устройства оптического и электрического диапазонов. Большой набор настраиваемых параметров позволяют пользователю мониторить и оптимизировать конкретные технические характеристики устройств для повышения производительности системы в целом [3].

Имитационная модель волоконно-оптической системы передачи с введением пилот-сигнала на стороне передачи и его избирательным усилением на приеме приведена на рис. 1.

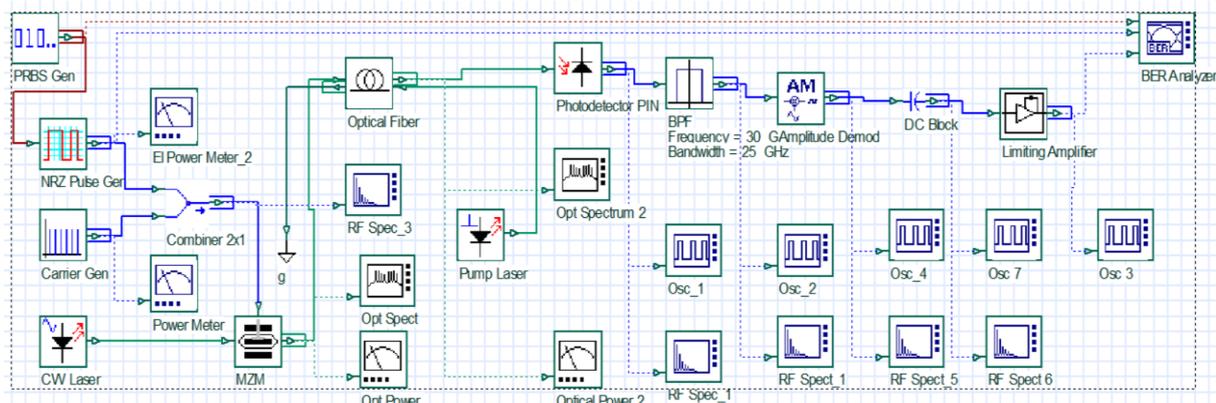


Рис. 1. Модель волоконно-оптической системы передачи

Бинарные данные формируются генератором псевдослучайной последовательности и далее поступают на формирователь импульсов, где преобразуются в электрический сигнал в формате NRZ. Битовая скорость данных выбрана равной 10 Гбит/с. Далее полезный сигнал суммируется с пилот-сигналом, представляющим собой гармонический сигнал постоянной амплитуды с частотой 30 ГГц. Частота пилот-сигнала должна как минимум в два раза превышать верхнюю граничную частоту спектра полезного сигнала [2]. Выбор значения 30 ГГц обусловлен необходимостью создать защитный интервал между копиями спектра, что смягчит требования к прямоугольности полосового фильтра в приемном оптическом модуле. В результате получится электрический сигнал, амплитудный спектр которого приведен на рис. 2.

В качестве источника оптического излучения используется полупроводниковый лазер, работающий в непрерывном режиме с частотой 193,1 ТГц (длина волны 1,55 мкм) и выходной мощностью 0 дБм. Для формирования линейного сигнала применен внешний модулятор Маха-Цандера, который производит модуляцию оптического излучения по интенсивности. Модулирующим сигналом является сумма информационного сигнала и пилот-сигнала.

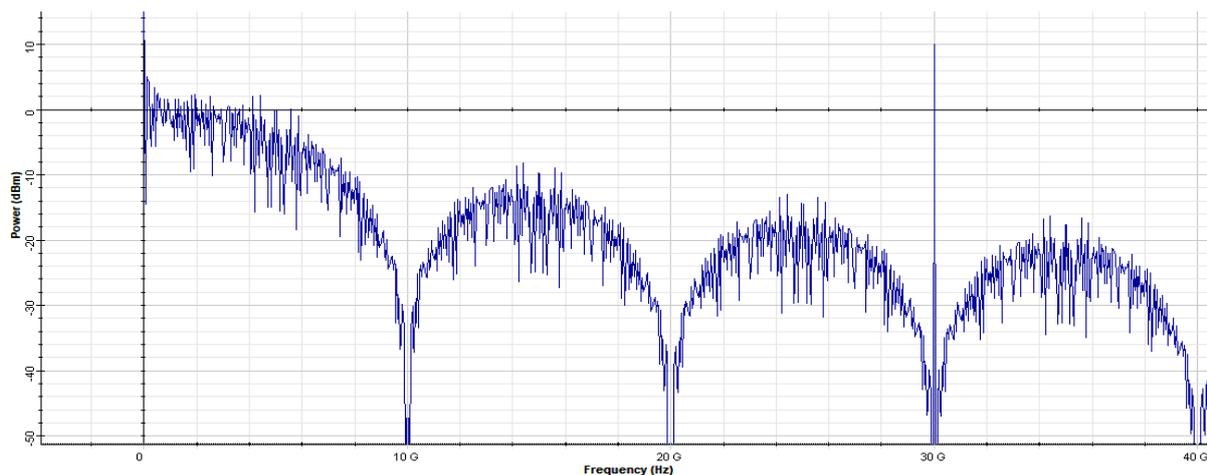


Рис. 2. Спектр сигнала на выходе сумматора электрических сигналов

Спектр оптического сигнала, помимо информационных составляющих и несущей, будет содержать две компоненты, соответствующие пилот-сигналу, с частотами 193,13 ТГц и 193,07 ТГц. Спектр линейного оптического сигнала приведен на рис. 3.

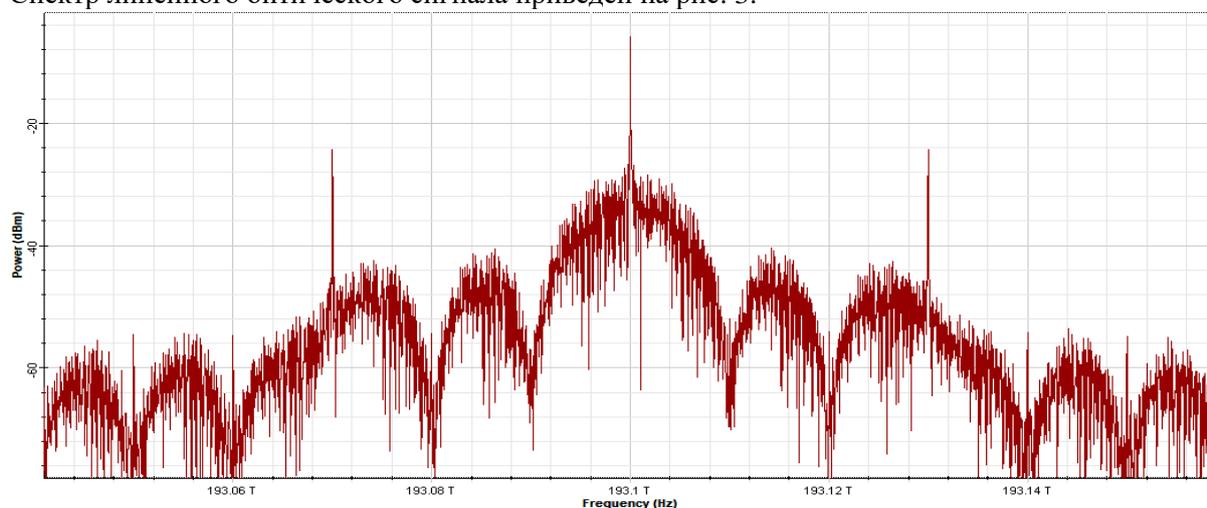


Рис. 3. Спектр линейного оптического сигнала

Модулированное оптическое излучение передается в одномодовом оптическом волокне с затуханием 0,2 дБ/км. На стороне приема применяется распределенный усилитель Мандельштама-Бриллюэна, состоящий из оптического ответвителя и лазера накачки с частотой 193,141 ТГц, излучение которого вводится в оптическое волокно навстречу передаваемому сигналу. Усилительной средой является оптическая линия связи. Частота лазера накачки (193,141 ТГц) на величину смещения Бриллюэна (11 ГГц) превышает частоту компоненты оптического спектра, соответствующей пилот-сигналу (193,13 ТГц), в результате чего производится её избирательное усиление. Таким образом, частота лазера накачки превышает верхнюю граничную частоту спектра оптического сигнала и не попадает в полосу, занимаемую информационным сигналом, что снимает ограничение на ширину спектра информационного сигнала, характерное для усиления оптической несущей [4].

Результаты моделирования

С целью выбора мощности лазера накачки, были произведены исследования зависимости мощности спектральной компоненты, соответствующей пилот-сигналу и результирующего коэффициента ошибок (BER) от мощности лазера накачки. Зависимость уровня спектральной компоненты, соответствующей пилот-сигналу, усиленной распределенным усилителем, от мощности лазера накачки представлена на рис. 4. Зависимость коэффициента ошибок (BER) от мощности лазера накачки приведена на рис. 5.

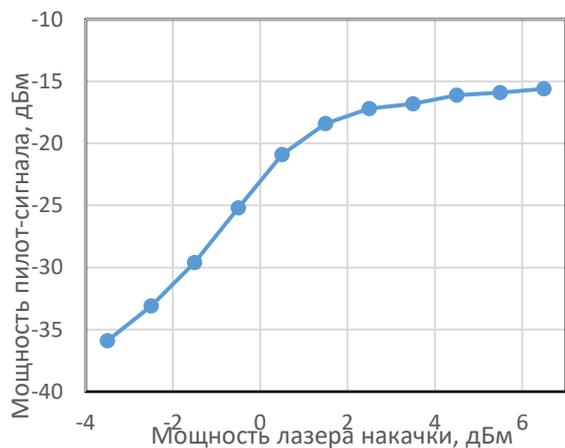


Рис. 4. Зависимость мощности пилот-сигнала от мощности лазера накачки

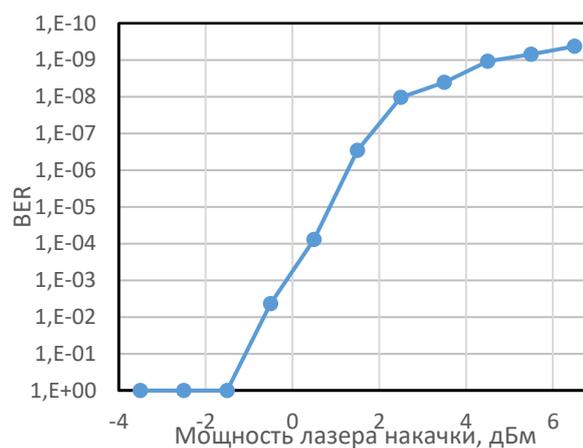


Рис. 5. Зависимость BER от мощности лазера накачки

Из анализа графиков (рис. 4, 5) можно сделать вывод, что мощность пилот-сигнала растет нелинейно с ростом мощности лазера накачки, а коэффициент ошибок, соответственно, уменьшается. Усиление, близкое к максимальному (около 30 дБ) достигается при мощностях лазера накачки более 2 дБм и при дальнейшем росте мощности увеличивается незначительно. Коэффициент битовых ошибок при этом достигает своих минимальных значений.

Уровень пилот-сигнала на приемной стороне без усиления (при выключенном лазере накачки) составлял $-46,8$ дБм и увеличился до $-15,6$ дБм при мощности лазера накачки 6,5 дБм, таким образом коэффициент усиления усилителя составил 31,2 дБ.

Спектр оптического сигнала на входе фотодетектора с усиленной компонентой, соответствующей пилот-сигналу приведен на рис. 6.

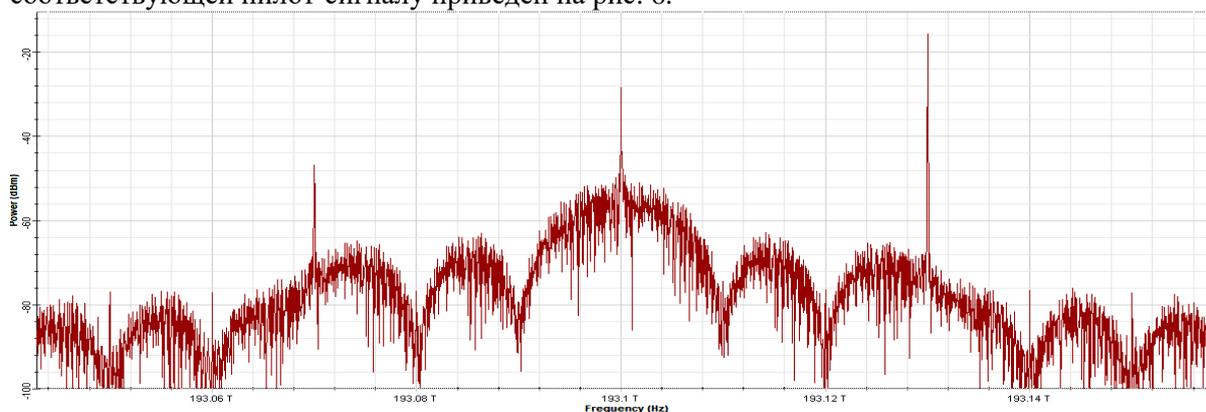


Рис. 6. Спектр оптического сигнала на входе фотодетектора

Оптическое изучение с усиленной спектральной компонентой детектируется p-i-n фотодетектором. В результате биений в квадратичном детекторе с усиленным пилот-сигналом, информационные составляющие спектра переносятся в окрестность промежуточной частоты, равной частоте пилот-сигнала (30 ГГц) и также подвергаются усилению. Спектр электрического сигнала на выходе фотодетектора представлен на рис. 7.

Далее электрический сигнал проходит через полосовой фильтр с центральной частотой 30 ГГц и полосой 20 ГГц для выделения информационного сигнала на промежуточной частоте. Демодуляция с промежуточной частоты выполняется синхронным демодулятором, после которого устанавливается фильтр нижних частот для уменьшения влияния высокочастотных шумовых составляющих.

С целью более существенного подавления нелинейных искажений восстановленного цифрового сигнала применен усилитель-ограничитель. Для визуального контроля и измерения параметров передаваемого и применяемого сигнала использовались оптический и электрический анализаторы спектра, осциллограф, измеритель оптической мощности. Оценка эффективности системы в целом производилась при помощи анализатора битовых ошибок канала, позволяющего вычислять коэффициент битовых ошибок (BER).

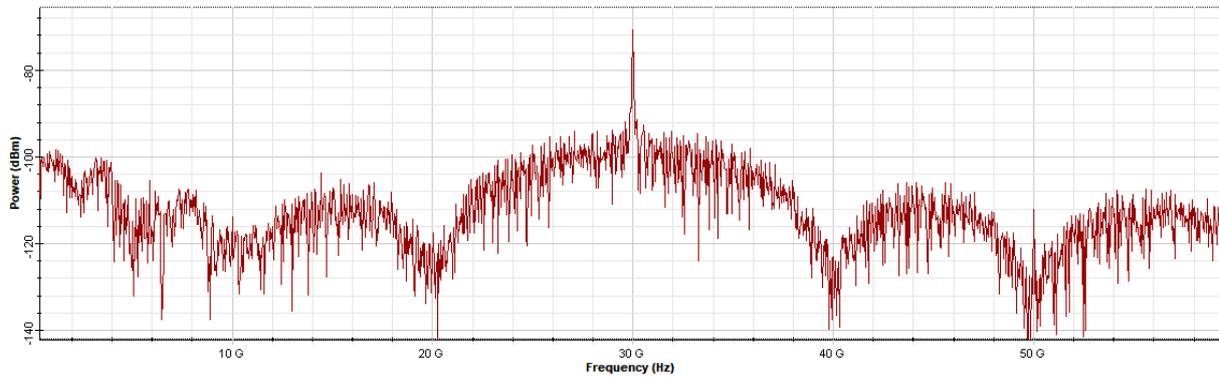


Рис. 7. Спектр электрического сигнала на выходе фотодетектора

Длина линии связи соответствует максимально возможному затуханию, когда коэффициент битовых ошибок не превышал 10^{-9} . В результате измерений при коэффициенте битовых ошибок $9,11 \cdot 10^{-10}$ оптическая мощность на входе приемного модуля без усиления составила $-26,25$ дБм. Эта величина является чувствительностью приемника, которая демонстрирует выигрыш по чувствительности исследуемого приемного модуля по сравнению с приемником прямого фотодетектирования на ~ 3 дБм, как и было теоретически показано в [2].

Заключение

В результате моделирования волоконно-оптической системы передачи, реализующей метод передачи оптических сигналов, основанный на введении в спектр сигнала дополнительной однотональной компоненты – пилот-сигнала и его усилении на приеме. Определено, что усиление распределенного усилителя Манделъштама-Бриллюэна, близкое к максимальному (около 30 дБ), достигается при мощностях лазера накачки более 2 дБм и при дальнейшем росте мощности увеличивается незначительно. Получена чувствительность исследуемого приемного оптического модуля, равная $-26,3$ дБм при скорости передачи 10 Гбит/с и коэффициенте битовых ошибок не хуже 10^{-9} , что соответствует теоретическим расчетам [2].

APPLICATION OF PILOT-SIGNAL TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY OF FIBER-OPTIC COMMUNICATION SYSTEMS

Y.V. ROSHCHUPKIN

Abstract. A simulation of the fiber-optic communication system implementing a method of optical communications based on the insertion in the signal spectrum of additional single-tone components – a pilot-signal and its narrow-band amplification at the receiver was carried out. The structure of the optical receiver module was substantiated and evaluated. The optimal parameters of the distributed fiber amplifier and post-detection processing circuits were determined.

Keywords: fiber-optic communication systems, optical receiver module, stimulated Brillouin scattering, optical amplifier.

Список литературы

1. Yeniay A., Delavaux J.-M., Toulouse J. // J. Lightwave Technol. 2002. Vol. 20. № 8. P. 1425–1432.
2. Урядов В.Н., Рошупкин Я.В., Зеленин А.С. и др. // Электросвязь. 2018. № 9. С. 61–66.
3. Khadir A. A., Dahir B. F., Fu X. // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. 2014. Vol. 3, Iss. 6, P. 42 – 53.
4. Урядов В.Н., Рошупкин Я.В., Бунас В.Ю. и др. // Докл. БГУИР. 2015. № 8 (94). С. 11–16.

УДК [004.738+007.52]:621.395.721.5

АЛГОРИТМЫ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ДОСТУПА К КАНАЛАМ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ (5G, 6G) ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ЗАДЕРЖЕК В УСЛОВИЯХ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Н.В. ХАДЖИНОВА, М.О. САВОНЕВСКАЯ, В.В. СТОЛЯРОВА, Л.А. ЧЕРНИКОВА

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 5 апреля 2025

Аннотация. В данной работе анализируются алгоритмы мультиагентного доступа к каналам мобильной связи в сетях 5G и 6G для минимизации задержек устройств интернета вещей (IoT). Рассматриваются традиционные методы доступа, их ограничения, а также предлагаются усовершенствованные алгоритмы, основанные на машинном обучении и теории игр. Основное внимание уделяется возможностям оптимизации алгоритмов управления доступом к среде передачи данных и снижению времени отклика для устройств IoT.

Ключевые слова: мультиагентные системы, доступ к каналам, 5G, 6G, интернет вещей, минимизация задержек, машинное обучение, теория игр.

Введение

Современные технологии стремительно развиваются, и одной из ключевых тенденций является рост числа устройств, объединенных в концепцию Интернета вещей (Internet of Things).

IoT представляет собой коллективную сеть подключенных устройств и технологий, которая облегчает связь между устройствами и облаком, а также между самими устройствами. Устройства оснащены датчиками, средствами связи и программным обеспечением, которые собирают данные, передают их для анализа и позволяют принимать решения без участия человека. Благодаря появлению недорогих компьютерных микросхем и телекоммуникаций с высокой пропускной способностью сейчас существует миллиарды устройств, подключенных к Интернету [1]. Примеры таких устройств включают: умные дома (термостаты, освещение), транспорт (умные автомобили, которые могут передавать информацию о своем состоянии или взаимодействовать с инфраструктурой), сельское хозяйство (устройства для мониторинга состояния растений, почвы, а также условий окружающей среды).

Массовое внедрение IoT сталкивается с рядом серьезных проблем. Среди них – задержки связи, возникающие из-за одновременного подключения большого количества устройств, ограниченная пропускная способность существующих сетей в условиях высокой плотности устройств, а также вопросы безопасности, связанные с рисками кибератак на недостаточно защищенные устройства.

Технологии мобильной связи нового поколения играют ключевую роль в решении этих проблем. Сети пятого поколения (5G) стали технологическим прорывом, значительно увеличив скорость передачи данных, обеспечив низкие задержки и позволив подключать миллиарды устройств одновременно. Разработка сетей шестого поколения (6G) направлена на дальнейшее улучшение параметров скорости, надежности и спектральной эффективности [2].

Несмотря на достижения в технологиях мобильной связи, проблема эффективного взаимодействия множества устройств IoT с сетевыми каналами связи остается одной из ключевых задач.

Минимизация задержек IoT

IoT (Internet of Things) – это концепция, включающая сеть физических устройств, которые подключены к интернету и могут обмениваться данными между собой и с другими системами.

В связи со своим активным развитием, IoT сталкивается с множеством проблем. Одной из ключевых проблем IoT является задержка передачи данных. В реальном времени многие устройства IoT (например, медицинские устройства или автомобили) требуют быстрого отклика для обеспечения правильности и безопасности функционирования. Чем больше задержка, тем хуже будет взаимодействие устройств и их способность к быстрому реагированию на изменения. Сетевые задержки могут быть вызваны разными факторами, включая задержки передачи данных, задержки обработки данных (ожидание, пока данные будут обработаны и проанализированы сервером), задержки маршрутизации (в случае многослойных архитектур, когда данные проходят через несколько шлюзов и маршрутизаторов, каждый дополнительный шаг увеличивает задержку) [3].

Для минимизации задержек в IoT используются различные подходы:

1. Edge Computing (периферийные вычисления). Перенос обработки данных на устройства или шлюзы, расположенные ближе к конечным пользователям или источникам данных. Это позволяет снизить задержки, избегая необходимости передачи больших объёмов данных в центральные серверы.

2. 5G и будущие 6G сети. Каналы мобильной связи 5G и 6G обеспечат более высокую пропускную способность, меньшую задержку и большую плотность подключения устройств. Они могут значительно улучшить качество связи в IoT, особенно в реальном времени [4].

IoT – активно развивающееся и перспективное направление. Ожидается, что количество устройств IoT будет продолжать расти, а с развитием новых технологий, таких как 5G и 6G, а также улучшением вычислительных мощностей на периферии (edge computing), IoT станет еще более интегрированным и эффективным.

По данным Statista, в 2022 году было около 13 миллиардов подключённых устройств IoT. Ожидается, что к концу 2025 года количество устройств IoT вырастет до 22 миллиардов. Это включает в себя устройства для умных домов, промышленности, здравоохранения, транспорта и многих других областей. Кроме того, прогнозируется, что количество IoT-устройств может достичь 50 миллиардов. Это объясняется экспансией таких технологий, как автономные автомобили, умные города, интеграция 5G и 6G.

В условиях конкуренции за ограниченные ресурсы сети мультиагентные алгоритмы доступа предлагают перспективный подход к оптимизации распределения ресурсов и координации сетевого взаимодействия. Такие алгоритмы способны динамически распределять спектр между устройствами, снижать вероятность коллизий при передаче данных и адаптироваться к изменяющимся условиям сети. Их внедрение не только решает проблему масштабируемости сетей, но и создает основу для дальнейшего повышения эффективности систем IoT, что представляет важную научную и практическую задачу, актуальность которой будет только возрастать с развитием технологий мобильной связи нового поколения.

Алгоритмы мультиагентного доступа

Алгоритмы мультиагентного доступа к каналам мобильной связи представляют собой подход, в котором несколько интеллектуальных агентов (устройств или программных агентов) совместно решают задачу эффективного использования сетевых ресурсов. Такие алгоритмы особенно актуальны в современных сетях 5G и перспективных 6G, где плотность IoT-устройств продолжает расти, а требуемый уровень задержек становится критически низким. Использование мультиагентных методов позволяет динамически адаптировать доступ к каналам связи, минимизировать коллизии и улучшать распределение ресурсов в зависимости от текущей нагрузки на сеть.

1. Традиционные алгоритмы.

- 1.1. Множественный доступ с контролем несущей и предотвращением коллизий (CSMA/CA). Метод представляет собой алгоритм мультиагентного доступа к каналам связи, где несколько агентов взаимодействуют для эффективного использования сетевых ресурсов.

Каждый агент прослушивает канал передачи данных перед передачей, чтобы убедиться, что он свободен. Если канал занят, агент ожидает случайный промежуток времени (backoff) перед повторной попыткой. Это взаимодействие между агентами позволяет минимизировать вероятность коллизий и оптимизировать использование канала [5].

Когда канал свободен, агент отправляет короткий сигнал RTS (Request to Send), чтобы уведомить другие агенты о намерении передать данные. RTS содержит информацию о предполагаемой продолжительности передачи и адресе назначения, что позволяет другим агентам корректировать свои стратегии доступа к каналу. Устройство назначения отвечает сигналом CTS (Clear to Send), подтверждая готовность к приему данных и информируя другие агенты о том, что канал занят и они должны подождать.

После получения CTS агент начинает передачу данных в согласованном порядке, чтобы избежать коллизий. Если коллизия все же происходит, агент снова ожидает случайный промежуток времени перед повторной попыткой передачи. Диапазон случайного ожидания увеличивается с каждой попыткой, чтобы минимизировать вероятность повторной коллизии. Это адаптивное поведение агентов позволяет им корректировать свои стратегии на основе истории взаимодействий и текущей загрузки сети [6].

Несмотря на эти меры, CSMA/CA не полностью решает проблему скрытых узлов. Проблема скрытых узлов возникает, когда два или несколько узлов сети пытаются получить доступ к базовой станции (точке доступа), но при этом не видят друг друга из-за препятствий или расстояния. Это может привести к коллизиям, так как устройства не могут обнаружить передачу данных друг друга и могут начать передавать одновременно. Хотя CSMA/CA использует механизмы RTS/CTS для снижения вероятности коллизий, он не полностью устраняет эту проблему, поскольку два запроса RTS могут быть отправлены одновременно разными станциями. Также недостатком данного метода является дополнительная задержка, возникающая из-за использования сигналов RTS и CTS, что увеличивает время передачи данных.

2. Алгоритмы на основе машинного обучения.

2.1. Q-Learning. Алгоритм мультиагентного доступа к каналам мобильной связи на основе Q-Learning представляет собой метод управления доступом к радиоканалам, при котором несколько агентов, таких как базовые станции или пользовательские устройства, самостоятельно обучаются оптимальным стратегиям выбора каналов. Каждый агент накапливает опыт взаимодействия с окружающей средой, обновляя значения Q-функции, отражающие ожидаемое вознаграждение за определенные действия в конкретных состояниях. Цель заключается в максимизации эффективности использования каналов связи и минимизации помех.

Q-Learning – это метод обучения с подкреплением, основанный на обновлении таблицы значений Q-функции для выбора оптимальной стратегии агента. Основной принцип работы Q-Learning основан на представлении среды, выборе алгоритмом действий и обновлении Q-значений. Агент взаимодействует с предоставленной средой, которая описывается конечным числом состояний. В каждом состоянии агент выбирает действие, получая награду за его выполнение и после выполнения действия обновляется Q-значение по формуле Беллмана. Агент постепенно улучшает стратегию выбора действий, чтобы максимизировать накопленную награду [7].

В отличие от традиционных алгоритмов, мультиагентный Q-Learning обеспечивает адаптивность, позволяя агентам самостоятельно приспосабливаться изменяющимся условиям сети без централизованного управления. Однако взаимодействие множества агентов может привести к сложности обучения, нестабильности и медленной сходимости алгоритма. Без должной координации агенты могут мешать друг другу, снижая общую эффективность сети.

2.2. Глубокое обучение с подкреплением (DRL). Алгоритм представляет собой метод, при котором несколько агентов объединяют обучение с подкреплением и глубокое обучение, что позволяет выявлять скрытые динамические характеристики текущей среды без предварительных знаний. Нейронные сети в методах глубокого обучения обладают высокой способностью к восприятию. Сложные задачи по выгрузке вычислений и распределению ресурсов могут быть решены более эффективно за счет сочетания способности обучения с подкреплением к принятию решений и высокой восприимчивости нейронных сетей в глубоком обучении [8].

Основной принцип работы заключается в том, что каждый агент взаимодействует со средой, выбирает действия и получает обратную связь в виде вознаграждения. Используя

нейронные сети, агент строит аппроксимацию функции ценности (Q-функции), которая помогает предсказывать ожидаемое вознаграждение для каждого действия в определенном состоянии. Цель агента – максимизировать суммарное вознаграждение, что достигается путем обновления весов нейронной сети на основе полученного опыта. DRL вместо таблицы Q-значений использует нейронную сеть, которая аппроксимирует Q-функцию, что позволяет работать с непрерывными и высокоразмерными пространствами состояний. DRL способен обобщать знания и адаптироваться к изменяющимся условиям, что особенно важно в динамических системах, таких как мобильные сети.

Если среда небольшая и дискретная, Q-learning может быть эффективным и простым решением. Если среда сложная, динамическая и включает непрерывные состояния, DRL имеет явные преимущества. В сетях 5G и 6G, где число устройств и каналов велико, DRL предпочтительнее из-за способности обобщать знания и адаптироваться к изменениям.

3. Алгоритмы на основе теории игр.

3.1. Некооперативные игры. Используются для моделирования и оптимизации поведения устройств при конкуренции за ресурсы, такие как полоса пропускания или мощность передачи, в условиях децентрализованного управления. Каждый агент (устройства или пользователи сети) выбирает свою стратегию независимо от других агентов с целью максимизировать собственную выгоду: максимизировать свою пропускную способность или минимизировать задержки. В таких играх обычно решается задача нахождения равновесия Нэша – состояния, при котором ни один агент не может улучшить свой результат, изменив свою стратегию, при условии, что стратегии других агентов остаются неизменными. Это равновесие критично для обеспечения стабильности и минимизации задержек в динамичной среде IoT, где устройства могут появляться и исчезать, а каналы могут изменяться по мере изменения условий.

Например, в сетях 802.11 устройства адаптируют вероятности доступа к каналу для максимизации пропускной способности, что можно смоделировать как некооперативную игру, где каждое устройство выбирает оптимальную стратегию доступа, с целью минимизировать задержки и максимизировать скорость передачи данных. В CDMA-сетях мобильные устройства автономно регулируют мощность передачи для снижения интерференции, достигая равновесия Нэша, минимизируя помехи и оптимизируя качество связи. Данный пример также можно рассматривать как некооперативную игру, где каждое устройство стремится найти оптимальную мощность для передачи данных, не нарушая работу других устройств. В сетях 5G и 6G некооперативные игры могут быть использованы для распределения полосы пропускания между устройствами на основе их приоритетов и требований к задержкам, что позволяет оптимизировать использование ресурсов и минимизировать задержки. Эти подходы позволяют устройствам самостоятельно оптимизировать использование ресурсов без централизованного управления, снижая задержки за счет локальной адаптации.

3.2. Кооперативные игры. Здесь агенты могут объединяться в коалиции, что позволяет им совместно разрабатывать стратегии, оптимизировать использование ресурсов и достигать коллективных целей. Главной целью кооперативных игр в таких сетях является создание стратегий, которые обеспечивают выгодные условия для всех агентов, например, путем совместного использования каналов связи или объединения ресурсов для улучшения качества обслуживания. Важным аспектом является разделение ресурсов между агентами, которое должно быть справедливым для всех участников, например, кооперативное использование частотного спектра. Спектр может быть ограничен и устройства могут договориться о том, как разделить доступные частоты или временные слоты таким образом, чтобы минимизировать интерференцию и задержки. Чаще всего для справедливого разделения используют метод равновесия Шепли.

3.3. Механизмы аукционов. Применяются для моделирования взаимодействия агентов, где цели участников могут быть разнообразными, но конечным результатом является эффективное распределение ресурсов, минимизация потерь или максимизация общей полезности. Аукцион – это механизм, при котором множество агентов (участников) конкурируют за право получить некоторый товар или услугу для максимизации своей выгоды. Ожидаемый результат аукциона зависит от того, какие стратегии выберут участники, а также от правил аукциона, которые могут быть разными. Целью аукционов является не только определение победителя, но и эффективное распределение ресурсов, что в свою очередь требует

разработки таких механизмов, которые обеспечат желаемое поведение участников, например, максимизацию общей полезности или минимизацию затрат.

Существует несколько типов аукционов, каждый из которых может быть эффективен в различных сценариях:

1. Аукцион с открытыми ставками (английский аукцион). Ставки постепенно увеличиваются, и участники продолжают торговаться до тех пор, пока не останется только один победитель.

2. Аукцион с закрытыми ставками (голландский аукцион). Участники подают свои ставки в закрытой форме, и победителем становится тот, кто предложит наибольшую ставку (в случае аукциона на товар) или наименьшую (например, для лотов с низкой ценой). Часто используется в многократных раундах торгов.

3. Аукцион с равными предложениями (взаимный аукцион). Несколько участников подают свои предложения, и объект аукциона распределяется на основе наилучшего совокупного предложения. Этот тип используется для распределения ограниченных ресурсов.

4. Аукцион с системой бонусов и штрафов (аукцион с компенсацией): в таких аукционах участники могут получать бонусы или подвергаться штрафам в зависимости от выполнения или невыполнения определенных условий. Например, это может быть связано с выполнением сроков или качеством предоставляемых услуг.

В сетях IoT аукционы могут быть использованы для управления доступом к каналам связи между огромным количеством устройств. Каждое устройство может участвовать в аукционе, предлагая свою ставку за доступ к каналу связи, и затем получая доступ на основе своей ставки. Или же ценовые стимулы для поддержания кооперации между устройствами из разных сетевых доменов. С точки зрения теории игр, аукционы анализируются с целью нахождения равновесия Нэша, поскольку аукционные механизмы должны быть спроектированы так, чтобы все участники имели стимул предлагать честные ставки и не манипулировать процессом.

4. Методы консенсуса.

4.1. Алгоритм распределенного консенсуса Raft. Raft – это алгоритм достижения распределенного консенсуса, который обеспечивает согласованность данных в кластере узлов. Он работает по следующим ключевым принципам: один из узлов становится лидером и управляет синхронизацией, в то время как остальные узлы действуют как последователи. Лидер принимает изменения состояния и реплицирует их на последователей, гарантируя согласованность. Если лидер выходит из строя, узлы проводят перевыборы и продолжают работу, обеспечивая отказоустойчивость системы [9].

Использование Raft в сетях с ультранизкой задержкой имеет несколько преимуществ. Он обеспечивает быструю синхронизацию между узлами с минимальными накладными расходами. Даже при сбое некоторых узлов система продолжает функционировать, что делает её отказоустойчивой. Кроме того, этот алгоритм масштабируем и позволяет координировать сотни и тысячи устройств в сети.

Несмотря на все преимущества, у Raft есть и ограничения. В динамических средах с высокой мобильностью узлов частая смена лидеров может вызывать кратковременные потери связи. Лидер обрабатывает все изменения, что может стать узким местом и увеличить нагрузку на центральный узел. Кроме того, в сетях с крайне низкими задержками, таких как URLLC, даже небольшие накладные расходы на синхронизацию могут оказаться критичными.

Заключение

Стремительное развитие IoT и мобильных каналов связи нового поколения выявило ключевые проблемы, связанные с эффективностью взаимодействия множества подключенных устройств.

Как показал анализ, традиционные подходы к управлению сетевыми ресурсами становятся неэффективными в условиях экспоненциального роста числа IoT-устройств. Разработанные мультиагентные алгоритмы, сочетающие методы машинного обучения и теорию игр, демонстрируют принципиально новые возможности динамического распределения ресурсов, адаптации к изменяющейся нагрузке и предотвращения коллизий.

MULTI-AGENT CHANNEL ACCESS ALGORITHMS FOR MOBILE COMMUNICATION (5G, FUTURE 6G) FOR DELAY MINIMIZATION IN THE INTERNET OF THINGS (IOT) ENVIRONMENT

N.V. KHAJYNAVA, M.A. SAVANEUSKAYA, V.V. STALIAROVA, L.A. CHERNIKAVA

Abstract. This study analyzes multi-agent channel access algorithms in 5G and future 6G networks to minimize delays in Internet of Things (IoT) devices. Traditional access methods, their limitations, and improved algorithms based on machine learning and game theory are considered. The focus is on optimizing access control algorithms and reducing response time for IoT devices.

Keywords: multi-agent systems, channel access, 5G, 6G, Internet of Things, delay minimization, machine learning, game theory.

Список литературы

1. Что такое Интернет вещей (Internet of Things, IoT) // Amazon Web Services (AWS). – URL: <https://aws.amazon.com/ru/what-is/iot> (дата обращения: 03.04.2025).
2. 5 ключевых фактов о Wi-Fi 6G и 5G // Traffic Inspector Next Generation. – URL: <https://www.smart-soft.ru/blog/5-kljuchevyh-faktov-o-wi-fi-6-i-5g> (дата обращения: 03.04.2025).
3. Gokhale P., Bhat O., Bhat S. // Introduction to IOT. 2018. P. 41–44.
4. Shanshan L., Li Da X., Shanshan Zh. // 5G Internet of Things: A survey. 2018. P. 1–9.
5. Jian N., Во T., Srikant R. // Q-CSMA: Queue-Length-Based CSMA/CA Algorithms for Achieving Maximum Throughput and Low Delay in Wireless Networks. 2012. Vol. 20. P. 825 - 836.
6. CSMA/CA // АйТи-ВиАр Групп. – URL: <https://it-wr.ru/support/spravochnik/technology/ссмаса> (дата обращения: 03.04.2025).
7. Watkins C., Datan P. // Q-Learning. 1992. P. 281–285.
8. Tianzhe J., Xiaoyue F., Chaopeng G., Dongqi W., Jie S. // Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for Efficient Computation Offloading in Mobile Edge Computing, 2023. P. 3585-3603.
9. Xiaohong D., Zhiwei Y., Weizhi X., Kangting L., Huiwen L. // A novel Raft consensus algorithm combining comprehensive evaluation partitioning and Byzantine fault tolerance. 2024. Vol. 80. P. 26363–26393.

IMPACT OF COLOR SPACE ON NEURAL NETWORKS

Y.M. CHEN, V.YU. TSVIATKOU

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

Received April 4, 2025

Abstract. The choice of color space can significantly affect the performance and interpretability of neural networks in image-based tasks, but its impact remains underexplored in many deep learning applications. This study investigates how different color representations (such as RGB, HSV, LAB, and YCbCr) affect the accuracy and convergence speed of convolutional neural networks (CNNs). Through systematic experiments on benchmark datasets, we evaluate the effectiveness of these color spaces in classification and semantic segmentation tasks. Experimental results show that when using single color space on tasks like classification and semantic segmentation, traditional RGB still has its advantages.

Keywords: color space, neural network, ResNet, U-Net

Introduction

Color is a fundamental aspect of visual data, yet the choice of color representation in neural networks is often overlooked, with RGB being the default in most frameworks. However, different color spaces encode information in different ways—giving priority to brightness, chromaticity, or perceptual uniformity—which can significantly affect model performance [1]. While convolutional neural networks (CNNs) excel on image tasks such as classification and segmentation, their sensitivity to illumination variations, noise, and texture details raises questions about whether alternative color spaces (e.g., HSV, LAB, YCbCr) can improve robustness or efficiency. Existing work has mainly focused on architectural innovations, while the role of color spaces has been understudied. In this paper, we systematically evaluate the impact of RGB, HSV, LAB, and YCbCr on the performance of CNNs in tasks such as object detection and segmentation. Through experiments on benchmark datasets, we analyze the accuracy, convergence speed, and generalization ability under different conditions.

Color spaces are mathematical models that define how colors are represented numerically, each emphasizing distinct aspects of color perception (e.g., brightness, contrast, or hue) [2]. The choice of color space directly shapes how neural networks extract and interpret visual features, as different representations highlight or obscure patterns in images [3]. For instance, a space that isolates brightness might simplify tasks in varying lighting conditions, while one preserving color relationships could enhance object recognition.

RGB is the most popular color space being used. It is typically implemented using 24-bit representation, with 8 bits allocated to each of the R (Red), G (Green), and B (Blue) channels. This configuration yields a value range of 0 to 255 per channel per pixel. This color space is based on the principle that all colors can be represented through mixing varying intensities of red, green, and blue.

HSV (Hue, Saturation, Value) is a perceptually oriented color space designed to align with human visual perception. It parameterizes color information in three dimensions: hue (spectral color), saturation (color purity), and value (brightness intensity). The hue component spans a circular range from 0° to 360°, while saturation and value are quantized in the range of 0 to 255.

The CIE LAB color space is a device-independent model designed to reflect human vision. It separates lightness (L) from color components (A for green–red, B for blue–yellow), making it useful for accurate color comparison, correction, and analysis across applications. To convert from RGB to LAB, the process involves two main steps: first convert RGB to XYZ, then XYZ to LAB [4].

YUV, YCbCr, and YPbPr are complementary color spaces. They have a luma channel and two chroma channels, represented in a complementary fashion (usually red to green, blue to yellow). YUV, YPbPr, and YCbCr are color spaces commonly used for television transmission. YCbCr is commonly used to encode digital color information in video and still image transmission and compression technologies such as JPEG and MPEG.

Experiments and Results

In this study, we conducted empirical experiments on two different tasks to evaluate the impact of color space choice on computer vision performance: image classification and semantic segmentation. Four popular color spaces widely used in the field of computer vision and their impact on neural network performance were studied: RGB, HSV, LAB, and YCbCr. Performance was evaluated through two quantitative metrics:

1. Task-specific accuracy (classification accuracy and segmentation Dice score).
2. Computational efficiency during training (epoch convergence rate, epoch time consume).

For the classification task, we employed a pretrained ResNet-18 convolutional neural network (CNN) with transfer learning, then fine-tuning the model on the Intel Image Classification benchmark dataset. We've tested RGB, HSV, LAB, YCbCr on this model.

As illustrated in Figure 1 plot (a), the results demonstrate that RGB achieved the highest accuracy (94,4 %), outperforming HSV (93,0 %) and YCrCb (92,8 %). In contrast, LAB lagged significantly with the lowest accuracy (20,8 %). The analysis also reveals that the choice of color space impacts computational efficiency during training as shown in plot (b): datasets trained with RGB required the shortest average epoch time, while LAB incurred the longest training time per epoch. YCrCb and HSV exhibited nearly identical epoch times, though YCrCb showed greater variability across training iterations. Furthermore, plots (c) and (d) in Figure 1 indicate comparable convergence speeds across all color spaces. However, the validation loss for LAB diverged markedly from the others, exceeding the plot's scale, which underscores its poor performance relative to RGB, HSV, and YCrCb.

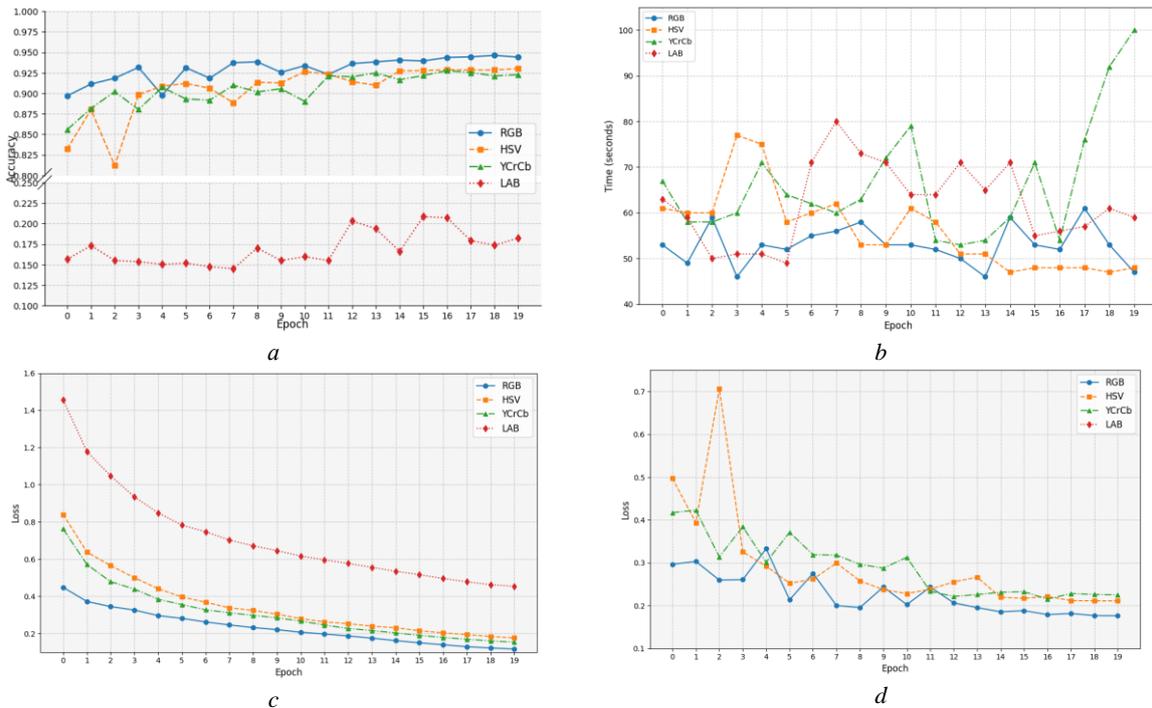


Figure 1. Comparison across color spaces by each epoch of classification task: *a* – accuracy; *b* – time consume; *c* – train loss; *d* – validation loss

For segmentation, we employed the U-Net architecture using a publicly available PyTorch framework and trained it on the Dynamic Earth Net dataset [5], which provides high-resolution multi-spectrum satellite imagery with multi-class annotations. As shown in Figure 2 plot (a), RGB achieved the highest Dice score (0,518), closely followed by YCrCb (0,514) and HSV (0,511), while LAB

performed significantly worse (0,449). The experiment also highlights the impact of color space on training efficiency. Plot (b) reveals that RGB and HSV inputs required nearly identical epoch times, whereas LAB trained the fastest and YCrCb was the slowest. Notably, YCrCb exhibited greater variability in epoch duration across iterations. Plot (c) further demonstrates disparities in convergence behavior: LAB and YCrCb inputs struggled to converge, while RGB and HSV showed similar convergence speeds.

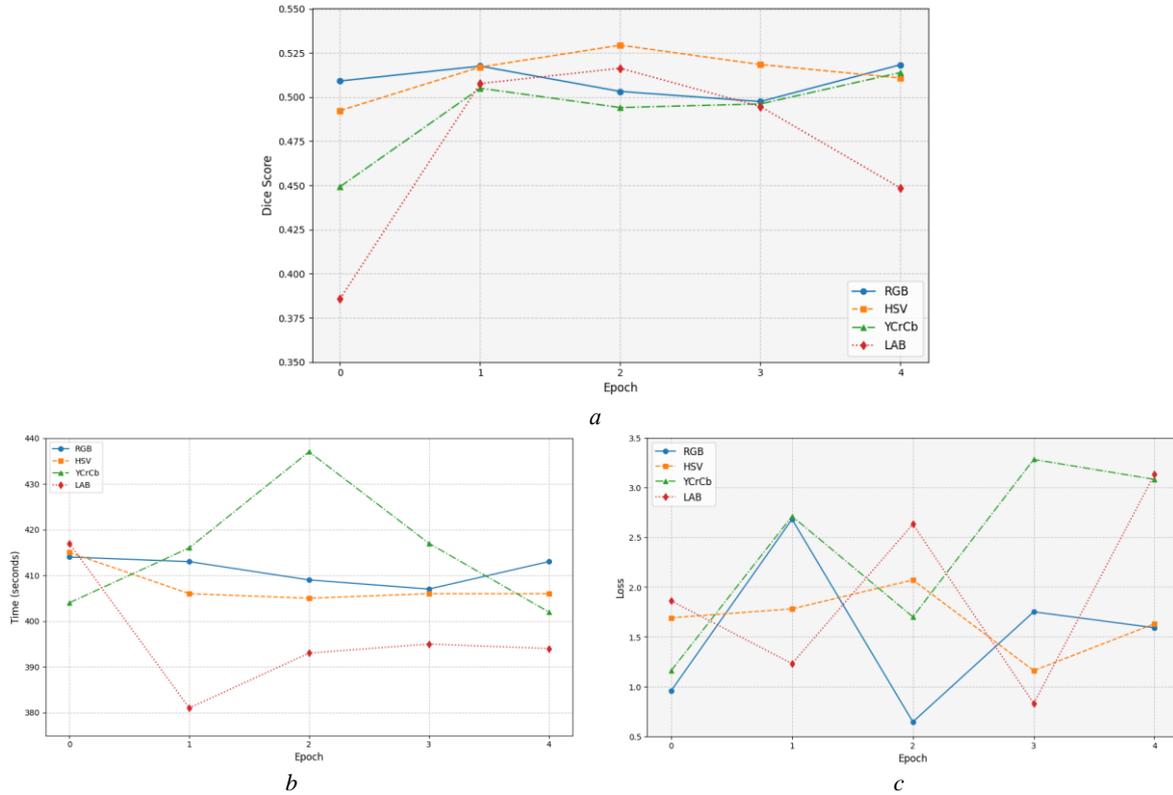


Figure 2. Comparison across color spaces by each epoch of semantic segmentation task: *a* – dice score; *b* – time consume; *c* – train loss

The analysis of color spaces in classification and semantic segmentation tasks reveals the performance and efficiency trade-offs. For classification, RGB consistently provides superior accuracy and computational efficiency (shortest epoch time), while LAB exhibits significantly worse accuracy and longer training time, with a completely different validation loss. Similarly, in segmentation, RGB achieves the highest Dice score, outperforming HSV and YCrCb, while LAB again lags behind. Notably, LAB exhibits inconsistent computational behavior: it trains fastest for segmentation but slowest for classification, suggesting task-related efficiency differences. In both tasks, YCrCb exhibits high epoch time variability and convergence challenges, especially in segmentation. While HSV strikes a balance between moderate accuracy and stable training time, RGB emerges as the most reliable choice overall, combining strong performance, efficient training, and consistent convergence. These findings highlight the importance of color space choice in improving accuracy and computational resource allocation for specific tasks.

Conclusion

This study evaluates the performance of RGB, HSV, LAB, and YCbCr color spaces for CNN-based image classification and segmentation. Experiments on ResNet-18 and U-Net architectures show that RGB consistently outperforms other options when using only one color space, achieving the highest accuracy (94,4 %) and Dice score (0,518) through efficient training. LAB exhibits task-dependent inefficiencies (slowest for classification, fastest for segmentation) and poor accuracy, while YCrCb exhibits unstable convergence and variable training time. HSV balances moderate performance and stability, but lags behind RGB.

The results highlight the robustness of RGB as the default choice for most tasks, likely due to the architectural optimization of neural networks for raw pixel correlation. LAB or HSV may be suitable for niche scenarios where computational speed (segmentation) or illumination invariance is prioritized. Future work should explore hybrid representations or domain-specific adaptation. This work highlights color space as a critical but overlooked hyperparameter for optimizing vision models.

References

1. Gowda, S.N., Yuan, C. // *Computer Vision–ACCV 2018*. 2018. P. 581–596.
2. Ibraheem, N. A., et al. // *ARNP Journal of science and technology*. 2012. Vol. 2. P. 265–275.
3. Taye, M. M. // *Computation*. 2023. Vol. 11. P. 52.
4. Nishad, P. M. // *Journal of global research in computer science*. 2013. Vol. 4. P. 44–48.
5. Toker, A., et al. // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2022. P. 21158–21167.

РЕИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛЮДЕЙ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАНИЯ ПРИЗНАКОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ ФИГУРЫ И ЛИЦА

Н.А. ТОМАШЕВИЧ, Р.П. БОГУШ, С.А. ИГНАТЬЕВА

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 4 апреля 2025

Аннотация. В статье предлагается алгоритм повторной идентификации людей в системах, который использует дескриптор для описания особенностей человека на основе нейросетевых признаков его лица и фигуры. Для описания фигуры человека используются глобальный и три локальных нейросетевых дескриптора, которые характеризуют верхнюю, среднюю и нижнюю части изображения. Предложенный подход обеспечивает высокую точность реидентификации при возможности идентификации человека по лицу и позволяет выполнять повторную идентификацию в случае скрытых лиц и частей фигуры человека. Представлены результаты экспериментов по оценке точности реидентификации с использованием предложенного алгоритма.

Ключевые слова: сверточные нейронные сети, идентификация по лицу, дескриптор, ResNet, PolReID

Введение

Непрерывное совершенствование технологий в области компьютерного зрения и машинного обучения позволяет успешно решать все больший объем различных прикладных задач. Среди них реидентификация людей, предполагающая поиск человека по запросу на основе его изображения [1], которая востребована во многих областях включая: мониторинг общественных пространств, например, супермаркетов для анализа предпочтений клиентов и оптимизации обслуживания; розыск пропавших людей даже при частичном закрытии лица или некотором изменении внешнего вида; в управлении транспортными потоками в аэропортах, вокзалах и других транспортных узлах системы реидентификации для анализа перемещения людей с целью предотвращения перегрузок каналов перемещения. Стремительное внедрение систем видеонаблюдения и, соответственно, увеличение объема доступной видеoinформации также свидетельствуют о востребованности и актуальности создания эффективных алгоритмов реидентификации людей. Для этого могут быть использованы подходы, основанные на признаках лица, которые демонстрируют высокую точность в условиях, когда оно не закрыто масками, головными уборами или другими объектами, а человек смотрит в видеокамеру. Однако такие условия не всегда обеспечиваются при мониторинге. Например, в общественных местах люди часто носят очки, шляпы или капюшоны, что значительно снижает эффективность алгоритмов распознавания человека по лицу. Методы реидентификации, основанные на признаках изображения всего тела человека, менее подвержены влиянию скрытия лица. В работе [2] представлены результаты исследований, которые показали, что размытие лица человека незначительно влияет на результат реидентификации, когда она выполняется по признакам изображения всего тела человека. Однако, точность реидентификации при таком подходе может значительно уменьшиться из-за изменчивости внешнего вида человека, например, когда один и тот же человек сменил одежду, аксессуары и в других случаях, когда его общие признаки существенно изменяются, или обнаружены два человека в одинаковой одежде [3]. В настоящее время активно развиваются алгоритмы реидентификации, предложено ряд подходов для повышения точности [4, 5], в том числе и с использованием анализа признаков лиц [6], однако

максимально возможное значение не достигнуто, а в сложных указанных случаях точность низкая. Таким образом, учитывая недостатки каждого из существующих подходов, комбинирование признаков лица и признаков фигуры человека в алгоритме реидентификации людей представляет собой перспективное направление исследований для повышения точности решения указанной задачи.

Формализация алгоритма реидентификации людей на основе признаков фигуры и лица

Разработан алгоритм реидентификации людей, который использует дескриптор для описания особенностей человека на основе признаков его лица и фигуры. Первоначально выполняется обнаружение людей на кадрах видеопоследовательностей и описание области ограничительной рамкой. Затем определяются ключевые точки для изображений каждого человека и формируются глобальные и локальные признаки. В пределах ограничительной рамки выполняется поиск лица, оценивается направление взгляда человека: если он смотрит в видеокамеру, то формируются признаки лица, которые используются для формирования групп людей при реидентификации, а если нет, то реидентификация выполняется на основе признаков фигуры человека на изображении. Таким образом, алгоритм предполагает выполнение следующих шагов обработки для каждого кадра видеопоследовательности:

1. Обнаружение людей на кадре с использованием сверточной нейронной сети (СНС) YOLOv7, формирование ограничивающей рамки локализованной области (A_p) и ключевых точек ($A_1 - A_7$) для каждого человека. Следующие шаги выполняются для каждого обнаруженного человека.

2. Вычисление по ключевым точкам ограничивающих рамок верхней, нижней и средней части человека, и формирование советуемых масок для них (M_T, M_M, M_B). В случае, если какая-то из указанных областей скрыта и не может быть локализована, то маска заполняется нулями и вектор признаков такой области не используется в дальнейшем анализе. Список локализованных областей сохраняется в булевы переменные (E_T, E_M, E_B). Далее определяется возможность использования глобального признака на основе выражения

$$E_p = (E_T \wedge E_M \wedge E_B) \quad (1)$$

3. Для извлечения признаков используется сверточная нейронная сеть DenseNet-121, на вход которой подаётся часть изображения, содержащаяся внутри ограничительной рамки (A_p) и масок (M_T, M_M, M_B). На выходе формируется общий вектор признаков F изображения фигуры человека размером 2048 элементов: F_p (глобальный дескриптор), F_T (дескриптор верхней части), F_M (дескриптор средней части), F_B (дескриптор нижней части).

4. Обнаружение лица в локализованной области. Следует отметить, что лицо считается найденным только тогда, когда все указанные ниже условия успешно выполняются.

4.1. На основе ключевых точек A_1 (нос), A_2 (левый глаз), A_3 (правый глаз), A_4 (левое ухо), A_5 (правое ухо) определяется примерная область лица. Данный шаг не позволяет получить точную локализованную область, но приводит к сокращению вычислительных затрат при последующей обработке. При этом уверенность для точек ($A_1 - A_3$) должна быть не ниже 0,5, а для A_4 или A_5 пороговая величина равна 0,2.

4.2. Если уверенность СНС при обнаружении A_4 больше, чем A_5 , то $A_{ear} = A_4$, $A_{eye} = A_2$, иначе $A_{ear} = A_5$, $A_{eye} = A_3$.

4.3. Проверяется, смотрит ли человек в сторону камеры. Для этого вычисляются расстояние D_{ear} между точками A_{ear} и A_{eye} и расстояние D_{nose} между точками A_1 и A_2 . Проверяется условие

$$\frac{D_{nose}}{D_{ear}} > 0,9 \quad , \quad (2)$$

если данное условие выполняется, принимается решение, что человек смотрит в камеру и признаки лица могут быть сформированы и использованы при реидентификации.

4.4. Используется СНС MTCNN для получения более точной ограничивающей рамки лица B_{face} .

5. Для B_{face} применяется СНС buffalo_1 от InsightFace, в результате формируется вектор L из 512 признаков лица.

6. Назначается номер группы вектору признаков следующим образом:

6.1. Составляется массив S из векторов признаков на заданном расстоянии от F_p из хранящихся в древовидной структуре данных T .

6.2. Составляется массив векторов признаков S_{free} из имеющихся в S векторов, которым не назначена группа.

6.3. Подсчитывается количество векторов в S , которое принадлежит каждой группе.

6.4. Выбирается группа S_{group} , которой принадлежит наибольшее количество векторов.

6.5. Если количество принадлежащих массиву S_{free} векторов больше, чем принадлежащих группе S_{group} , то:

6.5.1. Проверяется условие: количество не принадлежащих ни к одной группе векторов больше или равно заданной пороговой величине.

6.5.2. Если условие 6.5.1 выполняется, то создаётся новая группа S_{group} и назначается текущему вектору признаков, а также каждому вектору из S_{free} .

6.5.3. Если условие 6.5.1 не выполняется, то вектор не имеет назначенной группы.

6.6. Если количество векторов в S_{free} меньше, чем в S_{group} , то:

6.6.1. Вектору F_p назначается группа S_{group} .

6.6.2. Находящиеся в S_{free} вектора удаляются из дерева T , чтобы избежать создания новых групп рядом с существующей.

6.7. Новый вектор добавляется в T .

7. Если были сформированы признаки лица L на шаге 5, этому вектору назначается группа, при этом используется тот же алгоритм, что и для признаков всего изображения.

8. Возвращается уникальный идентификатор по признакам лица для текущего изображения человека.

9. Если были сформированы признаки лица на шаге 5 и для них назначена группа на шаге 7, возвращается номер группы, к которой они были добавлены;

10. Иначе, если на шаге 6 назначена группа по признакам всего изображения и, хотя бы одно изображение в данной группе имеет уникальный идентификатор, то возвращается данный идентификатор.

Результаты исследований

Эксперименты выполнены на видеопоследовательностях, полученных с различных камер видеонаблюдения, на которых зафиксированы одни и те же люди, но в разной одежде и в разное время. Сравнение предложенного алгоритма реидентификации, использующего признаки лиц и фигуры человека, с алгоритмом, использующим только признаки фигуры человека выполнено на базе изображений PolReID_990, которая была получена на основе набора из [7], из которой были исключены изображения людей, лица которых в масках. Количество изображений для обучения не изменялось по сравнению PolReID_1077, уменьшено на количество изображений различных людей на 87 для тестирования. В результате в галерее 15020 изображений, а в качестве запросов использовалось 1633 изображения. Следует отметить, что каждая группа может содержать множество изображений одного и того же человека, полученных в разное время, а

также изображения этого человека, полученные в разных местах в такой же одежде. Сложность реидентификации возрастает в случае смены одежды или значительного скрытия части изображения человека другими объектами. На рис. 1 показаны результаты разбиения на группы людей в таких случаях.



Рис. 1. Примеры разделения изображений на группы для сложных случаев

Пример распределения людей по группам на основе признаков изображений лиц и фигур людей показан на рис. 2, анализа которого свидетельствует о повышении эффективности такой процедуры. Например, получено правильное объединение групп «0», «2», «9», «4», «7», «13», «11», «12», «15» из рис. 1.



Рис. 2. Примеры объединения людей в группы с учетом признаков лица: а, в, д – изображения лиц идентифицированных людей; б, г, е – объединенные группы

Известно, что оценка эффективности реидентификации людей чаще всего проводится на основе анализа метрик включающая RankN и mAP. Метрики RankN показывают процент от числа запросов, для которых был получен правильный ответ среди первых N результатов. В результате экспериментов для разработанного алгоритма рассчитана метрика Rank1, оценивающая процент запросов, для которых идентификатор первого изображения-кандидата совпадает с идентификатором запроса

$$Rank1 = \frac{|^1Q|}{q}, \quad (3)$$

где $|^1Q|$ - количество запросов, для которых верное решение совпадает с первым выданным результатом; q – общее число запросов.

Результаты экспериментов показали, что на базе данных PolReID алгоритм реидентификации на основе признаков изображения фигуры человека характеризуется метрикой Rank1= 96,6 %, применение разработанного алгоритма позволяет получить значение данной метрики Rank1=97,64 %. Таким образом предложенный алгоритм является перспективным для реидентификации людей в распределённых системах видеонаблюдения.

Заключение

В работе предложен новый алгоритм реидентификации, который требует формирования нейросетевого дескриптора из 2048 значений для изображения фигуры человека, а также получения нейросетевого дескриптора из 512 значений для описания изображения лица. За счет этого достигается увеличение точности при возможности распознавания лиц и обеспечивается реидентификация людей при скрытых лицах на основе анализа признаков изображений их фигур. Выполненные эксперименты на наборе данных PolReID_990 подтвердили эффективность предложенного алгоритма, достигнуто увеличение значения метрики Rank1.

PERSON RE-IDENTIFICATION IN SURVEILLANCE IMAGES BASED ON COMBINATION OF BODY AND FACE FEATURES

N.A. TOMASHEVICH, R.P. BOHUSH, S.A. IHNATSYEVA

Abstract. The paper proposes an algorithm for re-identification of people in systems that uses a descriptor to describe human features based on neural network features of their face and figure. A global and three local neural network descriptors are used to describe a person's figure. The proposed approach ensures high accuracy of re-identification when it is possible to identify a person by face and allows re-identification in the case of hidden faces and parts of a person's figure.

Keywords: convolutional neural networks, face identification, descriptor, ResNet, PolReID

Список литературы

1. Chen H., Ihnatsyeva S. A., Bohush R. P., Ablameyko S.V. // Automation and Remote Control. 2023. Vol. 84, № 5. P. 497–528.
2. Dietlmeier J., Antony J., McGuinness K., O'Connor N.E. // Proc. of ICPR. 2021. P.6 912-6919.
3. Arkushin D., Cohen B., Peleg S., Fried O. // Proc. of. WACVW.2024. P. 143-153.
4. Ye S., Bohush R., Ihnatsyeva S., Ablameyko S.V. // Optical memory and Neural Network. 2023. № 4. P. 233–246.
5. Bohush R., Ihnatsyeva S., Ablameyko S. // Machine Graphics and Vision. 2022. № 31 (1/4). P. 93–109.
6. Singh N.K., Khare M., Bharadwaj H., Jethva H.B. // International Journal of Computer Applications. 2024.Vol.186, №28. P. 21-29.
7. Игнатъева С. А., Богуш Р. П. // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 87–95.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ ДАННЫХ

И.В. ВЕРГЕЛЬ, С.Н. БАРСУКЕВИЧ, С.А. МИГАЛЕВИЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 20 марта 2025

Аннотация. Рассматриваются современные подходы к сжатию данных, включая традиционные алгоритмы и методы, основанные на искусственном интеллекте. Анализируются преимущества и недостатки различных технологий, их вычислительная сложность, степень сжатия и применимость к разным типам данных. Внимание уделяется нейросетевым методам, таким как сверточные нейронные сети, генеративные состязательные сети и языковые модели. Приведено сравнение эффективности различных алгоритмов на основе тестирования сжатия текстовых данных.

Ключевые слова: алгоритмы сжатия данных, искусственный интеллект, нейронные сети

Введение

Сжатие данных является одной из ключевых технологий в современной информатике, позволяющей эффективно хранить, передавать и обрабатывать большие массивы данных. С развитием цифровых технологий объемы данных, генерируемых ежедневно, достигли невероятных масштабов. По оценкам экспертов, в 2025 году мировой объем данных может составить 175 зеттабайт (1 зеттабайт = 10^{21} байт), что создает огромную нагрузку на системы хранения и передачи информации. В таких условиях сжатие данных становится не просто полезным инструментом, а необходимостью для обеспечения устойчивости цифровой инфраструктуры. Традиционные методы сжатия достигли значительных успехов, однако с ростом объемов данных возникла необходимость в более совершенных подходах.

Современные подходы к сжатию данных

Сжатие данных – это ключевая технология, которая позволяет эффективно хранить и передавать информацию. Эта технология делится на два ключевых направления: восстановление данных в исходном виде и обработка с частичным удалением информации. При сжатии без потерь данные восстанавливаются в исходном виде после распаковки, что особенно важно для текстов, программного кода и медицинских изображений. Сжатие с потерями, напротив, жертвует частью данных, но это обычно остается незаметным для пользователя, особенно в мультимедийных файлах, таких как изображения, аудио и видео.

Традиционные методы сжатия, такие как алгоритмы Хаффмана, LZ77 или JPEG, основаны на математических преобразованиях и статистических моделях. Они эффективны, но часто не учитывают семантику данных, что ограничивает их потенциал. Кроме того, многие из этих алгоритмов работают медленно из-за итеративного подхода, который не позволяет эффективно использовать параллельные вычисления.

Искусственный интеллект (ИИ) предлагает революционные подходы к сжатию данных, которые превосходят традиционные методы по степени сжатия и качеству восстановления. Нейронные сети, особенно сверточные нейронные сети (CNN), активно применяются для сжатия изображений. Они анализируют структуру изображения, выделяют важные детали и удаляют избыточную информацию с минимальными потерями качества. Основным принципом работы CNN

в сжатии изображений заключается в том, что сеть проходит через слои свертки и пуллинга, выделяя значимые признаки и понижая разрешение входных данных, а затем использует декодирующую часть для восстановления изображения. Например, алгоритмы на основе ИИ могут достигать сжатия изображений в 10 раз эффективнее, чем JPEG, при сохранении визуально приемлемого качества.

Генеративные модели, такие как Generative Adversarial Networks (GAN), используются для восстановления данных после сжатия с потерями. Генератор создает данные, а дискриминатор оценивает их качество, позволяя восстанавливать данные с минимальными потерями. GAN работают на основе конкурентного обучения: генератор пытается создать изображения, похожие на исходные, а дискриминатор учится отличать реальные изображения от сгенерированных. Этот процесс приводит к улучшению качества восстановленных данных и делает GAN незаменимыми в задачах, где важна визуальная точность.

Для текстового сжатия нейронные языковые модели, такие как GPT и BERT, предсказывают следующие слова и удаляют избыточные данные, что позволяет достигать высокой степени сжатия без потери смысла. Эти модели работают на основе трансформерной архитектуры, где механизм внимания позволяет анализировать длинные зависимости в тексте и учитывать контекст при кодировании и декодировании информации. Такие алгоритмы способны адаптироваться под специфику текста, будь то научная статья, художественная литература или техническая документация.

В таблице 1 приведены ключевые отличия традиционных и ИИ-алгоритмов.

Табл. 1. Ключевые отличия традиционных алгоритмов и ИИ-алгоритмов

Аспект	Традиционные алгоритмы	ИИ-алгоритмы
Основа метода	Статистические модели или математические преобразования.	Нейросетевые модели, обученные на данных.
Адаптивность	Фиксированные правила, не адаптируются к специфике данных.	Могут адаптироваться под конкретные типы данных.
Степень сжатия	Ограничена predetermined шаблонами	Выше за счет семантики и сложных закономерностей.
Вычислительная сложность	Низкая.	Высокая.
Восстановление данных	Точное восстановление только при сжатии без потерь.	Возможность восстановления утраченных деталей.

Одним из ключевых преимуществ ИИ-алгоритмов является их способность находить сложные закономерности в данных и оптимизировать их хранение. Например, нейронные сети могут анализировать контекст изображения или текста, что позволяет им более эффективно сжимать информацию.

Однако у ИИ-методов есть и свои недостатки. Для их обучения и работы необходимы мощные графические процессоры (GPU) или тензорные процессоры (TPU), которые способны выполнять параллельные вычисления с высокой скоростью. Это особенно важно для задач, связанных с обработкой изображений, видео и текстов, где объемы данных могут быть чрезвычайно большими. Для эффективного использования ИИ-алгоритмов в реальном времени требуется оптимизация их работы на устройствах с ограниченными ресурсами, таких как мобильные устройства или встраиваемые системы.

Сложность алгоритмов делает их менее прозрачными по сравнению с традиционными методами. Нейронные сети, используемые для сжатия, могут непреднамеренно сохранять или восстанавливать конфиденциальную информацию, что создает риски утечки данных. Например, генеративные модели, такие как GAN, могут восстанавливать детали изображений, которые были намеренно удалены. Это требует разработки новых методов защиты данных, таких как дифференциальная приватность и шифрование на этапе сжатия. Это может вызывать вопросы в областях, где важна интерпретируемость, например, в медицине или юриспруденции.

Также недостатком ИИ-алгоритмов является их чрезвычайно высокая энергозатратность. Обучение сложных нейронных сетей требует огромных вычислительных ресурсов, что приводит к потреблению сотен мегаватт-часов электроэнергии – сопоставимо с энергопотреблением небольшого города. Эта проблема усугубляется тенденцией к увеличению масштабов моделей, где число параметров достигает сотен миллиардов, что влечет за собой экспоненциальный рост энергопотребления и выбросов углекислого газа.

Сравнение эффективности алгоритмов сжатия текстовых данных

Для анализа эффективности алгоритмов сжатия текстовых данных обратимся к результатам тестирования, сравнив ключевые параметры: степень сжатия, скорость работы и вычислительную сложность. Это позволит понять, насколько традиционные алгоритмы уступают современным подходам на основе ИИ.

Традиционные алгоритмы сжатия, такие как GZIP, BZIP2 и LZMA, остаются популярными благодаря своей простоте, высокой скорости и низкой вычислительной сложности. Однако они значительно уступают ИИ-подходам в степени сжатия и адаптивности. Например, алгоритм GZIP, основанный на методе DEFLATE, сжимает данные до ~35% от исходного размера, что является хорошим результатом для повседневных задач, но недостаточным для работы с большими объемами данных.

Современные ИИ-алгоритмы, такие как LSTM (Long Short-Term Memory) и CM (Context Mixing), демонстрируют более высокую степень сжатия, достигая ~12% и ~11% от исходного размера соответственно. Это стало возможным благодаря использованию нейронных сетей, которые анализируют семантику текста и находят сложные закономерности, недоступные для традиционных методов.

В таблице 2 приведены результаты сравнения эффективности различных алгоритмов.

Табл. 2. Сравнение эффективности алгоритмов

Алгоритм	Степень сжатия	Скорость сжатия	Вычислительная сложность
PAQ8	~15% от исходного размера	Очень медленная	Очень высокая
GZIP	~35% от исходного размера	Быстрая.	Низкая
BZIP2	~25% от исходного размера	Средняя	Средняя
LZMA	~20% от исходного размера	Медленная	Высокая
ZSTD	~30% от исходного размера	Очень быстрая	Низкая
PPMd	~18% от исходного размера	Медленная	Высокая
Tr	~15% от исходного размера	Быстрая	Высокая
CM	~11% от исходного размера	Быстрая	Высокая
LSTM	~12% от исходного размера	Быстрая	Высокая

Традиционные алгоритмы сжатия остаются актуальными благодаря своей простоте и скорости, но значительно уступают ИИ-подходам в степени сжатия и адаптивности. Например, GZIP, ZSTD и LZ4 идеально подходят для задач, где важна скорость обработки, таких как передача данных в реальном времени, сжатие логов или потоковое сжатие мультимедийных данных. Эти алгоритмы используют метод кодирования LZ77 или его вариации, обеспечивая хорошее сжатие при высокой скорости декомпрессии.

Однако для задач, требующих максимальной степени сжатия, например, архивирования больших текстовых баз данных, более эффективны ИИ-алгоритмы, такие как LSTM, Transformer-based модели и контекстные смещающие алгоритмы (CM). Эти методы используют нейросетевые подходы для моделирования вероятностей появления символов или слов, что позволяет добиться более высокой степени компрессии по сравнению с традиционными методами. Тем не менее, высокая вычислительная сложность ИИ-алгоритмов и требовательность к данным и ресурсам ограничивают их применение на маломощных устройствах и в реальном времени.

Одним из ключевых преимуществ ИИ-алгоритмов является их способность адаптироваться к специфике данных. Например, LSTM может эффективно сжимать тексты на естественных языках, учитывая их грамматическую структуру и семантику, что недоступно для традиционных методов. Аналогично, алгоритмы на основе трансформеров могут строить сложные языковые модели, анализируя контекст слов и предложений, что позволяет уменьшать избыточность данных.

Кроме того, эффективность алгоритмов может варьироваться в зависимости от типа текстовых данных. Например, для сжатия технической документации с высокой избыточностью лучше подходят традиционные методы, такие как LZMA или BZIP2, поскольку они эффективно обрабатывают повторяющиеся последовательности символов. В то время как для художественных текстов с богатой семантикой более эффективны ИИ-алгоритмы, способные учитывать сложные языковые структуры и предсказывать вероятностное распределение слов.

Стоит также отметить развитие гибридных методов сжатия, комбинирующих традиционные алгоритмы и нейросетевые подходы. Например, алгоритмы типа PAQ, которые используют контекстное смешивание и статистическое моделирование, демонстрируют высокую степень сжатия, приближенную к ИИ-методам, при этом оставаясь более доступными

по вычислительным требованиям. Подобные гибридные модели могут найти широкое применение в системах хранения данных, облачных сервисах и распределенных вычислениях.

Заключение

ИИ-алгоритмы сжатия данных предлагают значительные преимущества по сравнению с традиционными методами, включая более высокую степень сжатия и адаптивность к различным типам данных. Однако их применение требует значительных вычислительных ресурсов, что создает проблемы с энергопотреблением и экологией. Для выбора подходящего алгоритма сжатия необходимо учитывать тип данных, требования к скорости, степени сжатия и качеству восстановления. Для текстовых данных с высокими требованиями к степени сжатия подходит LSTM или трансформеры. Для изображений и мультимедиа: CNN, GAN. Для задач с ограниченными вычислительными ресурсами: GZIP, ZSTD. Дальнейшее развитие ИИ-алгоритмов сжатия данных будет связано с оптимизацией их энергопотребления, повышением безопасности и разработкой новых стандартов для обработки больших объемов информации.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS TO OPTIMIZE DATA COMPRESSION ALGORITHMS

I.V. VERGHEL S.N. BARSUKEVICH S.A. MIGALEVICH

Abstract. Modern approaches to data compression, including traditional algorithms and methods based on artificial intelligence, are considered. The advantages and disadvantages of various technologies, their computational complexity, compression ratio, and applicability to different types of data are analyzed. Attention is paid to neural network methods such as convolutional neural networks, generative adversarial networks, and language models. The effectiveness of various algorithms based on text data compression testing is compared.

Keywords: data compression algorithms, artificial intelligence, neural networks

Список литературы

1. Qi Wu, David Bauer, Michael J. Doyle, Kwan-Liu Ma // Instant Neural Representation for Interactive Volume Rendering. 2022. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2207.11620v1>. Дата доступа: 11.02.2025.
2. В. В. Кудинов, О. К. Сапрыкин // Вопросы электромеханики. 2024. Том 201 №4 с. 37-41. Режим доступа: <https://jurnal.vniiem.ru/text/201/37-41.pdf>. Дата доступа: 11.02.2025.
3. М.А. Шарапов., А.В. Левенец // Информационные Технологии XXI Века. 2023. с 71-74. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_53737268_90436074.pdf. Дата доступа: 10.02.2025.
4. Large Text Compression Benchmark [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://matthhoney.net/dc/text.html>. Дата доступа: 11.02.2025.
5. Neha Sharma, Usha Bhatra // EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems. 2020. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/339742479_Performance_analysis_of_compression_algorithms_for_information_security_A_Review. Дата доступа: 10.02.2025.

УДК 621.391

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ОБЪЕДИНЕНИЯ АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ С НАИЛУЧШИМИ ВЕСОВЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

А.А. ШВАЯ¹, А.Д. РОБАЧЕВСКИЙ¹, М.Ю. ЛОВЕЦКИЙ¹, И.И. ЛЕВОНЕНКО^{1,2},
В.В. ЧЕПИКОВА¹

1 – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь,
2 – ОАО «Пеленг», Республика Беларусь

Поступила в редакцию 18 февраля 2025

Аннотация. В данной статье исследуется альтернативный метод объединения изображений, полученных из нескольких параллельных синхронных измерительных каналов атомного силового микроскопа (АСМ), с целью повышения качества детализации отдельных областей результирующего изображения. Предложен алгоритм, основанный на корреляционной зависимости двух изображений и размерах объектов в отдельных областях. Для определения размера объектов используется алгоритм сегментирования SRG (Seeded Region Growing)

Ключевые слова: локальная корреляционная метрика, взвешенное сложение, SRG, оценка качества комбинирования изображений.

Введение

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) использует параллельные синхронизированные измерительные каналы, поэтому для более точного анализа поверхности материала необходимо использовать объединение компонентных АСМ-изображений, а также их корреляционную зависимость для оценки качества результирующего АСМ-изображения. Это значительно упрощает визуальный анализ, в отличие от других известных методов, например [1, 2].

Существует множество известных метрик [3–6], позволяющих оценить качество изображения, однако для АСМ-изображений наилучшим образом подходит метрика, основанная на локальной корреляции [7]. Здесь вычисление размера окна локальной корреляционной метрики приводит к крайне низкой скорости обработки. В [8] описан метод, повышающий скорость определения размера рассматриваемого окна, который в дальнейшем и будет использоваться.

Целью работы является разработка и реализация алгоритма объединения АСМ-изображений, обеспечивающего высокое качество результирующего изображения.

Оценка качества комбинирования АСМ-изображений на основе коэффициента локальной корреляции

Для оценки качества конечного изображения применяется локальная корреляционная метрика $D_L(k)$, для которой необходимо найти коэффициенты локальной корреляции $r_L(A, B)$ двух АСМ-изображений.

Коэффициенты локальной корреляции $r_L(A, B)$ вычисляется по формуле

$$r_L(A, B, p) = \frac{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} |a(y, x) - a_L(y, x, p)| |b(y, x) - b_L(y, x, p)|}{\sqrt{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (a(y, x) - a_L(y, x, p))^2 \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (b(y, x) - b_L(y, x, p))^2}}, \quad (1)$$

где $a_L(y, x, p), b_L(y, x, p)$ – средние значения яркостей пикселей в окрестности пикселя с координатами (y, x) и размерами $p \times p$ пикселей изображений А и В соответственно, $a_L(y, x, p) = \frac{1}{p^2} \sum_{j=0}^p \sum_{i=0}^p a(y+j, x+i)$, $b_L(y, x, p) = \frac{1}{p^2} \sum_{j=0}^p \sum_{i=0}^p b(y+j, x+i)$.

Для определения размера окна, используемого для вычисления локальной корреляционной метрики, будут учитываться преобладающие размеры сегментов, выделяемых на компонентных АСМ-изображениях с помощью параллельного выращивания областей локальных экстремумов (SRG).

Локальная корреляционная метрика $D_L(k)$ вычисляется по формуле

$$D_L(k) = \frac{r_L(M_c, M_1, k) + r_L(M_c, M_2, k)}{|r_L(M_c, M_1, k) - r_L(M_c, M_2, k)| r_L(M_1, M_2, 0, 5)}. \quad (2)$$

С помощью метрики (2) можно определить наилучшее значение k . Для этого осуществляется перебор всех возможных значений коэффициентов k в диапазоне $[0; 1]$ с шагом 0,01 (для повышения производительности алгоритма можно уменьшить диапазон или увеличить шаг).

Из рис. 1 можно увидеть, что на гистограммах размеров областей имеется не один экстремум, а сами эти области хаотично расположены по всему изображению. Это все необходимо учитывать для достижения наилучшего качества результирующего АСМ-изображения. Альтернативный алгоритм объединения АСМ-изображений делит изображения на отдельные области (блоки), для дальнейшей обработки и выявления наилучшего коэффициента k .

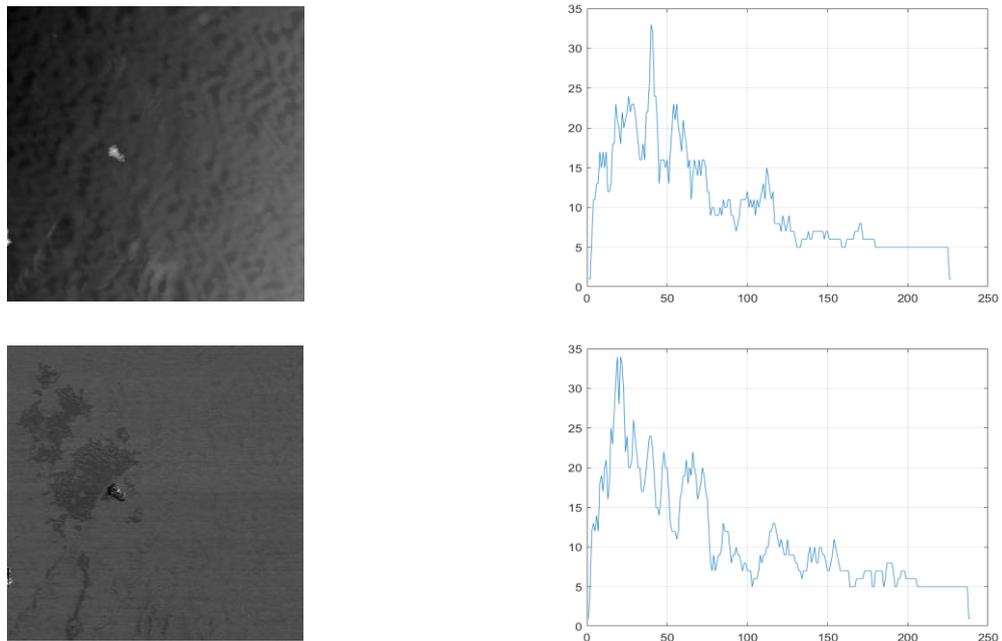


Рис. 1. Компонентные АСМ-изображения и гистограммы размеров их областей

Алгоритм поблочного SRG слияния АСМ-изображений

В ходе исследований рассматривается каждая область (блок) изображения как отдельная часть и определяется для нее наилучший коэффициент k , при котором $D_L(k)$ будет достигать максимальных значений. Шаг смещения блока будет равен его размеру. Перед началом вычислений необходимо провести сегментацию изображений методом SRG. Поскольку мы разбиваем изображение на области, возникает неточность с нахождением размера p окна, так как размеры сегментов, расположенных на границах рассматриваемой области, могут быть обрезаны и, следовательно, неверно определены. Есть два способа решения данной проблемы: алгоритм, который не будет учитывать сегменты, части которых выходят за границы рассматриваемой области; и алгоритм, который на основе целого изображения рассчитывает размеры всех сегментов, выходящих за границы рассматриваемой области изображения. В ходе исследований будет использоваться второй метод.

В зависимости от размеров рассматриваемого блока, на гистограмме размеров областей могут появляться несколько явных экстремумов, что вызывает необходимость исследовать каждый из них. Из-за этого явления на один блок приходится несколько коэффициентов p . Необходимо провести данные операции на двух АСМ-изображениях.

В результате получается набор разных коэффициентов p , для каждого из которых необходимо найти наибольшее значение $D_L(k)$ при переборе коэффициентов k . На конечном этапе объединения двух блоков выбирается значение k , при котором $D_L(k)$ было максимальным. На рис. 2 приведены примеры результирующего изображения при разных размерах блоков.

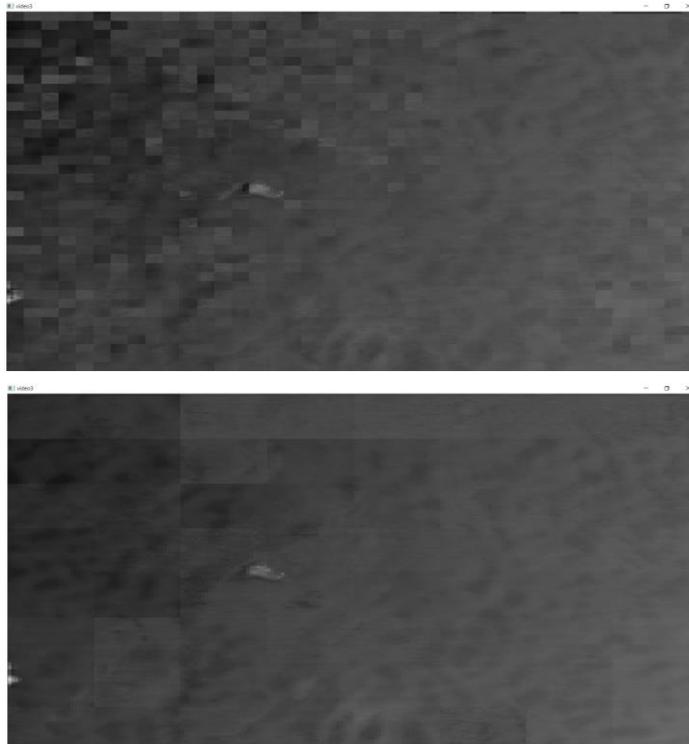




Рис. 2. Результирующие АСМ-изображения при размере блока: 5, 25, 50

Заключение

Для эффективной работы алгоритма необходимо подбирать оптимальный размер блока. При слишком маленьком размере рассматриваемой области наблюдается аномалия, вызванная слишком малым количеством сегментов для корректного анализа.

При больших размерах блоков на рассматриваемой области наблюдается избыток сегментов, что также приводит к некачественному анализу данного блока.

Дальнейшая апробация алгоритма предполагает выбор оптимальных размеров блоков в соответствии с размерами деталей, а также текстур на протяженных фрагментах исследуемого изображения.

IMAGE QUALITY IMPROVEMENT BASED ON THE ALGORITHM OF COMBINING AFM IMAGES WITH THE BEST WEIGHT COEFFICIENTS

A.A. SHVAYA, A.D. ROBACHEVSKI, M.Yu. LAVETSKI, I.I. LIAVONENKA,
V.V. CHEPIKOVA

Abstract. This article explores an alternative method of combining images obtained from several parallel synchronous measuring channels of an atomic force microscope (AFM) in order to improve the quality of detail of individual areas of the resulting image. An algorithm based on the correlation dependence of two images and the size of objects in separate areas is proposed. A segmentation algorithm is used to determine the size of objects SRG (Seeded Region Growing).

Keywords: local correlation metric, weighted addition, SRG, image combination quality assessment.

Список литературы

1. Jifeng S., Yuanjiao J., Shaoyong Z. // Proceedings of the SPIE International Conference on Space Information Technology. 2008. Vol. S98S. P. 739-744.
2. Zhang A.K., Dare. Y.P. // ISPRS Journal of Photogrammetric and Remote Sensing. 2007. Vol.62, No. 4. P.249-263.
3. Piella G., Heijmans H. // Proceedings International Conference on Image Processing (Cat. No.03CH37429). 2003. P. 111-173.
4. Qu G., Zhang D., Yan P. // Opt. Express. 2001. Vol. 9. P. 184-190.
5. Aslantas V., Bendes E. // AEU – International Journal of Electronics and Communications. 2015. P. 1890-1896.
6. Han Y., Cai Y., Cao Y., Xu X. // Inf. Fusion. 2013. Vol. 14. No. 2. P. 127–135.
7. Petrovic V., Xydeas C. // Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05). 2005. Vol. 1, P. 1866-1871.
8. Взвешенное сложение АСМ-изображений на основе локальной корреляции с учетом размеров их областей = Weighted composition of AFM images based on local correlation with account the sizes of their areas / М. Ю. Ловецкий [и др.] // Технологии передачи и обработки информации : материалы Международного научно-технического семинара, Минск, апрель 2024 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: В. Ю. Цветков [и др.]. – Минск, 2024. – С. 5–10.

УДК 621.391

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ С НЕПРЕРЫВНЫМ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

ПЬАЕ ПЬИО ХЛАЙНГ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь**Поступила в редакцию 28 февраля 2025*

Аннотация. Разработана структура и основные соотношения для математической модели малогабаритной радиолокационной станции с непрерывным частотно-модулированным излучением. Приведены отдельные результаты моделирования.

Ключевые слова: математическая модель, радиолокационная станция, алгоритм обработки, частотно-модулированное излучение, непрерывный сигнал.

Введение

Радиолокационные станции (РЛС) с непрерывным частотно-модулированным излучением (НЧМИ) находят широкое применение при обнаружении воздушных объектов на относительно небольших расстояниях (вертолетов, беспилотных летательных аппаратов), в качестве РЛС контроля летного поля, охраны сельскохозяйственных районов и водных акваторий, обнаружения проникновения на охраняемые периметры, в качестве автомобильных РЛС предупреждения столкновений и адаптивного круиз-контроля и т.д. [1].

Важным преимуществом таких РЛС является возможность достижения высокой разрешающей способности по дальности порядка 0,5...1 м при относительно невысоких аппаратных затратах [3, 4]. Это определяется принципом построения указанных РЛС, при котором сигнал разностной частоты формируется на выходе смесителя путем перемножения принимаемого сигнала и излучаемого зондирующего сигнала. При типичных значениях периода повторения мс, ширины спектра зондирующего сигнала (девиации частоты) 50...300 МГц и максимальной дальности действия при обнаружении воздушных объектов порядка 3 км максимальная разностная частота составит 500 кГц...12 МГц. Преобразование такого сигнала в цифровую форму и его обработка не вызывает трудностей. При этом обработка сигналов в указанной полосе частот проводится в подсистеме цифровой обработки, в основном, на основе процедур одномерного и двумерного быстрого преобразования Фурье [3, 4].

На характеристики РЛС с НЧМИ оказывает влияние большое число факторов и погрешностей реализации: линейность закона изменения частоты зондирующего сигнала, характеристики согласования антенн на передачу и на прием, уровень просачивающегося сигнала передатчика, частота дискретизации, разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП), динамический диапазон приемного тракта и подсистемы цифровой обработки и т.д. Для выбора параметров составных частей РЛС, оптимизации обработки и исследования эффективности РЛС с НЧМИ при обнаружении различных радиолокационных целей необходимо использовать математическое моделирование. Это требует разработки достаточно полной модели РЛС с НЧМИ с учетом особенностей реализации составных частей указанной РЛС.

Цель статьи – обоснование структуры и основных соотношений математической модели РЛС с НЧМИ.

Структура моделируемой РЛС с НЧМИ

Обобщенная структурная схема моделируемой РЛС приведена на рис. 1.

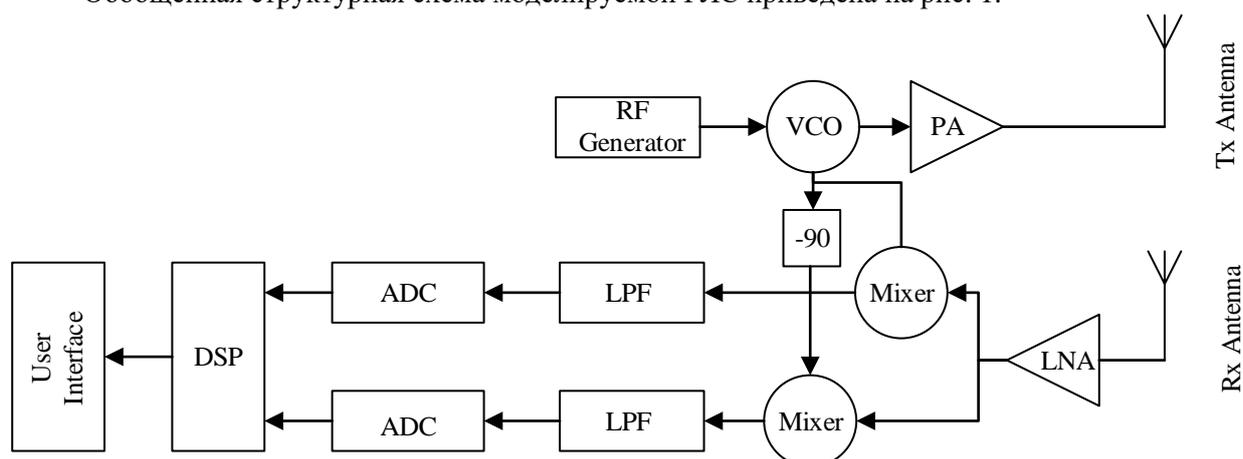


Рис. 1. Типовая структура РЛС с НЧМИ

На рис. 1 показаны: RF Generator формирует непрерывный зондирующий сигнал, частота которого линейно изменяется во времени; VCO (Voltage-Controlled Oscillator) позволяет модулировать частоту сигнала радара; напряжение, подаваемое на VCO, определяет его выходную частоту, обеспечивая частотную развертку, характерную для радара FMCW; PA (Power Amplifier) – усилитель мощности; TX antenna – передающая антенна; Rx antenna – приемная антенна; LNA (Low Noise Amplifier) – малошумящий усилитель; Mixer – смеситель для переноса сигнала на промежуточную частоту (ПЧ); LPF (Low Pass Filter) – низкочастотный фильтр, который пропускает только желаемые частотные компоненты сигнала ПЧ, отфильтровывая высокочастотные шумы и помехи; ADC (Analog-to-Digital Converter) преобразует отфильтрованный аналоговый сигнал ПЧ в цифровой формат, позволяя обрабатывать его с помощью алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС); DSP (Digital Signal Processing) – цифровой сигнальный процессор, который выполняет различные типы анализа цифрового сигнала для извлечения полезной информации. Это включает определение расстояния до цели, скорости объекта (с помощью анализа доплеровского сдвига) и других соответствующих параметров. Алгоритмы обработки также могут фильтровать и улучшать сигнал для лучшей идентификации цели.

Радиолокационная система, использующая непрерывное частотно-модулированное (FM) излучение, работает, передавая непрерывный зондирующий сигнал, частота которого изменяется со временем. Эта модуляция может принимать форму линейного увеличения или уменьшения частоты, создавая эффект «чирпа». РЛС принимает отраженный сигнал, частота которого сигнала будет отличаться от переданной частоты в зависимости от расстояния до цели и задержки времени, возникшей во время передачи и приема. РЛС может определять расстояние до объекта на основе частоты биений, которая представляет собой разницу между переданным и принятым сигналами. Затем эта информация может быть дополнительно обработана для извлечения дополнительной информации о цели, такой как ее скорость и направление.

Структура и основные соотношения компьютерной модели РЛС с НЧМИ

Разработка компьютерной модели требует воспроизведения функционирования составных частей РЛС и распространения сигналов, взаимосвязи между которыми приведены на рис. 2. На рис. 3 приведена обобщенная структурная схема компьютерной модели РЛС с НЧМИ.

Компьютерная модель включает следующие модули: модуль формирования зондирующего сигнала (Probing Signal Module); модуль моделирования функционирования приемной и передающей или единой приемно-передающей антенны (Module for simulating the operation of a receiving and transmitting or a single receiving and transmitting antenna) позволяет моделировать передачу и прием сигналов, включая влияние диаграмм направленности антенн; модуль формирования отраженного сигнала с учетом угловых рысканий радиолокационных

целей (Module for generating a reflected signal taking into account the angular yaw of radar targets) генерирует сигналы, которые имитируют отражения, полученные от радиолокационных целей, в модуле учитываются угловые рыскания (вращение вокруг осей) цели, которые определяют флуктуации отраженного сигнала; модуль формирования мешающих отражений от подстилающей поверхности (Module for generating interfering reflections from the underlying surface) имитирует нежелательные отражения, создаваемые поверхностью под радиолокационной системой.

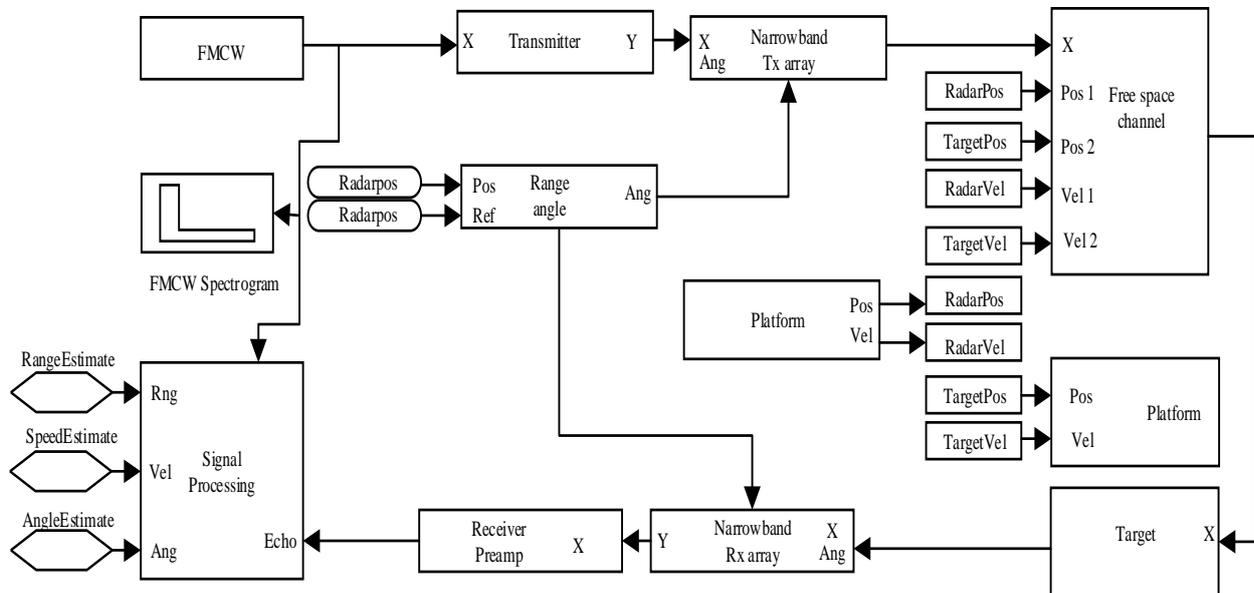


Рис. 2. Взаимосвязи между составными частями РЛС и внешней средой, воспроизводимые в компьютерной модели

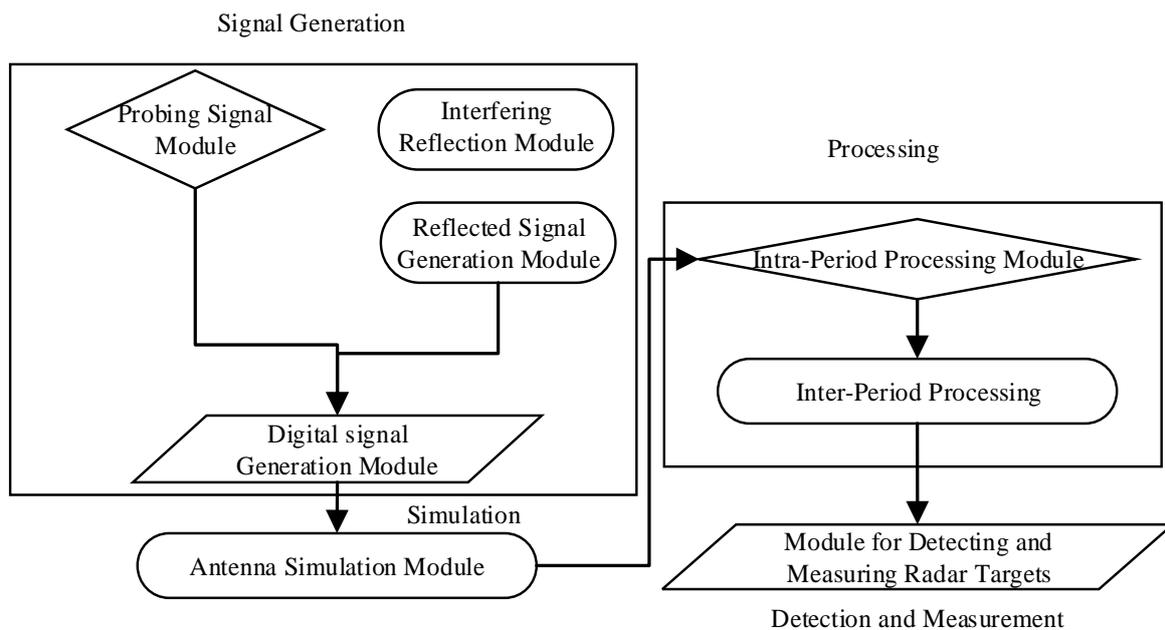


Рис. 3. Структура компьютерной модели приемного тракта РЛС с НЧМИ

Модуль формирования цифрового сигнала разностной частоты (Module for generating a digital difference frequency signal) создает цифровой сигнал, представляющий разницу между переданным и принятым сигналами, что облегчает анализ доплеровских сдвигов и других явлений, связанных с частотой; модуль внутрипериодной обработки (Module for intra-period processing) реализует когерентное накопление отраженных сигналов в пределах одного периода повторения; модуль междупериодной обработки (Module for inter-period processing) реализует

когерентное накопление в разных периодах повторения; модуль обнаружения, измерения дальности и угловых координат радиолокационных целей (Module for detecting, measuring the range and angular coordinates of radar targets) реализует алгоритмы обнаружения целей на основе отраженных сигналов. Он будет вычислять дальность (расстояние) до цели, анализируя временную задержку принятых сигналов, и измерять угловые координаты (пеленг и угол места) на основе ориентации радара и анализа сигнала.

Основные расчетные соотношения модулей компьютерной модели следующие.

Закон изменения фазы закона модуляции зондирующего сигнала для случая несимметричного пилообразного закона изменения частоты определяется выражением

$$\varphi_{tr}(t) = \text{mod} \left(\frac{\pi \Delta f_0}{T_r} \left(t - T_t \left[\frac{t}{T} \right] \right)^2 + \varphi_{\text{det}}(t) + \varphi_{\text{rnd}}(t) + \arg \left(\dot{S}_{21}^{(tr)} \left(f_0 + \frac{\Delta f_0}{T_r} \text{mod}(t, T_r) \right) \right), 2\pi \right), \quad (1)$$

где $\varphi_{\text{det}}(t), \varphi_{\text{rnd}}(t)$ – детерминированная и случайная составляющая закона изменения фазы зондирующего сигнала; $\dot{S}_{21}^{(tr)}$ – частотно-зависимый элемент матрицы рассеяния тракта передатчика, определяющий комплексный коэффициент передачи по амплитуде от передатчика к антенне; f_0 – начальная несущая частота.

При моделировании детерминированная составляющая закона изменения фазы задается в виде периодической функции с периодом T_r , совпадающим с периодом повторения. Эту составляющую удобно задавать в виде ряда Фурье. Случайная составляющая – гауссовый случайный процесс с заданной корреляционной функцией $R_\varphi(t) = \sigma_\varphi^2 r_\varphi(t)$.

Фаза сигнала разностной частоты на выходе смесителя вычисляется согласно выражения

$$\varphi_i(t) = \frac{4\pi}{\lambda_0} r_i(t) + \varphi_{tr}(t) - \varphi_{tr} \left(t - \frac{2r_i(t)}{c} \right) - \arg \left(\dot{S}_{21}^{(r)} \left(f_0 + \frac{\Delta f_0}{T_r} \text{mod}(t, T_r) \right) \right), \quad (2)$$

где $\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$ – длина волны зондирующего сигнала для начальной несущей частоты; $r_i(t)$ – закон

изменения дальности между фазовым центром антенны РЛС и i -ой точечной целью. $\dot{S}_{12}^{(r)}$ – частотно-зависимый элемент матрицы рассеяния приемного тракта РЛС, определяющий комплексный коэффициент передачи по амплитуде от приемной антенны к МШУ.

Закон изменения амплитуды принимаемого сигнала с учетом частотной зависимости коэффициентов передачи задается в виде

$$A_i(t) = U_i(t) \cdot \left| \dot{S}_{21}^{(tr)} \left(f_0 + \frac{\Delta f_0}{T_r} \text{mod}(t, T_r) \right) \right| \cdot \left| \dot{S}_{21}^{(r)} \left(f_0 + \frac{\Delta f_0}{T_r} \text{mod}(t, T_r) \right) \right|, \quad (3)$$

где U_i – амплитуда принимаемого сигнала, определяемая эффективной отражающей поверхностью (ЭОП) σ_i точечной цели, дальностью до нее и зависимостями коэффициентов усиления передающей и приемной антенн в направлении на точечную цель во времени

$$U_i(t) = \sqrt{\frac{P_{tr}^{\max} G_{tr}^{\max} G_{tr}^H(\alpha_a(t) - \alpha_i) G_r^{\max} G_r^H(\alpha_a(t) - \alpha_i) \lambda^2 \sigma_i \gamma_{\text{тр}}}{(4\pi)^3 r_i^4(t)}}, \quad (4)$$

где G_{tr}^{\max} , G_r^{\max} – коэффициенты усиления передающей и приемной антенны; $G_{tr}^H(\alpha), G_r^H(\alpha)$ – нормированные ДН передающей и приемной антенн; $\gamma_{\text{тр}}$ – коэффициент суммарных потерь в трактах на передачу и на прием; α_i – угловое положение точечной цели; $\alpha_a(t)$ угловое

положение максимума ДН по азимуту, определяемое начальным значением α_{a0} и скоростью V_α сканирования по азимуту $\alpha_a(t) = \text{mod}(\alpha_{a0} + V_\alpha t, 2\pi)$.

Разность $\alpha_a(t) - \alpha_i$ в (4) вычисляется в пределах $[-\pi, \pi]$.

Отраженный сигнал от точечной цели

$$\dot{F}_i(t) = A_i(t)e^{j\varphi_i(t)}. \quad (5)$$

Отраженные сигналы от сложных радиолокационных целей и мешающие отражения от земной поверхности моделируются в виде суммы сигналов от точечных целей

$$\dot{F}_\Sigma(t) = \sum_{i=1}^{N_t} A_i(t)e^{j\varphi_i(t)} + \sum_{k=1}^{N_{mo}} \dot{\xi}_k(t)B_k(t)e^{j(\psi_k(t)+\vartheta_k)}, \quad (6)$$

где N_t – число «блестящих» точек в модели радиолокационной цели; N_{mo} – число точечных целей, имитирующих отражения от земной поверхности; $B_k(t)$ – закон изменения амплитуды отраженного сигнала для k -ой блестящей точки земной поверхности; ϑ_k – собственная фаза коэффициента отражения от k -ой блестящей точки земной поверхности; $\dot{\xi}_k(t)$ – комплексная огибающая сигнала от k -ой блестящей точки земной поверхности, обусловленная ее движением под действием ветра.

Для формирования отраженного сигнала от протяженной радиолокационной цели используется модель в виде совокупности блестящих точек на «жестком» каркасе без учета упругих колебаний конструкции. Для этой модели задаются координаты и ЭОП блестящих точек радиолокационной цели, координаты центра масс цели и углы поворота строительных осей цели относительно декартовой системе координат. Фазы коэффициента отражения от блестящих точек приняты равными нулю. Эти блестящие точки совершают независимые угловые рыскания по курсу, крену и тангажу с заданной корреляционной функцией вида

$$R_i(\tau) = D_i e^{-\frac{\tau^2}{T_i^2}} \cos \frac{\pi\tau}{2\tau_i}, \quad (7)$$

где D_i – дисперсия углового отклонения по соответствующему параметру; τ_i, T_i – параметры функции корреляции, определяющие частоту колебаний и время затухания угловых рысканий, причем $T_i = (5...10)\tau_i$. Для типовых аэродинамических радиолокационных целей (самолетов) $\tau_i = 1...5$ с при $\sqrt{D_i} = (1...2)$ для курса и крена и в $3...5$ раз для тангажа [5].

Блестящие точки земной поверхности задаются на концентрических окружностях (рис. 4) с угловым расстоянием между точками на концентрических окружностях $\delta\alpha = \frac{\Delta\alpha}{10...20}$, где $\Delta\alpha$ – ширина главного лепестка ДН антенны РЛС в азимутальной плоскости и расстоянием между окружностями $\delta r = \frac{c}{(4...6)\Delta f_0}$.

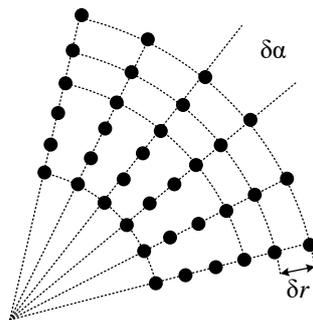


Рис. 4. К расстановке блестящих точек при расчете мешающих отражений от подстилающей поверхности

Таким образом, на каждый элемент разрешения РЛС по азимуту будет приходиться 10...20 точечных целей, что дает возможность адекватно моделировать флуктуации мешающих отражений из-за вращения антенны. Аналогично, на каждый элемент разрешения по дальности будет приходиться достаточное число точечных отражателей со случайными начальными фазами.

Эффективная отражающая поверхность (ЭОП) точечного отражателя при имитации отраженного сигнала определяется во формуле

$$\sigma_{\text{то}} = \frac{r\Delta r\Delta\alpha\sigma_{\text{уд}}}{N_r N_\alpha}, \quad (8)$$

где $\sigma_{\text{уд}}$ – удельная ЭОП земной поверхности; N_r, N_α – число точечных отражателей на элемент разрешения РЛС по дальности и азимуту, соответственно, при типовых значениях $N_r = 1...3; N_\alpha = 5...10$. Собственные начальные фазы коэффициента отражения от блестящих точек подстилающей поверхности являются равномерно распределенными случайными числами в диапазоне $[0; 2\pi]$.

Принимаемый сигнал зададим в виде

$$\dot{S}(t) = \dot{F}_{\text{пр}}(t) + \dot{F}_\Sigma(t) + \dot{N}(t), \quad (9)$$

где $\dot{F}_{\text{пр}}(t)$ – паразитный сигнал передатчика, просачивающийся в приемник; $\dot{N}(t)$ – комплексный гауссовский шум с равномерной в пределах полосы пропускания приемника спектральной плотностью мощности.

Паразитный сигнал передатчика, просачивающийся в приемник, зададим в виде

$$\dot{F}_{\text{пр}}(t) = A_{\text{пр}} \cdot e^{j\varphi_{\text{пр}}(t)}; \varphi_{\text{пр}}(t) = \varphi_{tr}(t) - \varphi_{tr}(t - t_{\text{пр}}), \quad (10)$$

где $A_{\text{пр}}$ – амплитуда просачивающегося сигнала, определяемая уровнем развязки приемника и передатчика; $t_{\text{пр}}$ – время задержки просачивающегося сигнала, определяемое электрической длиной и другими параметрами антенно-фидерного тракта. Согласно (9) $\dot{F}_{\text{пр}}(t)$ – низкочастотный (сотни Гц – единицы кГц) сигнал с типовым значением амплитуды, существенно (на 60...80 дБ) превышающим среднеквадратическое значение собственных шумов приемника РЛС.

Расчет сигнала на выходе АЦП проводится в следующем порядке. Принимаемый сигнал (8) пропускается через входной аналоговый фильтр (на выходе смесителя) – фильтр верхних частот с импульсной характеристикой $\dot{V}(\tau)$; за счет этого происходит существенное ослабление просачивающегося сигнала и сигнала от мощных сигналов от земной поверхности вблизи от РЛС; выходной сигнал указанного фильтра определяется интегралом свертки (технически интеграл свертки вычисляется в дискретном виде без квантования сигнала по уровню)

$$\dot{Y}(t) = \int_0^t \dot{S}(\tau)\dot{V}(t - \tau)d\tau; \quad (11)$$

из выходного сигнала $\dot{Y}(t)$ путем квантования по уровню и разделения на периоды повторения

формируется матрица $\dot{U}_{m,k} = \left[\frac{1}{\Delta_{\text{adc}}} \dot{Y} \left(\frac{m-1}{F_s} + (k-1)T_r \right) \right]$ дискретных отсчетов сигналов, где

$m = \overline{1, M}$ – номер отсчета в пределах периода повторения, $M = [T_r F_s]$; k – номер периода повторения; Δ_{adc} – цена младшего разряда АЦП; F_s – частота дискретизации.

Вычисление выходного сигнала системы обработки проводится в следующем порядке.

Отсчеты сигнала для каждого периода повторения умножаются на отсчеты w_{D_m} оконной функции по дальности для уменьшения уровня боковых лепестков откликов сигналов от целей или местных предметов с большой ЭОП по дальности

$$\dot{U}_{w_{m,k}} = \dot{U}_{m,k} w_{D_m}, \quad m = \overline{1, M}. \quad (12)$$

Полученная матрица отсчетов \mathbf{U}_w дополняется нулями таким образом, чтобы число строк соответствовало степени 2.

Выполняется внутрипериодная обработка, то есть БПФ по столбцам матрицы \mathbf{U}_w с формированием матрицы отсчетов спектров принимаемых сигналов в разных периодах повторения

$$\mathbf{G}_U = FFT(\mathbf{U}_w). \quad (13)$$

Дальнейшая обработка является многоканальной по азимуту:

– для k -го периода повторения, то есть для момента времени $t_k = kT_r$ и азимута максимума ДН антенны в этот момент времени $\alpha_a(kT_r)$ из матрицы отчетов спектра \mathbf{G}_U

выделяется $L = \left\lceil \frac{\Delta\alpha}{V_a T_r} \right\rceil$ столбцов (периодов повторения) с номерами $k - \frac{L}{2} \dots k + \frac{L}{2}$; эти столбцы

заносятся в матрицу \mathbf{G}_k ;

– строки этой матрицы поэлементно умножаются на оконную функцию по скорости w_{V_ℓ} , $\ell = \overline{1, L}$;

– выполняется дискретное преобразование Фурье (ДПФ) по строкам матрицы \mathbf{G}_k и вычисляются квадраты модулей отсчетов ДПФ в результате чего формируется матрица \mathbf{Z}_k откликов «дальность – скорость» для заданного углового направления.

Обнаружение целей и грубое измерение углового положения, дальности и скорости сводится к нахождению локальных максимумов, превысивших заданный порог

$$\hat{k}, \hat{m}, \hat{\ell} = \arg \max_{k,m,\ell} Z_k(m, \ell). \quad (14)$$

Далее проводится уточнение указанных оценок путем аппроксимации отклика в окрестности максимума.

Пример результатов моделирования РЛС с НЧМИ

Приведенная выше компьютерная модель реализована в MatLab. Пример получаемых при моделировании результатов приведен на рис. 5.

РЛС имела период повторения 1 мс при ширине спектра сигнала 150 МГц и ширине главного лепестка 10° . Радиолокационная цель с ЭОП 10 м^2 находилась на дальности 1200 м. Земная поверхность имела удельную ЭОП $0,01 \text{ м}^2/\text{м}^2$. Отражения от земной поверхности моделировались на участке длиной 100 метров. Оконная функция по дальности не использовалась, оконная функция по скорости – Кайзера-Бесселя при уровне боковых лепестков -60 дБ . Вид сигнала на выходе ВПО определяется отражениями от земной поверхности и оконной обработкой (спадание к краям). На полученном изображении матрицы «дальность-скорость» хорошо виден участок с отражениями от земной поверхности (скорости около нуля) и сигнал от радиолокационной цели.

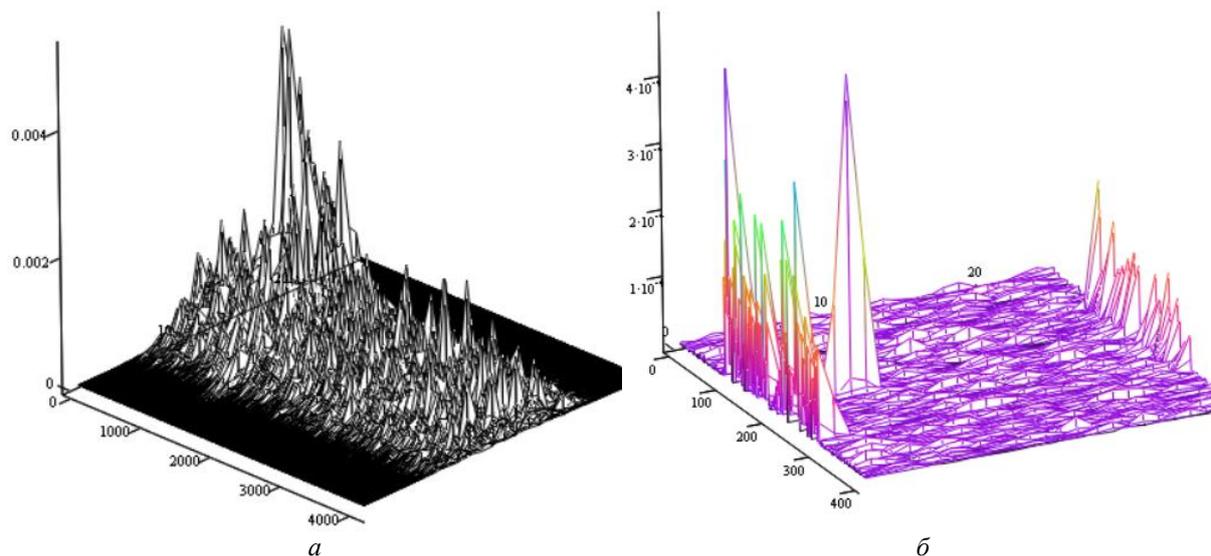


Рис. 5. Результаты моделирования: *a* – матрица квадратов модулей отсчетов на выходе ВПО для всей дальности; *б* – матрица отсчетов на выходе обработки в окне по дальности относительно цели 400 отсчетов

Закл^ючение

Разработанная компьютерная модель учитывает основные особенности построения РЛС с НЧМИ и может быть использована для выбора рациональных параметров и исследования эффективности функционирования указанных РЛС в различных условиях.

COMPUTER MODEL OF A RADAR STATION WITH CONTINUOUS FREQUENCY-MODULATED RADIATION

PYAE PHYU HLAING

Abstract. The structure and basic relationships for the mathematical model of a small-sized radar station with continuous frequency-modulated radiation are developed. Individual modeling results are presented.

Keywords: mathematical model, radar station, processing algorithm, frequency-modulated radiation, continuous signal.

Список литературы

1. Winkler V. Range Doppler Detection for Automotive FMCW Radars / Proceedings of the 4th European Radar Conference, 2007. P. 216.
2. Marvin N. Cohen, Allan J. Nathanson, Lila H. Nathanson, Janice N. Smith, J. Patrick Reilly. Radar design principles, 1991.
3. Kim B., Kim S., Jin, Y., Lee J. High-Efficiency Super-Resolution FMCW Radar Algorithm Based on FFT Estimation. Sensors, №12, 2021. P. 1-16.
4. Winkler V. Range Doppler detection for automotive FMCW radars, European Radar Conference (EuRAD), Munich, Germany, 2000. P. 166–169.
5. Антипов В.Н. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / под ред. В.Т. Горяинова. М., 1988.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ

А.С. ВАБИЩЕВИЧ¹, А.Д. ВАСЮТИЧ^{1,2}, А.В. КУРИЛОВИЧ¹, Ц. МА¹, С.Х. ЖЭНЬ¹,
В.Ю. ЦВЕТКОВ¹

1 – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь,
2 – ОАО «Пеленг», Республика Беларусь

Поступила в редакцию 4 апреля 2025

Аннотация. В статье рассматриваются алгоритмы помехоустойчивого кодирования и декодирования. Описаны алгоритмы двухэтапного декодирования (HD2) и трехэтапного декодирования (HD3), алгоритм RCDS, а также алгоритм Repeat для кодов с повторением. Проведен сравнительный анализ корректирующей способности этих алгоритмов.

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование, двумерный код Хэмминга, корректирующая способность, блочные ошибки, адаптивное декодирование.

Введение

При передаче данных по каналам связи неизбежно возникают ошибки, вызванные такими факторами, как шум, искажения и помехи. Для их минимизации применяется помехоустойчивое кодирование, которое позволяет обнаруживать и исправлять ошибки за счет добавления проверочной информации. Существует множество типов кодов, различающихся корректирующей способностью, скоростью и вычислительной сложностью, что определяет их эффективность в конкретных условиях эксплуатации [1, 2].

Одним из наиболее известных методов блочного помехоустойчивого кодирования являются коды Хэмминга, позволяющие исправлять одиночные ошибки в каждом блоке передаваемой последовательности. Классический код Хэмминга (7,4) позволяет исправлять одну ошибку на каждые четыре информационных бита, дополняя их тремя проверочными битами [3]. Для увеличения корректирующей способности разработаны двумерные коды Хэмминга, основанные на их одномерных аналогах, теоретически позволяющие исправить до четырех случайных ошибок в каждом блоке [4]. Однако существующие методы декодирования, такие как двухэтапный (HD2) и трехэтапный (HD3), не всегда обеспечивают максимальную исправляющую способность двумерного кода Хэмминга, что ограничивает их практическое применение [3–5].

В работе рассматриваются четыре алгоритма декодирования: двухэтапный (HD2), трехэтапный (HD3), адаптивный RCDS, а также алгоритм с повторением Repeat. В ходе исследования проведен анализ эффективности алгоритмов помехоустойчивого кодирования, произведена оценка их корректирующей способности при различных условиях передачи данных.

Алгоритм двухэтапного декодирования HD2

Двухэтапное декодирование (2 stage Hamming Decoder, HD2) двумерного кода Хэмминга представляет собой последовательную обработку ошибок, разделенную на два этапа: анализ строк кодовой матрицы и анализ столбцов. Этот алгоритм основан на вычислении синдромов строк и столбцов, что позволяет локализовать ошибочные биты и выполнить их исправление.

На первом этапе декодирования вычисляются синдромы строк, которые используются для обнаружения позиций ошибочных символов внутри строк кодовой матрицы. Проверочная матрица Хэмминга помогает контролировать целостность данных, а синдромы позволяют выявить отклонения от корректного кодового слова. После анализа строк выполняется коррекция обнаруженных ошибок, в результате чего формируется промежуточная декодируемая матрица.

На втором этапе выполняются аналогичные операции для столбцов кодовой матрицы, что позволяет дополнительно выявить ошибки, нескорректированные на первом этапе. Таким образом, к концу обработки формируется окончательная матрица, содержащая исправленные данные [6].

Несмотря на эффективность двухэтапного алгоритма, его корректирующая способность ограничена и не позволяет исправлять все возможные комбинации ошибок, определенные конструктивным кодовым расстоянием двумерного кода Хэмминга. В частности, существуют варианты четырехкратных ошибок, которые данный алгоритм не может устранить, что снижает его адаптивность при высоком уровне помех. В связи с этим для повышения эффективности кодирования используются усовершенствованные алгоритмы, такие как трехэтапное декодирование (HD3), а также адаптивные алгоритмы, обеспечивающие повышенную исправляющую способность и минимизацию уровня блочных ошибок.

Алгоритм трехэтапного декодирования HD3

Трехэтапное декодирование (3 stage Hamming Decoder, HD3) двумерного кода Хэмминга представляет собой расширение двухэтапного алгоритма, включающее дополнительный анализ кодовой матрицы на третьем этапе, что позволяет повысить корректирующую способность.

На первом этапе выполняется анализ синдромов строк (аналогично процессу при двухэтапном декодировании). Проверочная матрица Хэмминга используется для выявления ошибочных символов, после чего выполняется их корректировка, формируется промежуточная матрица. На втором этапе проводится аналогичный процесс для столбцов, что позволяет выявить и исправить ошибки, не устраненные на первом этапе. На третьем этапе осуществляется дополнительный анализ исправленных данных, который позволяет локализовать и устранить сложные случаи распределения ошибок. Этот этап играет ключевую роль в увеличении корректирующей способности алгоритма, позволяя исправить ошибки, не обработанные на предыдущих этапах [6].

Таким образом, трехэтапное декодирование является усовершенствованной версией HD2, обеспечивающей более высокую корректирующую способность, что приводит к снижению вероятности появления ошибок на выходе декодера, что делает его более эффективным в условиях высокой зашумленности канала.

Алгоритм декодирования RCDOS

Алгоритм RCDOS представляет собой трехэтапное итеративное декодирование с жесткими правилами принятия решений, включающее операцию стирания ошибок и процедуру выбора оптимальной стратегии декодирования. Ключевое отличие данного алгоритма от других заключается в проведении дополнительного этапа анализа ошибок перед непосредственным декодированием.

В процессе работы алгоритм параллельно вычисляет синдромы строк и столбцов полученного кодового слова. Если в строке или столбце произошла ошибка, синдром данной строки или столбца не равен нулевому вектору, что позволяет идентифицировать ошибочные позиции. Ошибки фиксируются в регистрах строк и столбцов, где единичное значение указывает на наличие ошибки, а нулевое – на ее отсутствие. Сравнение общего количества ошибочных строк и столбцов позволяет определить стратегию декодирования, что называется процедурой принятия решения.

После этого выполняется трехэтапное декодирование, стратегия которого определяется распределением ошибок. Если количество ошибочных строк больше количества ошибочных столбцов, применяется строково-столбцово-строковое декодирование. Если количество ошибочных строк меньше, используется столбцово-строково-столбцовое декодирование. В

случае равенства количества ошибок в строках и столбцах выполняется операция стирания ошибок, затем выполняется строковое декодирование, в результате чего получается исправленный код.

На завершающем этапе ошибки стираются в тех позициях, где строковый и столбцовый регистры одновременно содержат единицы, после чего выполняется финальное строковое декодирование [6].

Результаты исследований показали, что алгоритм RCDOS обеспечивает более эффективное исправление ошибок по сравнению с двухэтапным и трехэтапным декодированием. Он позволяет устранить все ошибки, кратные половине минимального расстояния кода Хэмминга, а также значительное число ошибок, превышающих этот порог. Таким образом, алгоритм демонстрирует превосходство над известными алгоритмами, предлагая улучшенную корректирующую способность и адаптивную обработку ошибок, что делает его перспективным вариантом для применения в системах передачи данных.

Кодек помехоустойчивого кодирования Repeat

Реализован помехоустойчивый кодек, основанный на многократном повторении исходной информации с ее последующим восстановлением с использованием статистического анализа частоты символов. Вместо традиционной кодовой матрицы применяется строка длиной 16 бит, которая не подвергается классическому кодированию Хэмминга, а повторяется трижды, формируя расширенную последовательность длиной 48 бит. Такой подход повышает устойчивость данных к ошибкам, поскольку вероятность корректного восстановления информации увеличивается за счет анализа повторов.

На этапе декодирования выполняется идентификация наиболее часто встречающегося битового значения среди трех повторов для каждой позиции исходной строки. Полученная после передачи 48-битная последовательность анализируется таким образом, что для каждого бита определяется доминирующее значение среди трех имеющихся вариантов, позволяя скорректировать возможные искажения данных.

Сравнение и анализ

В ходе исследования проведена оценка эффективности четырех алгоритмов декодирования, включая двухэтапное декодирование (HD2), трехэтапное декодирование (HD3), алгоритм RCDOS, а также алгоритм Repeat. Анализ проводился в условиях бинарного симметричного канала с контролируемыми параметрами, моделирующими вероятность появления ошибок. Для каждого алгоритма определены значения вероятности блочных ошибок PBE(HD2), PBE(HD3), PBE(RCDOS), PBE(Repeat), что позволяет оценить их способность к исправлению и минимизации искажений данных.

На рис. 1 представлена зависимость вероятности блочных ошибок на выходе декодера в условиях бинарного симметричного канала. График демонстрирует, что лучшие результаты по снижению вероятности блочных ошибок показывает алгоритм RCDOS, за ним следует трехэтапное декодирование (HD3), далее двухэтапное декодирование (HD2), а предложенный алгоритм Repeat демонстрирует наибольший уровень ошибок среди всех декодеров.

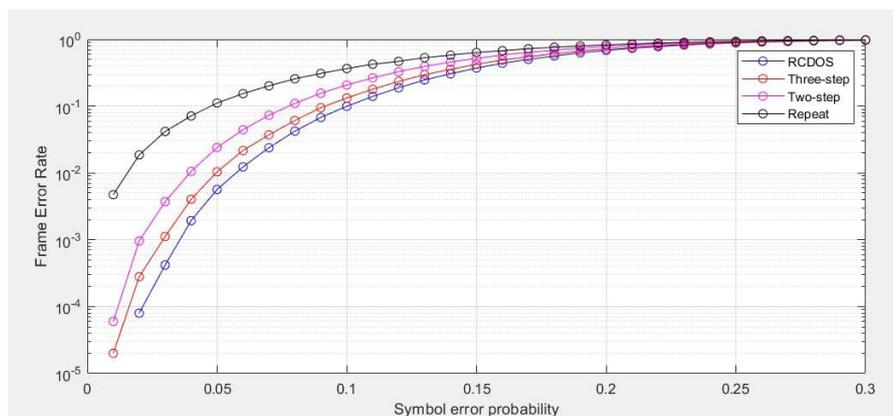


Рис. 1. Вероятность блочных ошибок в зависимости от алгоритма декодирования

Таким образом, результаты исследования показали, что алгоритм RCDOS является наиболее эффективным среди представленных алгоритмов декодирования.

Заключение

Результаты показали, что алгоритм RCDOS обладает наименьшей вероятностью блочных ошибок, значительно превосходя остальные алгоритмы. Алгоритм HD3 демонстрирует высокую корректирующую способность, уступая только RCDOS. Алгоритм HD2 показывает стабильное исправление ошибок, но с более высокой вероятностью блочных потерь.

Алгоритм Repeat для декодирования помехоустойчивых кодов с повторением, несмотря на простоту, продемонстрировал ограниченную корректирующую способность, уступая всем рассмотренным алгоритмам. Таким образом, проведенные исследования подтвердили эффективность алгоритма адаптивного декодирования RCDOS.

COMPARATIVE ANALYSIS OF NOISE-RESISTANT DECODING ALGORITHMS

A.S. VABISHCHEVICH, A.D. VASIUTICH, A.V. KURILOVICH, J. MA, X.H. REN,
V.Yu. TSVIATKOU

Abstract. The article discusses noise-resistant encoding and decoding algorithms. The algorithms of two-stage decoding (HD2) and three-stage decoding (HD3), the RCDOS algorithm, as well as the Repeat algorithm for codes with repetition are described. A comparative analysis of the corrective ability of these algorithms has been carried out.

Keywords: noise-resistant coding, two-dimensional Hamming code, correction ability, block errors, adaptive decoding.

Список литературы

1. Mercier, H. A survey of error-correcting codes for channels with symbol synchronization errors / H. Mercier, V. K. Bhargava, V. Tarokh // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2010. – № 1 (12). – P. 87–96.
2. Jeong, S. Iterative Channel Detection With LDPC Product Code for Bit-Patterned Media Recording / S. Jeong, J. Lee // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2017. – № 11 (53). – P. 1–4.
3. Hamming, R. W. Error detecting and error correcting codes / R. W. Hamming // *Bell System Technical Journal*. – 1950. – № 2 (29). – P. 147–160.
4. Elias, P. Error-free coding / P. Elias // *IEEE Trans Inf Theory*. – 1954. – № 4 (4). – P. 29–37.
5. Chiaraluce, F. Extended Hamming product codes analytical performance evaluation for low error rate applications / F. Chiaraluce, R. Garello // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. – 2004. – № 6 (3). – P. 2353–2361.
6. Ren, X. A New Hard-decision Iterative Decoding Method for Hamming Product Codes / X. Ren, J. Ma, V. Yu. Tsviatkou, V. K. Kanapelka // *Engineering Letters*. – 2022. – Vol. 30, № 3.

APPLICATION FOR METHANE GAS DETECTION AND MEASUREMENT USING ADAPTIVE TIME SYNCHRONOUS MOVING AVERAGE

N.V. BACH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

Received March 5, 2025

Abstract. Methane is a potent greenhouse gas originating from both natural and anthropogenic sources. Detecting and quantifying methane emissions is crucial for environmental protection and industrial safety. This paper presents a software application designed for methane gas detection and concentration estimation based on an adaptive time synchronous moving average (ATSMA) algorithm. The software integrates signal classification, preprocessing, and estimation of methane concentration using absorption pulse parameters. The proposed ATSMA algorithm enhances signal periodicity while effectively reducing noise, leveraging the zero-crossing rate (ZCR) property to optimize averaging cycles. The processing workflow involves multiple steps, including initialization, gas classification, ATSMA filtering, multiband decomposition and absorption pulse estimation. The graphical interface provides signal visualization in both time and frequency domains, displaying key methane parameters such as spectral harmonic ratios and absorption pulse characteristics.

Keywords: Methane detection, ATSMA algorithm, zero-crossing rate, signal processing, absorption pulse, environmental monitoring.

Introduction

Methane, a potent greenhouse gas, originates from diverse sources, encompassing both human activities and natural processes. Biogenic decay in wetlands and forests, as well as the organic waste decomposition in landfills [1], significantly contribute to methane emissions. In agriculture, livestock farming activities, particularly the digestion processes of animals such as cows, contribute to methane production. Land cultivation and water usage in agriculture also play a crucial role in methane generation. The extraction and transportation of fossil fuels, along with processes like coal production and natural gas utilization, represent additional sources of methane emissions. Even forest fires contribute to the escalation of methane levels as carbon from burning vegetation undergoes decomposition.

The application for detecting methane leaks in pipelines is a promising endeavor in the fields of environmental monitoring and energy safety. This approach offers notable advantages, including the rapid and efficient coverage of large areas, leading to time and cost savings compared to traditional methods [2, 3]. In addition, methane detection is also used in medical diagnostics to assess gut bacterial imbalances [4]. To mitigate the greenhouse effect and ensure safety, identifying leaks and monitoring methane concentrations are urgent tasks.

This paper presents software designed to classify and detect signals containing methane while also analyzing and visualizing each step in the methane concentration estimation process. In software management, it is divided into four components (Figure 1): user interface, sequential processing, managing global variables and displaying information. The user interface is designed the QT Designer, a powerful graphical tool integrated with the Qt5 library, renowned for its robustness and versatility in creating cross-platform applications with seemingly appealing interfaces. This synergistic combination allows for the seamless design and implementation of intuitive interfaces tailored to the specific requirements of the project.

The sequential processing comprises seven steps: initialization, gas detection and classification, adaptive time synchronous moving average (ATSMA), multiband decomposition, pulse signal fusion rule, pulse fusion rule and estimation of absorption pulse parameters. Each step will utilize input variables and global variables from the preceding step.

The outcomes of each process are stored in distinct variables to streamline processing and facilitate the implementation of the back function. Following computation, the display variable is promptly updated to reflect the results.

The software interface (Figure 4) includes 3 parts: input information, graph display and output signal information. In Graph area displays each signal is displayed in two formats: time domain and frequency domain. The window “Information of signal” displays basic signal information and methane parameters. Basic signal information: length of signal, base frequency and sampling frequency. Methane parameters include spectral harmonic ratio features, absorption pulse parameters and estimated methane concentration.

The spectral harmonic ratio features include: root-mean-square base harmonic ratio (RMSBHR), even-to-odd harmonic ratio (EOHR), normalized spectral harmonic complexity (CH), spectral centroid (SC), harmonic noise ratio (HNR), HNR before adaptive time synchronous moving average (ATSMA) and HNR after ATSMA. Absorption pulse parameters: amplitude absorption pulse, area under absorption pulse, time-amplitude centroid area and frequency-amplitude centroid area. Methane concentration estimated according to amplitude absorption pulse, area under absorption pulse, time-amplitude centroid area, frequency-amplitude centroid area.

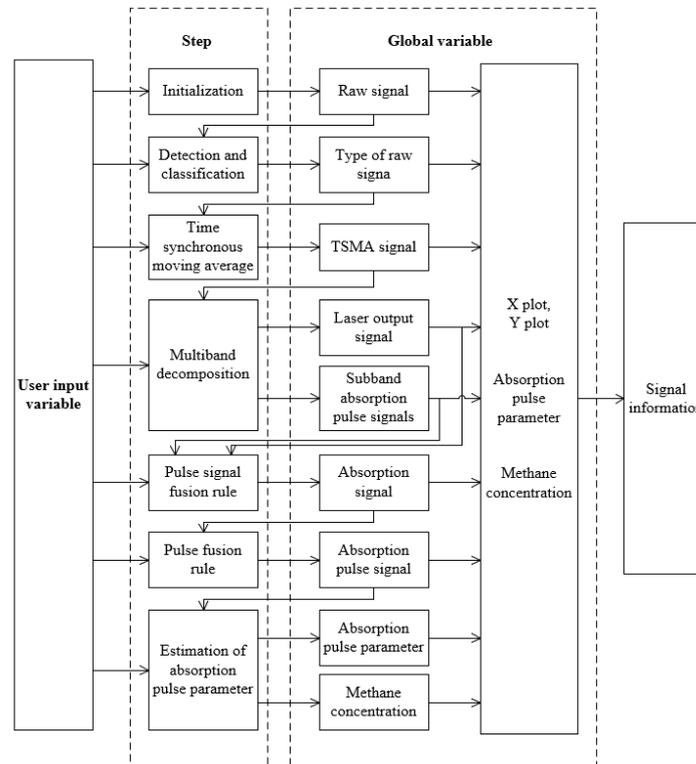


Figure 1. Software architecture diagram

An adaptive time synchronous moving average of the measured absorption signal

The time domain synchronous average (TSA) and the moving average (MA) are most commonly used average techniques in engineering [5, 6, 7]. TSA has the advantage at periodic signal detection by noise depressing and asynchronous signal components. The MA is effective to remove noises while keeping signal periodicity. However, the TSA signal is not periodic as measurement signal, and signal spectrum resolution degrades seriously, meanwhile, the MA filters out high-frequency signal components of interests. Time synchronous moving average (TSMA) method (Figure 2) combines the advantages of the above two methods keeping signal periodicity and high frequency signal components

[8]. The TSMA operates by averaging over M neighboring cycles of the measured signal, which has a total of N_c cycles.

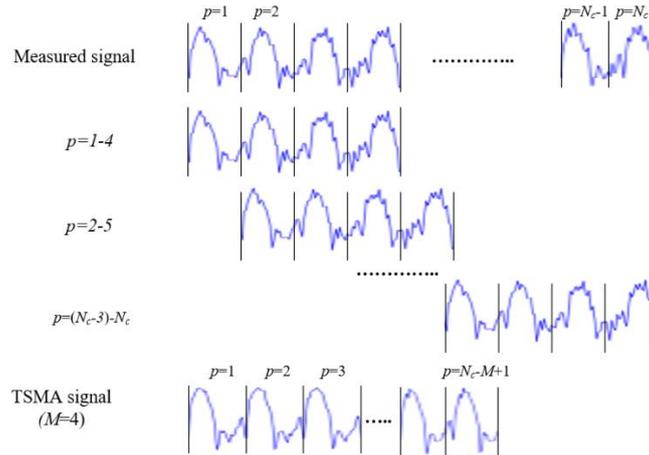


Figure 2. Illustration of time synchronous moving average (TSMA) algorithm

In [8] authors considered the TSMA filter to be optimal when the filtered signal had balance between spectrum resolution and noise gain. However, in this problem we are more interested in the periodicity of the signal. Because the methane concentration is constant over time, the received signal is theoretically characterized by periodicity.

Zero-crossing rate (ZCR) is a feature commonly used in signal processing to assess the periodicity of a signal [9, 10]. The ZCR can be defined as the number of crossing the signal the zero axis within a specific time frame (window). ZCR can be interpreted as a measure of the noisiness of a signal as ZCR values are higher for the noisy portions of the signal.

The block diagram of the proposed ATSMMA algorithm based on the proposed model of the absorption signal, moving average and ZCR property is shown in Figure 3.

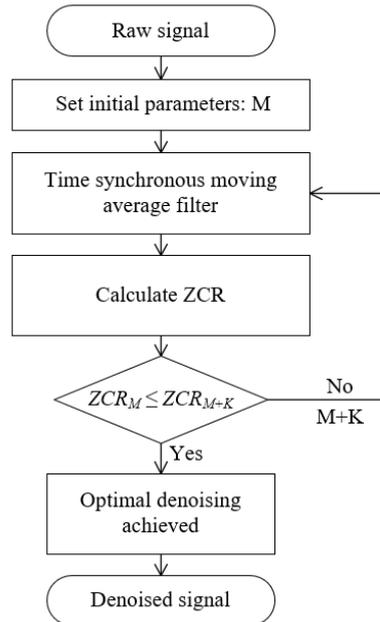


Figure 3. Block diagram of adaptive time synchronous moving average algorithm

The initial number of neighboring cycles $M \in (1, N_c)$ should be set during the first iteration, and then incremented after each subsequent iteration. To stop the iterative process of the algorithm is needed the termination criterion. The stopping criterion is determined by the interrelation between the number of time samples N , the time cycle samples N_s the total cycles N_c and the processed neighboring cycles M_{ZCR} of the absorption signal. This approach is likely suitable for signals with periodic components, and the effectiveness of the denoising process is determined by the stability of the zero-crossing rate.

The choice of the optimal averaging times would then be based on finding a balance between denoising effectiveness and time complexity.

Application for methane gas detection and measurement

This section introduces a software application developed for methane gas detection and concentration measurement, utilizing an adaptive time synchronous moving average (ATSMA) algorithm. The software interface is presented in Figure 4.

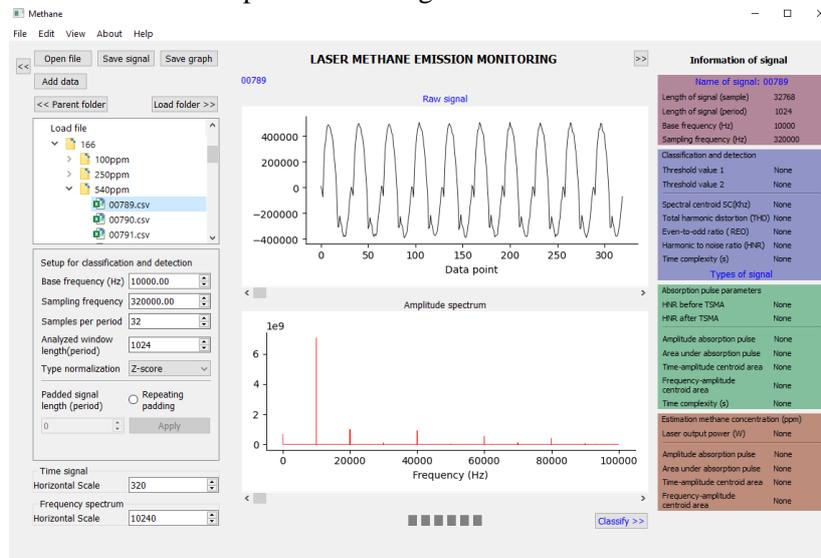


Figure 4. Main window of the methane gas analysis application

The main window of the methane gas analysis application (Figure 4) provides an intuitive interface for users to load, process and analyze methane signal. The following steps outline the initial workflow for interacting with the software:

1. Click the "Open file" button to open a new signal.
2. After pressing the open file button, a window appears to select the signal file to open.
3. For files containing many signals, after selecting, a window will appear asking to select the type of signal you want to process.
4. Enter input parameters: base frequency (Hz), sampling frequency, analyzed window length and type normalization. Click "Classify" button to classify and detect methane signals. After completion a window appears indicating the type of signal. Click "OK" button to continue.
5. Enter information about M neighboring cycles (averaging time), then click "Next" button to start the time synchronous moving average (TSMA) process. Then on the graph window appears the signal after TSMA and its amplitude spectrum.
6. Enter input parameters for multiband decomposition: K subband, order of filter and bandwidth of filter. Click "Next" button to run multiband decomposition of an adaptive average absorption signal.
7. Click "Next" to continue, on the graph shows absorption signal and amplitude spectrum of it.
8. Enter input parameters for pulse fusion rule: band width of pulse and calibration. Click "Next" to continue, on the graph shows absorption pulse signal and amplitude spectrum of it.
9. Select laser output power and then click "Next" to final step. Conclude absorption pulse parameters and methane concentration are obtained show on information window of signal (Figure 5).

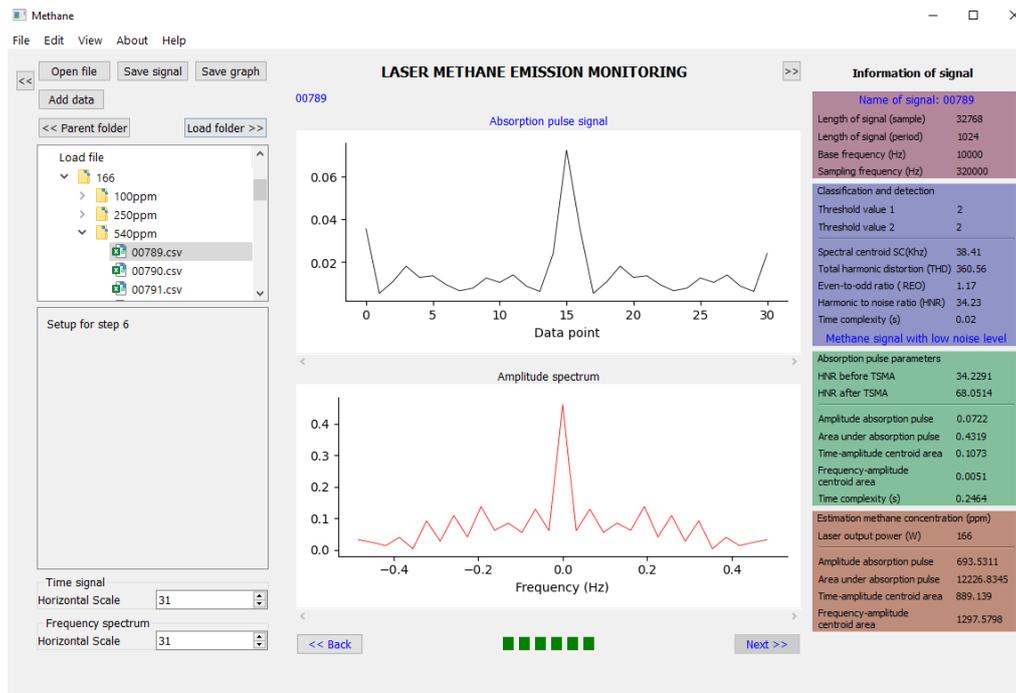


Figure 5. Absorption pulse parameters and methane concentration

Conclusion

Methane detection and concentration estimation are essential for environmental protection, industrial safety, and medical applications. This paper introduced a software application utilizing the adaptive time synchronous moving average (ATSMA) algorithm to estimate the accuracy of methane signal classification and concentration estimation. The ATSMA method effectively suppresses noise while preserving signal periodicity by incorporating the zero-crossing rate (ZCR) as a stability criterion.

The developed system offers a comprehensive solution with a structured processing pipeline, including signal classification, adaptive filtering, multiband decomposition, and absorption pulse parameter estimation. The user-friendly interface enables visualization of signal characteristics in both time and frequency domains, providing valuable insights into methane signal properties.

This approach can be applied in various fields, including environmental monitoring, industrial leak detection and medical diagnostics.

References

1. He H., Gao S., Hu J., Zhang T., Wu T., Qiu Z., Zhang C. // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. P. 2117–2125.
2. Iwaszenko S., Kalisz P., Slota M., Rudzki A. // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. P. 510–518.
3. Angus G., Steven D., Kyle J., Miles J., Graham M. // Proceedings of the SPIE. 2023. Vol. 12795. P. 1279503.
4. McKay L.F., Eastwood M.A., Brydon W.G. // Gut. 1985. Vol. 26. P. 69–74.
5. Braun S. // Mechanical Systems and Signal Processing. 2011. Vol. 25. P. 1087–1102.
6. Smith S.W. // The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. 1991. P. 277–284.
7. Hassan U., Anwar S. // Eur. J. Phys. 2010. Vol. 31. P. 453–459.
8. Zhang L., Hu N. // IEEE Access 2019. Vol. 7. P.93035–93048
9. Gouyon F., Pachet F., Delerue O. // Proceedings of the COST G–6 Conference on Digital Audio Effects. 2000. Vol. 5. P. 16–20.
10. Deshmukh O. and Wilson C. E. // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003. Vol. 1. P. 1–4.

УДК 004.75:61-028.27

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЛОКЧЕЙН В ЭЛЕКТРОННОЙ МЕДИЦИНЕ

В.А. ВИШНЯКОВ, М.О. КАЦКО

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 31 марта 2025

Аннотация. В докладе проанализировано текущее состояние и перспективы применения блокчейна в электронной медицине. Рассмотрены математические модели и структуры, лежащие в основе технологии блокчейн. Оценены перспективы развития блокчейн-технологии в сфере медицины для Республика Беларусь.

Ключевые слова: блокчейн, электронная медицина, электронные медицинские карты, контроль поставок лекарств.

Введение

Современная электронная медицина (e-health) сталкивается с проблемами безопасности данных, отсутствием доверия между участниками системы и сложностью обмена медицинской информацией. Блокчейн-технология, благодаря своей децентрализованной природе, криптографической защите и неизменяемости данных, предлагает решения этих проблем [1]. Внедрение блокчейна в медицину позволяет обеспечить целостность медицинских записей, безопасный обмен данными между учреждениями и пациентами, а также автоматизацию процессов через смарт-контракты.

Цель данной статьи – проанализировать текущее состояние и перспективы применения блокчейна в электронной медицине, рассмотреть математические модели и структуры, лежащие в основе этой технологии, а также предложить возможные направления развития.

Применение блокчейна в e-health

Блокчейн в медицине используется в следующих направлениях:

- управление электронными медицинскими картами (ЭМК) – обеспечивает безопасное хранение и передачу данных между больницами, врачами и пациентами [2];
- контроль цепочки поставок лекарств – предотвращает подделку медикаментов [3];
- телемедицина – защищает данные пациентов при удаленных консультациях [4];
- исследования и клинические испытания – гарантирует достоверность данных [5].

Преимущества: децентрализация и устойчивость к взлому; прозрачность и аудируемость транзакций; автоматизация через смарт-контракты. Проблемы: масштабируемость (ограниченная пропускная способность); регуляторные барьеры (GDPR, HIPAA); высокие вычислительные затраты.

Для функционирования блокчейн-платформы требуется формирование системы смарт-контрактов с единичным и/или постоянным доступом, замыкающейся на пациенте, как источнике большого массива данных. Дальнейшее развитие функционала цифровой трансформации медицинского обслуживания основано на заключении смарт-контрактов с различными субъектами рынка медицинских услуг [6].

Внедрение блокчейна в процесс обработки заявлений на медицинское страхование приводит к повышению прозрачности, росту эффективности и снижению случаев мошенничества. Например, компания MetLife использует блокчейн для оптимизации процесса

обработки страховых выплат по страхованию жизни, сокращая время обработки запросов клиентов [7].

Математические модели

Блокчейн опирается на: хеш-функции (SHA-256, Кецсак) – обеспечивают целостность данных; алгоритмы консенсуса (Proof of Work, Proof of Stake, PBFT) – гарантируют согласованность данных в сети.

Модель безопасности может быть описана через вероятность атаки 51 % [8]:

$$P_{attack} \approx (p q)^z,$$

где q – мощность атакующего, p – мощность сети, z – количество подтверждений.

В медицинских блокчейн-системах применяются алгоритмы консенсуса: Proof of Authority (PoA) – для быстрой валидации транзакций (подходит для EHR – Electronic Health Records); Delegated Proof of Stake (DPoS) – баланс между скоростью и децентрализацией [9].

Модель безопасности может быть описана как:

$$Security = 1 + e^{-k(N-N_0)},$$

где N – число нод, k – коэффициент устойчивости, N_0 – порог безопасности.

В работе [10] приведена обобщенная модель для в виде:

$$M_{mic} = \{M_{cehr}, M_{cct}, M_{dma}, M_{cbi}, M_{rpm}\},$$

где M_{cehr} – управление электронными медицинскими картами; M_{cct} – управление цепочками поставок лекарств и борьба с контрафактом; M_{dma} – анализ медицинских данных; M_{cbi} – проведение клинических и биомедицинских исследований; M_{rpm} – удаленный мониторинг пациентов.

Контроль цепочки поставок лекарств, клинических испытаний

Поставки поддельных медицинских препаратов и оборудования – серьезная проблема в системе здравоохранения. Для борьбы этим можно использовать блокчейн для обеспечения контроля подлинности медикаментов, отслеживая их от места происхождения. Фармацевтические компании Pfizer, Amgen и Sanofi, рассматривают возможность использования блокчейн для ведения документации испытаний новых лекарственных препаратов. Это позволит создать единую базу данных, содержащую информацию о каждом новом препарате и участниках испытаний [11].

Предложенные MediLedger технологии позволяют отслеживать товары и проверять подлинность лекарств, сроки годности и другую важную информацию. Также сеть помогает правоохранительным органам проверять любую подозрительную деятельность, например, незаконный оборот наркотиков или продажу контрафакта

Компания iSolve обеспечивает прозрачность и безопасность на всех уровнях разработки и поставки лекарств, позволяя компаниям лучше понимать рынок товара. Недавно компания представила решение на базе блокчейна под названием ADLTTM, которое должно помочь повысить соответствие нормам в отношении лекарственных средств.

TraceRX – это основанное на блокчейне решение для цепочки поставок фармацевтических препаратов для International Aid. LeewayHertz Technologies разработала эту платформу распределенного реестра, чтобы отслеживать распространение бесплатных наркотиков и выявлять их пропажу [7].

Блокчейн используется в телемедицине, включая видеоконсультации и электронные рецепты. Это расширяет доступ пациентов к медицинской помощи. MyClinic – телемедицинская платформа компании Medicalchain, которая позволяет пациентам проводить видеоконференции со своими врачами и оплачивать эти консультации с помощью «MedTokens».

В клинических испытаниях технология блокчейн используется для решения проблем ложных результатов и дезинтеграции данных. Эта технология позволяет укрепить доверие к клиническим испытаниям.

Технология блокчейн может безопасно собирать данные о медицинских устройствах, включая статистику использования и журналы обслуживания, повышая безопасность пациентов и снижая вероятность неисправностей. Один из передовых разработчиков платформ для подобных операций – компания Chronicled [12].

Платформа отчетности и результатов клинических испытаний (CTRR), разработанная компанией Pfizer в сотрудничестве с другими компаниями, включая IBM, – один из примеров использования блокчейн-технологий для хранения данных в этой сфере [13].

Квалификация медицинского персонала, защита геномных данных

Используя систему на основе блокчейн, учреждения могут удостовериться в квалификации медицинского персонала, легитимности предоставленных сотрудником документам об образовании. Такое направление развития должно тесно сотрудничать с образовательными учреждениями. Американская компания ProCredEx разработала систему проверки квалификации медицинских работников с использованием протокола блокчейна R3 Corda. Суть ее работы заключается в получении прибыли от предоставленной организациями информации о медицинском персонале.

Использование блокчейна может повысить безопасность конфиденциальной генетической информации, снижая риск ее кражи или несанкционированного доступа. Исследователи получают надежный способ приобретения геномных данных для проведения анализов и секвенирования ДНК. EncrypGen Gene-Chain MediLedger блокчейн-платформа для поиска, совместного использования, хранения, покупки и продажи генетической информации. Nebula Genomics использует блокчейн, чтобы исключить ненужные расходы и посредников в процессе генетического исследования. Платформа помогает пользователям монетизировать свои генетические данные, создавая максимально широкую базу данных о генах людей [7].

Применение блокчейн в здравоохранения Российской Федерации

Среди известных БЧ-инициатив российских медицинских учреждений – применение БЧ для хранения медицинских данных в ОАО «Медицина» в 2018 г., а также использование технологии для контроля медицинских услуг сетью «Открытая клиника». В качестве региональных проектов следует выделить использование БЧ для мониторинга оборота лекарств в больнице Новгородской области. В течение семи месяцев после запуска проект сэкономил около 12 % бюджета программы льготного лекарственного обеспечения. Московская область в 2017 г. анонсировала планы по использованию БЧ для хранения медицинских карт граждан [11].

Проблемы и перспективы внедрения технологии блокчейн в Республике Беларусь

Барьерами для широкого применения БЧ в здравоохранении являются также проблемы масштабируемости, задержки передачи данных, взаимодействия между различными системами, безопасности данных и конфиденциальности [13]. Эти препятствия требуют комплексного решения для успешного внедрения блокчейн-технологий в здравоохранении.

В связи с активным внедрением блокчейна в различных сферах особое значение приобретает вопросы правового регулирования. Это позволяет, с одной стороны, предотвратить риски, связанные с новой технологией, а с другой – обеспечить наиболее полную реализацию блокчейна в различных сферах общественных отношений.

В отечественной литературе отсутствуют комплексные междисциплинарные исследования, посвященные правовому регулированию отношений с использованием блокчейн.

Правовое регулирование общественных отношений, связанных с технологией блокчейн, в Республике Беларусь находится на начальном этапе.

Правовое регулирование общественных отношений, связанных с технологией блокчейн в Республике Беларусь, может быть реализовано двумя путями [14]:

– принятие новых нормативных правовых актов, посвященных использованию блокчейн-технологий;

– внесение изменений в существующие законодательные акты в части использования блокчейн-технологий, а также разработка нормативных актов министерств по блокчейн-технологиям в рамках их сферы ответственности.

В Республике Беларусь создана благоприятная атмосфера для продвижения и развития проектов в области технологии блокчейн. В качестве примеров можно привести созданную в Республике ассоциацию «Технологии Распределенных Реестров». Это некоммерческая организация, объединяющая проекты и экспертов, осуществляющих деятельность в сфере криптоэкономики, а также работающих на стыке инновационных технологий (AI, IoT, VR, AR, ML и др.) и блокчейн. Миссия Ассоциации: популяризация технологии блокчейн среди предпринимателей в качестве направления для создания собственных коммерческих проектов и других инициатив. Членами ассоциации являются ведущие мировые компании, упомянутые по тексту [15].

Управление электронными медицинскими картами (ЭМК)

Правообладателем персональных и медицинских данных является сам пациент, и только он может дать согласие на их сбор, обработку и передачу. При создании системы электронных медицинских карт на основе блокчейн вся необходимая информация может быть добавлена в блокчейн в виде зашифрованных данных. В результате все поставщики медицинских услуг с согласия пациента могут получить доступ к обзору его медицинских данных. Блокчейн позволяет: хранить хэши записей в цепочке, а сами данные – в IPFS (InterPlanetary File System); контролировать доступ через смарт-контракты. Пример структуры на Solidity представлен на рис. 1.

```
contract EHR {
    struct Patient {
        address owner;
        string ipfsHash;
        uint accessTime;
    }

    mapping(address => Patient) public patients;

    function grantAccess(address doctor, uint time) public {
        require(msg.sender == patients[msg.sender].owner);
        patients[doctor].accessTime = time;
    }
}
```

Рис. 1. Предоставление доступа к ЭМК через смарт-контракт

В качестве примера проекта электронных медицинских карт, управляемых самими пациентами можно привести MedRec, который разрабатывается в Массачусетском технологическом институте. MediBloc создала блокчейн-платформу под названием Rapasea. Оптимизированное решение под отрасль здравоохранения решение, которое работает как сеть и как протокол для установки политик и настройки уровней медицинских данных, а также проверки источников и мест назначения данных в режиме реального времени [16].

Платформа Akiri гарантирует, что медицинские данные остаются в безопасности и доступны только тем сторонам, которые имеют специальное разрешение для их использования. Эта платформа помогает медицинским компаниям безопасно и надежно управлять огромными объемами данных пациентов. Их технология позволяет хранить, продавать, лицензировать данные, а также обмениваться ими при строгом соблюдении правил HIPAA и других регламентов [7].

Заключение

Блокчейн обладает значительным потенциалом для трансформации электронной медицины, обеспечивая безопасность, прозрачность и автоматизацию. Но остаются вызовы,

связанные с масштабируемостью и регуляцией. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию алгоритмов и интеграцию с существующими медицинскими системами. Приведены математические модели и пример предоставления доступа к ЭМК через смарт-контракт.

STATUS AND PROSPECTS OF BLOCKCHAIN USE IN ELECTRONIC MEDICINE

V.A. VISHNYAKOV, M.A. KATSKO

Abstract. The report analyzes the current state and prospects for the use of blockchain in electronic medicine. Mathematical models and structures underlying the technology are considered. Prospects for the development of block technology in the field of medicine for the Republic of Belarus were assessed.

Keywords: blockchain, electronic medicine, electronic medical records, drug supply control.

Список литературы

1. Вишняков В. А. Технология блокчейн в образовании и ИТ-медицине: модели, алгоритмы, программные средства : [монография] / В. А. Вишняков, Д. А. Качан. – Минск : РИВШ, 2023. – 184 с.
2. Khezr S. Blockchain in healthcare: A systematic literature review. //Journal of Medical Internet Research. 2019.
3. Bocek T. Blockchain-based smart contracts for medical data management. // IEEE Access. 2017.
4. Mehdi B., Ravaud P. Blockchain for clinical trials. // PLOS ONE. 2017.
5. Asaph A. MedRec: Using blockchain for medical data access. // MIT Media Lab. 2016
6. Борисов И. В. Блокчейн-платформа как инструмент цифровизации процессов управленческой деятельности в здравоохранении / И. В. Борисов // Вестник евразийской науки. – 2023 – Т. 15. № 1.
7. Внедрение технологии блокчейн в сфере здравоохранения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://merehead.com/ru/blog/implementation-blockchain-health-industry>. Дата доступа 27.03.2025.
8. Satoshi N. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. 2008.
9. Chen Y., Ding S., Xu, J. DPoS-based EHR systems. Blockchain in Healthcare Today. 2023.
10. Вишняков В.А. Использование технологии блокчейн в ИТ-медицине // Вишняков В.А. / Системный анализ и прикладная информатика. – 2024, № 3. – С. 48-53.
11. Куракова Н.Г., Черченко О.В., Цветкова Л.А. Технологии блокчейн в здравоохранении: позиции России на глобальном публикационном ландшафте. Врач и информационные технологии. – 2021, №1. – С. 25–39.
12. Blockchain for Healthcare: Overview from Every Dimension [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gminsights.com/pressrelease/blockchain-technology-in-healthcare-market>. Дата доступа 29.03.2025.
13. Кузнецова В.П., Вардомацкая Л.П., Тропинова Е.А. Блокчейн в здравоохранении // Экономика и управление. – 2018, №7. – С.16-20.
14. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь : [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://pravo.by/pravovaya-informatsiya/pravo-sovremennoy-belarusi-istoki-uroki-dostizheniya-i-perspektivy/2021/aktualnye-problemy-pravovogo-regulirovaniya-otnosheniy-svyazannykh-s-ispolzovaniem-blokcheyna>. Дата доступа 25.03.2025.
15. Ассоциация «Технологии Распределенных Реестров» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.blockchainbelarus.by>. Дата доступа 27.03.2025.
16. Blockchain Technology In Healthcare Market [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gminsights.com/pressrelease/blockchain-technology-in-healthcare-market>. Дата доступа 25.03.2025.

RUSSIAN HANDWRITING RECOGNITION BASED ON DEEP LEARNING

J.H. LIU, S. XIONG, Z.F. DANG, J. MA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

Received April 3, 2025

Abstract. This paper presents a deep learning-based algorithm for Russian handwriting recognition. The algorithm combines the improved VGG network feature extraction capability and LSTM temporal modeling capability and introduces data enhancement and optimizer tuning strategies. Experimental results show that the algorithm provides significant improvement in recognition accuracy and training efficiency compared with existing methods.

Keywords: Russian handwriting recognition, deep learning, VGG network, LSTM network, data enhancement.

Introduction

Russian handwriting recognition is of great value in the field of information processing. With the increasing communication between China and Russia, the demand for automatic Russian handwriting recognition systems is growing. However, due to the complexity of the Russian Cyrillic alphabet and the diversity of writing styles, existing recognition systems are still deficient in terms of accuracy and speed.

In recent years, deep learning techniques have made significant progress in the field of text recognition [1]. However, there are relatively few specialized studies on Russian handwriting [2]. In this paper, based on the EasyOCR framework [3], the original model structure is optimized, and the system performance is significantly improved by introducing data enhancement strategies and optimizer parameter tuning [4].

Model Structure and Parameter Tuning

The model used in this paper is based on the EasyOCR framework, which combines LSTM (Long Short-Term Memory Network), VGG (Visual Geometry Group) Convolutional Neural Network, and CTC (Connectionist Temporal Classification) Loss Function. EasyOCR is an open-source optical character recognition framework that supports recognition of multiple languages. The original model was improved by adding data enhancement and optimizer settings and parameter filtering to increase recognition accuracy. The EasyOCR framework is shown in Figure 6.

VGG is a classical convolutional neural network architecture with powerful feature extraction capability. In this paper, VGG is used to extract features from handwritten body images to provide high-quality input for subsequent recognition.

LSTM is a special type of recurrent neural network (RNN) that can effectively handle long-term dependencies in sequence data [5]. In handwriting recognition, LSTM can capture the contextual information in the character sequence to improve the recognition accuracy [6].

CTC is a loss function for sequence annotation tasks, especially suitable for character sequence annotation in handwriting recognition. With the CTC loss function, the model can directly predict character sequences without pre-segmenting the input image.

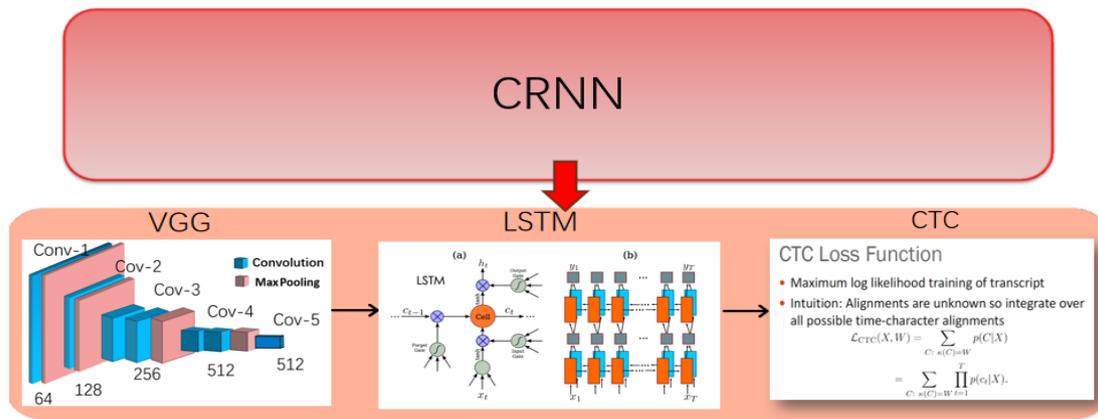


Figure 6. EasyOCR Framework

Parameter Tuning

In order to further optimize the model performance, we adjusted the parameters of the model. The specific adjustments are as follows:

Data Enhancement: By adding data enhancement techniques such as rotation, scaling, and distortion, the diversity of the training dataset is expanded, and the generalization ability of the model is improved.

Optimizer settings: The Adam optimizer is used and parameters such as learning rate and momentum are adjusted to accelerate the convergence speed of the model.

Parameter filtering: Unnecessary parameters in the model are filtered out by regularization techniques to reduce the risk of overfitting.

Experimental results and comparative analysis

The experiment used the Cyrillic handwriting dataset, which contains many images of Russian handwriting, covering a wide range of writing styles and fonts.

The experiments were conducted in the following environment: PyTorch, CUDA 12, Python 3.

The original algorithm (blue and red lines) drops rapidly in training loss, but the validation loss stabilizes or even rises slightly after an initial drop, indicating possible overfitting.

The new algorithm (green and purple lines) shows a steadier decline in both training and validation losses, and the final loss values are lower than those of the original algorithm, showing better generalization. The comparison of training and validation losses is shown in Table 1.

Table 1. Comparison of training and validation losses

Iterations	Original algorithm train loss	Original algorithm valid loss	My algorithm train loss	My algorithm valid loss
10000	0,1	1,5	0,25	0,9
20000	0,05	1,8	0,1	1,0
30000	0,05	2,1	0,05	1,2
40000	0,05	2,2	0,05	1,3
50000	0,05	2,2	0,05	1,4

The accuracy of the original algorithm rose rapidly in the early stages but then grew slowly and eventually stabilized at about 30 %.

The accuracy of the new algorithm continues to rise throughout the training process, eventually reaching about 42 %, showing better learning ability and higher accuracy. A comparison of the training accuracies is shown in The total training time of the original algorithm grows linearly with the number of iterations, eventually reaching about 6000 seconds.

The total training time of the new algorithm grows at a slower rate, eventually totaling about 5000 seconds, showing greater time efficiency throughout the training process. Comparison of total training time is shown in Table 3.

Loss: The new algorithm performs better on both training and validation loss, showing better generalization and lower error.

Accuracy: The new algorithm is more accurate, showing that it learns better on the training data.

Training time: The new algorithm shows higher efficiency in both per 2000 iterations and total training time, although the difference is not significant, it may have a significant advantage in large-scale training.

Overall performance: The new algorithm outperforms the original algorithm in terms of loss, accuracy, and training time, showing improvements in model optimization and training efficiency.

Table 2.

The total training time of the original algorithm grows linearly with the number of iterations, eventually reaching about 6000 seconds.

The total training time of the new algorithm grows at a slower rate, eventually totaling about 5000 seconds, showing greater time efficiency throughout the training process. Comparison of total training time is shown in Table 3.

Loss: The new algorithm performs better on both training and validation loss, showing better generalization and lower error.

Accuracy: The new algorithm is more accurate, showing that it learns better on the training data.

Training time: The new algorithm shows higher efficiency in both per 2000 iterations and total training time, although the difference is not significant, it may have a significant advantage in large-scale training.

Overall performance: The new algorithm outperforms the original algorithm in terms of loss, accuracy, and training time, showing improvements in model optimization and training efficiency.

Table 2. **Training accuracy comparison**

Iterations	Original algorithm accuracy	Our algorithm accuracy
10000	25 %	32 %
20000	25 %	35 %
30000	27 %	36 %
40000	27 %	36 %
50000	30 %	42 %

Table 3. **Comparison of total training time**

Iterations number	Original algorithm total time, s	My algorithm total time, s
50000	6000	5000

Conclusion

In this paper, the accuracy and speed of Russian handwriting recognition are significantly improved by optimizing the model structure and parameter adjustment. Experimental results show that the improved model outperforms the original algorithm in terms of training time and total training time, demonstrating higher efficiency and better performance. Future work will explore deeper network structures to further improve performance, investigate more efficient feature extraction methods, and apply the model to handwriting recognition in other languages, as well as explore deployment and optimization on mobile devices.

References

1. A. B. Ivanov. // Pattern Recognition and Image Analysis. 2023.
2. E. V. Petrova., D. A. Smirnov. // Journal of Pattern Recognition. 2022.
3. M. I. Kuznetsov. // Journal of Computer Science. 2021.
4. R. A. Johnson., J. B. Smith. // International Conference on Pattern Recognition. 2020. P. 456–478.
5. L. N. Petrov. // Journal of Artificial Intelligence. 2023. P. 789–812.
6. K. L. Brown. // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2022. P. 901–923.

УДК 378.1, 004.9

ЭЛЕКТРОННОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОБЩЕГО УСТРОЙСТВА И ПРИНЦИПОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЯ

Е.А. СЕМЕНЧЕНКО, В.В. КОСТРИЦКИЙ, Р.П. БОГУШ

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой

Поступила в редакцию 31 марта 2025

Аннотация. В данной статье рассмотрены особенности создания электронного средства обучения (ЭСО) «Общее устройство и диагностирование технического состояния автомобиля» для изучения студентами устройства и диагностирования технического состояния автомобиля. Представлена разработанная функциональная схема ЭСО и программная реализация на ее основе ЭСО. Описаны особенности использования, примеры работы модулей ЭСО, представлена общая структура отчета, формируемого по результатам изучения материала студентами.

Ключевые слова: инженер-механик, интерактивное образование, симулятор.

Введение

Высшее образование в Республике Беларусь постепенно переходит в инновационный режим развития, в котором необходимо учитывать мировые нормы и стандарты образовательных систем [1]. Такая тенденция затрагивает все направления, включая подготовку инженерно-технических работников. Одним из эффективных способов приобретения первоначальных знаний и навыков при подготовке инженеров-механиков, осуществляющих обслуживание и ремонт автомобильного транспорта, в рамках данного направления является применение электронных средств обучения (ЭСО), поскольку электронные средства обучения превосходят по наглядности, возможностям поиска и навигации традиционные средства [2].

Целью представленной работы является разработка ЭСО, позволяющего внедрить дидактический метод активного обучения в образовательный процесс для повышения качества подготовки инженеров-механиков, осуществляющих обслуживание и ремонт транспортных средств, в частности в вопросе диагностики технического состояния автомобилей. При этом необходимо предусмотреть следующие основные способы применения ЭСО:

1. Дистанционное обучение. ЭСО может применяться для удаленного обучения в случаях, когда нет возможности у студентов посещать очные занятия.

2. Дополнительный образовательный ресурс. Эффективная помощь студентам по повышению уровня знаний по дисциплинам, которые связаны с общим устройством и диагностикой технического состояния автомобиля.

3. Подготовка к экзаменам по профильным дисциплинам. ЭСО может использоваться как онлайн-тренажер, повышающий эффективность подготовки к экзаменам, так как пользуясь приложением студент совершенствует навыки, необходимые при диагностике технического состояния основных систем автомобиля.

4. Обратная связь и контроль успеваемости. ЭСО предполагает формирование отчета по результатам работы с конкретным студентом, в котором указывается время, затраченное на диагностику технического состояния автомобиля и устранение неисправности, сама неисправность, причина завершения работы в выбранной системе (нарушение техники безопасности или самостоятельное завершение работы студентом), а также ход работы, который заполняет пользователь самостоятельно. По этим данным преподаватель сможет оценить

3. Заменяемость модулей. Такое свойство системы позволит замещать модуль(-и) из одной автомобильной системы на новые, которые нужны только для определенной. В качестве примера можно привести панели с набором инструментов для диагностики. Для одной системы нужны одни приборы, а для другой иные.

4. Повторное использование. Для данного ЭСО означает, что можно использовать модули, которые были созданные для других систем в новой. Например, приборы для диагностирования автомобильных систем.

5. Упрощенное сопровождение. Разбитую на модули программу легче понимать и сопровождать.

С учетом сформулированных требований разработана модульная структура программы, которая, включает:

1. Модуль, отвечающий за данные пользователя. Содержит менеджеры данных пользователя, которые хранят информацию о пользователе (ФИО, группа, преподаватель и так далее) и менеджер составления отчета.

2. Модули, отвечающие за системы (переключение систем и контроль работы выбранной системы). Главный модуль содержит данные о существующих системах, префабы самих автомобильных систем (в данном случае это объекты, которые представляют из себя готовые схемы систем, загружаемые при выборе системы), менеджер, отдающий данные системы и ее префаб при запросе. Модули самих систем содержат менеджеры и контроллеры, обеспечивающие их стабильную работу.

3. Модули, отвечающие за элементы внутри системы (например, отвечающие за работу форсунок или панели передач). Данные модули содержат менеджеры и контроллеры, которые обеспечивают корректную работу элементов систем.

4. Модули, отвечающие за пользовательский интерфейс. Содержит менеджеры каждого вида окон, которые используются в программном продукте, менеджеры и контроллеры анимации.

Функциональная схема электронного средства обучения «Общее устройство и диагностирование технического состояния автомобиля» представлена на рис. 2.

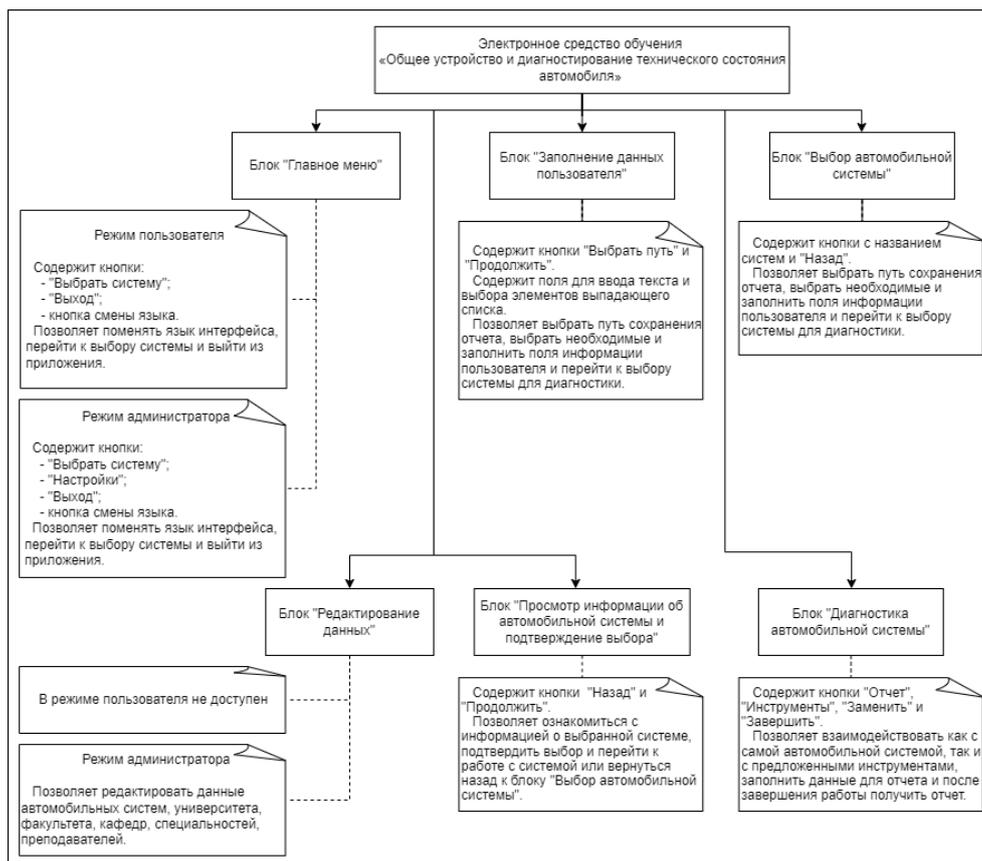


Рис. 2. Функциональная структура приложения

Программный продукт состоит из 6 блоков:

1. «Главное меню». В режиме пользователя позволяет поменять язык интерфейса, перейти к выбору системы и выйти из приложения. В режиме администратора позволяет поменять язык интерфейса, перейти к выбору системы и выйти из приложения.

2. «Заполнение данных пользователя». Позволяет выбрать путь сохранения отчета, выбрать необходимые данные из выпадающего списка, заполнить поля информации пользователя и перейти к выбору системы для диагностики.

3. «Редактирование данных». В режиме пользователя не доступен. В режиме администратора позволяет редактировать данные автомобильных систем, университета, факультета, кафедр, специальностей, преподавателей.

4. «Выбор автомобильной системы». Позволяет выбрать путь сохранения отчета, выбрать необходимые и заполнить поля информации пользователя и перейти к выбору системы для диагностики.

5. «Просмотр информации об автомобильной системе и подтверждение выбора». Позволяет ознакомиться с информацией о выбранной системе, подтвердить выбор и перейти к работе с системой или вернуться назад к блоку «Выбор автомобильной системы».

6. «Диагностика автомобильной системы». Позволяет взаимодействовать как с самой автомобильной системой, так и предложенными инструментами, заполнить данные для отчета и после завершения работы получить отчет.

Тестирование модуля «Топливная система»

Одной из систем, реализованной в программном продукте, является топливная система. После ее выбора перед пользователем открывается экран, на котором отображаются: панель управления; схема системы; кнопки для вызова соответствующих вспомогательных окон; кнопка завершения выполнения лабораторной работы, таймер, который показывает время, затраченное на выполнение, а также меняет цвет в зависимости от того, какой интервал времени прошел: в пределах нормы – зеленый, при незначительном превышении – оранжевый, при длительном выполнении лабораторной работы – красный.

Пользователь может завести двигатель при помощи ключа, расположенного на панели управления. Нажать на педаль газа можно при изменении положения ползунка, расположенного слева от ключа зажигания. Система ведет себя так, как вел бы себя настоящий автомобиль, как с точки представленной информации на спидометрах, так и в звуковом сопровождении.

При заведенном двигателе отображаются указатели в виде стрелок, показывающие направление движения топлива, а под форсунками образуется распыляемое топливо, характерное для их реального рабочего состояния (рис. 3).

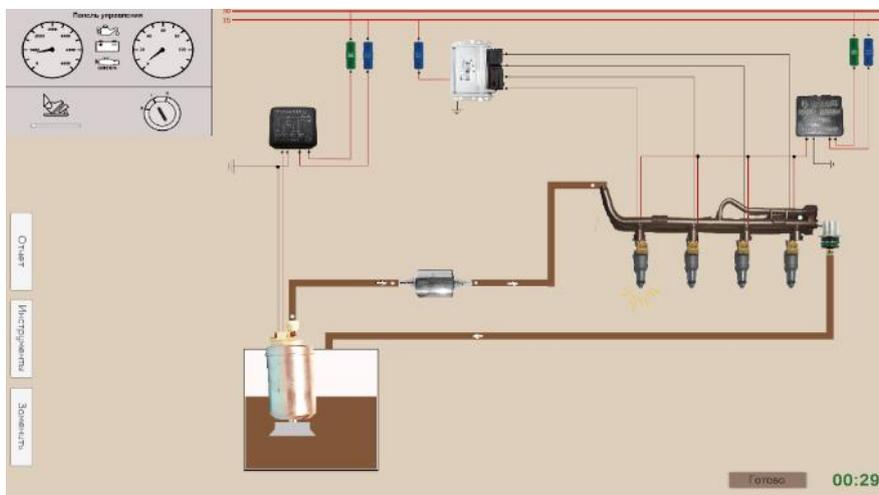


Рис. 3. Имитация работы двигателя

При нажатии на кнопку отчета откроется окно, в которое пользователь может записать все проделанные действия. Поскольку окно доступно все время, то данные в него могут

вноситься итерационно. Вкладка «Инструменты» (рис. 4) содержит инструменты, которые могут понадобиться для поиска неисправности.

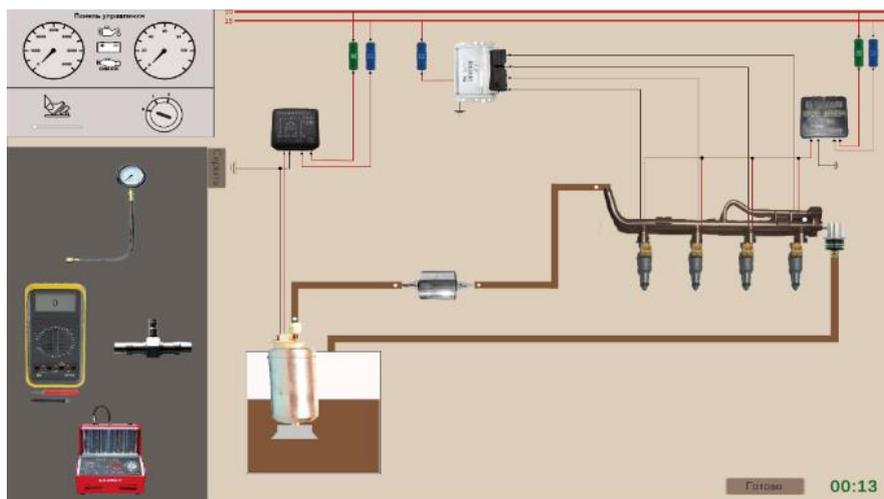


Рис. 4. Вкладка «Инструменты»

В данном примере все инструменты за исключением прибора для диагностики форсунок, можно перетаскивать по экрану и присоединять к элементам схемы системы. Точки соединения тройника и манометра обозначены белым кругом на проводах, а места, к которым можно присоединить щупы мультиметра, обозначены черными точками. Учитывается правильность подключения щупов. Если манипуляция выполнена неправильно, прибор работать не будет. При серьезных нарушениях, способных стать причиной травмы, повреждения прибора или изучаемой системы автомобиля, будет выведено сообщение о нарушении требований техники безопасности с последующим принудительным завершением лабораторной работы, экзамена или иной проверки знаний. Такими нарушениями могут стать попытка подключить прибор при заведенном двигателе или при не снятом предохранителе.

При нажатии на устройство для диагностики форсунок открывается новый экран (рис. 5), на котором отражены: прибор для диагностики форсунок; ультразвуковая ванна для прочистки форсунок; все вкладки, что и на основном, но без «Инструменты»; кнопка возвращения обратно к основному экрану.

Программный продукт помогает пользователю ознакомиться с порядком определения состояния форсунок. Если их последующая прочистка в ультразвуковой ванне не приносит положительного результата, выполняется замена на новые.

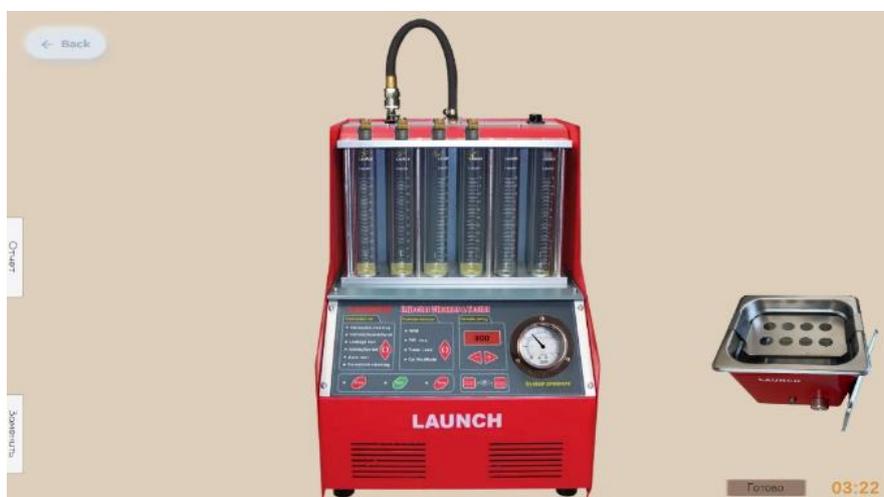


Рис. 5. Диагностика форсунок

Отчет о проделанной работа формируется автоматически. Он содержит всю необходимую информацию (рис. 6). При завершении работы из-за нарушения требований техники безопасности, соответствующая информация также отражается в отчете.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой»

Кафедра автомобильного транспорта
Механико-технологический факультет

Отчет к лабораторной работе «Топливная система»

Студент: Семенченко Екатерина Андреевна
Группа: 24М-ИТП

Время начала выполнения: 26 марта 2025 , 19:32:20
Время окончания выполнения: 26 марта 2025 , 19:38:20
Общее время выполнения: 00:05:59

Состояние системы: Система исправна
Тип системы: Топливная система
Причина неисправности: Одна из форсунок качает топлива на 5% меньше остальных
Причина принудительного завершения выполнения лабораторной работы: Не было обнаружено причин для принудительного завершения выполнения лабораторной работы.

Ход работы

Двигатель заводится с первой попытки. Стрелка колеблется между 600 и 900. Максимальное количество оборотов — 4000. Манометр показывает 3 бара при первом положении ключа и при нажатии на педаль газа. Мультиметр показывает 12 В при первом положении ключа и 14 В при заведенном двигателе.
Были проверены форсунки. Одна из них качала 50 мл топлива, в то время как остальные — 70 мл. Прочистка форсунок не дала никаких результатов. После замены форсунки все 4 стали качать по 70 мл. Двигатель заводится с первого раза. Стрелка показывает 900 оборотов. Максимальное количество — 6000.
Причина неисправности: одна из форсунок в неисправном состоянии.

Рис. 6. Пример содержания отчета, который был составлен после завершения работы с системой, инициированной пользователем

Заключение

Таким образом, предлагаемое средство электронного обучения «Общее устройство и диагностирование технического состояния автомобиля» позволяет более широко и гибко внедрять инновационный дидактический метод активного обучения в образовательный процесс кафедры автомобильного транспорта Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой путем использования приложения как на этапе подготовки, так при контроле знаний уже работающих сотрудников предприятий автомобильной отрасли. Поведение систем, которые реализованы в данном программном продукте, максимально приближены к реальным режимам работы систем автомобиля.

AN ELECTRONIC TOOL FOR STUDYING THE GENERAL STRUCTURE AND PRINCIPLES OF DIAGNOSING THE TECHNICAL CONDITION OF A CAR

E.A. SEMENCHENKO, V.V. KOSTRITSKIY, R.P. BOHUSH

Abstract. This article discusses the features of creating an electronic learning tool (e-Learning Tool) «An electronic tool for studying the general structure and principles of diagnosing the technical condition of a car» for students to study the device and diagnose the technical condition of the car. The developed functional scheme of e-Learning Tool and the software implementation of e-Learning Tool based on it are presented. The features of use, examples of the work of e-Learning modules are described, the general structure of the report formed based on the results of studying the material by students is presented.

Keywords: mechanical engineer, interactive education, simulator.

Список литературы

1. Рыло, Т.В., Дубина Л.П. // Идеи. Поиски. Решения: сборник статей и тезисов XII Международной научно-практической конференции преподавателей, аспирантов, магистрантов, студентов. 2018. С. 55– 59.
2. Черных Т.А., Рубцова Ю.А. // Открытое образование. 2018. №22(2). С. 54–60.

UDC 621.391

PERFORMANCE EVALUATION OF YOLOV12 IN SAR IMAGE TARGET DETECTION: A COMPARATIVE STUDY WITH YOLOV11

W.Q. WANG, X. ZHANG, J. MA

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus**Received on March 29, 2025*

Abstract. The performance of YOLOv12 in SAR image target detection is evaluated and compared with YOLOv11. Experimental results show that YOLOv12 is superior to YOLOv11 in detection accuracy (mAP50 and mAP50-95), small target detection and complex background processing, and has faster training convergence and stronger generalization ability. The study verifies the advantages of YOLOv12 in SAR image target detection.

Keywords: SAR image; target detection, YOLOv12, performance comparison.

Introduction

Synthetic Aperture Radar (SAR) images have important applications in target detection tasks due to their all-weather and all-day imaging capabilities. However, the characteristics of SAR images (such as speckle noise, complex textures, and small target distribution) pose challenges to target detection models. In recent years, the YOLO (You Only Look Once) series of models have become the mainstream method in the field of target detection due to their efficient real-time and detection performance [1].

As an important version of the YOLO series, YOLOv11 has performed well in various target detection tasks by improving feature extraction and detection head design. As the latest version, YOLOv12 introduces the Area Attention module and the Residual Efficient Layer Aggregation Network (R-ELAN), further improving the global modeling capability and feature aggregation efficiency.

This paper aims to evaluate the performance of YOLOv12 in SAR image target detection and compare it with YOLOv11. Through experimental verification, we will explore the advantages and disadvantages of YOLOv12 in SAR image target detection tasks.

Related Work

Synthetic Aperture Radar (SAR) images, with their all-weather and all-day imaging capabilities, play a significant role in target detection tasks. However, the unique imaging characteristics of SAR images, such as speckle noise, complex backgrounds, and small target distributions, pose significant challenges to target detection. Traditional feature-based methods, such as HOG and SIFT, are insufficiently adaptable to SAR images and struggle to effectively handle complex noise and texture interference. In recent years, the introduction of deep learning techniques, particularly the widespread application of Convolutional Neural Networks (CNNs), has greatly advanced SAR image target detection. Models such as Faster R-CNN, SSD, and YOLO have demonstrated excellent performance in detection accuracy and efficiency through automated feature extraction and multi-scale feature fusion. However, these models are primarily designed for natural images and often require further optimization to adapt to the unique characteristics of SAR images.

The YOLO (You Only Look Once) series of models, with their efficient end-to-end target detection capabilities, have become a mainstream approach in object detection. From YOLOv1 to YOLOv11, the models have undergone continuous improvements in feature extraction, detection head design, and multi-scale feature fusion [2]. For instance, YOLOv4 introduced the CSPNet structure to

enhance feature representation and computational efficiency, YOLOv5 achieved faster inference speed through lightweight design, and YOLOv11 improved detection accuracy while maintaining real-time performance through an enhanced feature extraction network and an Anchor-Free mechanism. These advancements have enabled YOLO models to excel in various object detection tasks, but their adaptability to SAR image target detection remains an area requiring further exploration.

As the latest iteration in the YOLO series, YOLOv12 incorporates several critical advancements in model structure and detection capabilities [2]. The introduction of the Area Attention module enhances the model's ability to capture global dependencies, improving its adaptability to complex scenarios. The Residual Efficient Layer Aggregation Network (R-ELAN) optimizes multi-scale feature fusion, further enhancing the detection performance for small targets [3]. Additionally, YOLOv12 refines the Anchor-Free mechanism, simplifying the target box generation process while improving detection accuracy. Although YOLOv12 has demonstrated outstanding performance in natural image object detection tasks, its effectiveness in SAR image target detection has yet to be fully validated.

In response to the aforementioned research gaps, this study systematically evaluates the performance of YOLOv12 in SAR image target detection tasks and conducts a detailed comparative analysis with YOLOv11. This study aims to explore the advantages of YOLOv12 in solving specific challenges of SAR images, such as speckle noise, complex background and small target detection, through experimental verification, so as to provide theoretical insights for the further development of SAR image target detection in Figure 1.

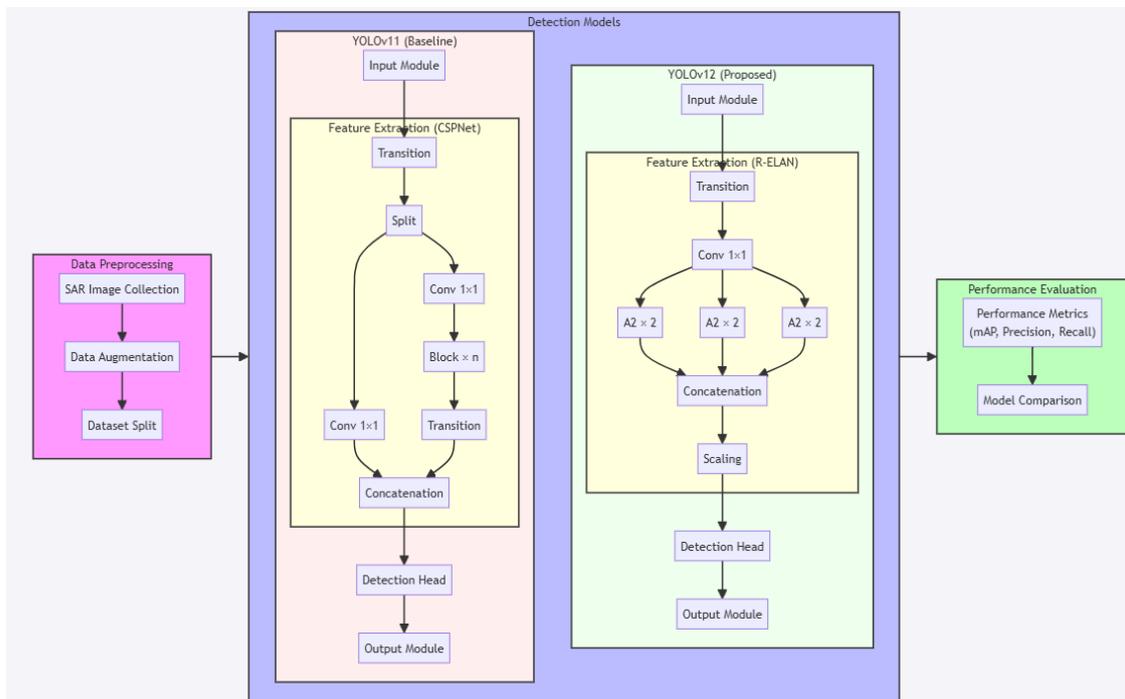


Figure 1. Comparison Workflow Diagram of YOLOv11 and YOLOv12 for SAR Image Target Detection

Experimental results and analysis

Compared to YOLOv11, YOLOv12 demonstrates significant performance improvements in object detection tasks [2]. From the perspective of training loss, YOLOv12's box_loss (bounding box regression loss) decreases faster and achieves a lower final convergence value, indicating better performance in bounding box positioning and more accurate target localization [3]. The cls_loss (classification loss) is significantly lower than YOLOv11, reflecting stronger classification capabilities and more accurate target category differentiation. Additionally, the dfl_loss (distribution focal loss) is also lower than YOLOv11, showcasing better performance in bounding box distribution prediction. On the validation set, YOLOv12's val/box_loss is also lower, further

confirming its advantage in bounding box prediction. The val/cls_loss is consistently lower than YOLOv11, indicating more stable classification performance on the validation set. Similarly, the val/dfi_loss shows that YOLOv12 has stronger generalization capabilities in distribution prediction. Whether in the training phase or the validation phase, YOLOv12 surpasses YOLOv11 in all loss metrics, highlighting its significant advantages in model optimization and convergence speed in Figure 2.

In terms of evaluation metrics, YOLOv12 achieves higher and more stable precision, indicating a lower false positive rate and more accurate target detection. Its recall is also higher than YOLOv11, reflecting a lower false negative rate and more comprehensive target detection. The metrics/mAP50 (mean average precision @ IoU=50 %) is significantly higher than YOLOv11, demonstrating more accurate object predictions under looser IoU thresholds. Furthermore, the metrics/mAP50-95 (mean average precision @ IoU=50 %-95 %) improvement indicates that YOLOv12 maintains strong detection performance even under stricter IoU thresholds. Overall, YOLOv12 outperforms YOLOv11 across all evaluation metrics, particularly in mAP50 and mAP50-95, showcasing higher accuracy and robustness in SAR image object detection tasks in Figure 3.

Presents a comprehensive comparison between YOLOv11 and YOLOv12. From the perspective of training and validation losses, YOLOv12 exhibits faster convergence, lower final values, and stronger generalization capabilities in terms of box_loss, cls_loss, and dfi_loss in Figure 2. In terms of evaluation metrics, YOLOv12 achieves higher precision and recall, reflecting lower false positive and false negative rates, respectively. The significant improvements in mAP50 and mAP50-95 further demonstrate its higher detection accuracy, especially under stricter IoU thresholds in Table 1.

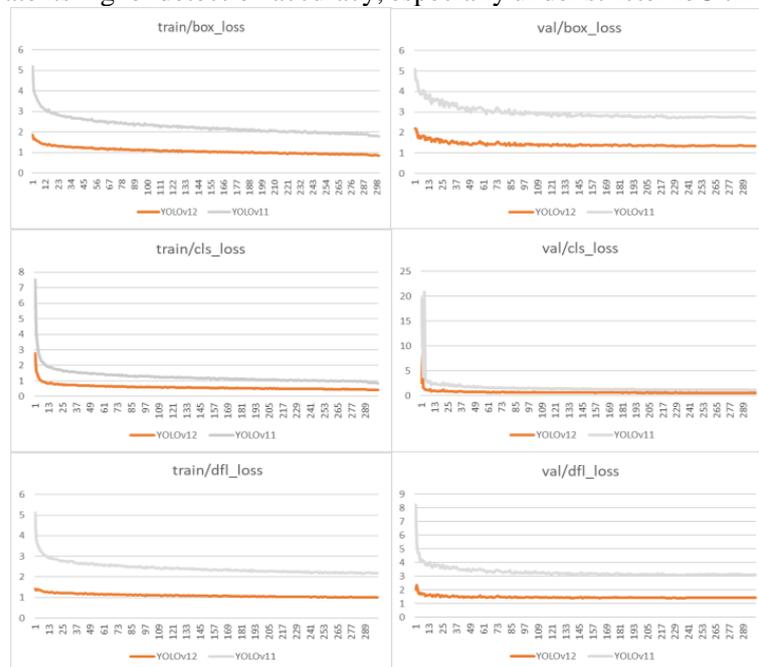


Figure 2. Comparison of YOLOv11 and YOLOv12 Training and Validation Losses

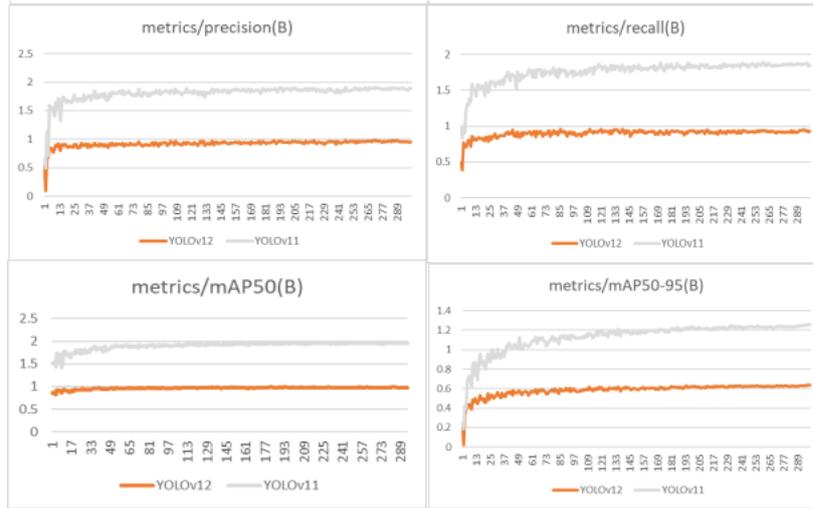


Figure 3. Comparison of YOLOv11 and YOLOv12 Evaluation Metrics

Table 1. Comparison of YOLOv11 and YOLOv12 Performance Metrics

Metric	YOLOv11	YOLOv12	Improvement
Train Box Loss	Higher	Lower	Faster convergence, more accurate localization
Train Cls Loss	Higher	Lower	More accurate classification
Train DFL Loss	Higher	Lower	Better distribution predictions
Val Box Loss	Higher	Lower	Stronger generalization ability
Val Cls Loss	Higher	Lower	More stable classification performance
Val DFL Loss	Higher	Lower	Stronger generalization ability
Precision	Lower	Higher	Lower false positive rate
Recall	Lower	Higher	Lower false negative rate
mAP50	Lower	Higher	Higher detection accuracy
mAP50-95	Lower	Higher	Better performance under strict IoU

Conclusion

This paper evaluates the performance of YOLOv12 in SAR image object detection and compares it with YOLOv11 [2]. Experimental results show that YOLOv12 is significantly better than YOLOv11 in detection accuracy and robustness, especially in small target detection and complex background processing capabilities [3]. However, its inference speed is slightly lower than that of YOLOv11 but still meets the requirements of real-time detection.

Future research can further explore the application of YOLOv12 in more SAR image tasks (such as semantic segmentation and change detection) and combine multimodal data (such as optical images and SAR images) to further improve the detection performance.

References

1. J. Redmon., A. Farhadi. // ARXiv preprint arXiv:1506.02640. 2016.
2. Z. Ge., S. Liu., F. Wang., et al. // arXiv preprint arXiv:2308.12345. 2023.
3. Z. Zhang., H. Sun. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2021.

APPLICATION OF A NONPARAMETRIC GAIT MODEL AND FEATURE GENERATION BASED ON INSOLE DATA

H. LI, V.YU. TSVIATKOU

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

Received April 04, 2025

Abstract. Gait and balance disorders pose significant risks of injury and negatively impact quality of life, especially among the elderly and individuals with neurological conditions. In this work, a novel feature generation method based on a nonparametric gait model (NPWM) for plantar pressure data is proposed for early fall risk assessment. Unlike traditional gait analysis methods that rely on fixed parameters or predefined models, the proposed approach directly extracts spatiotemporal features from real world data collected by wearable plantar pressure sensors. These features include raw spatial distributions, gait temporal characteristics, balance stability metrics, energy expenditure features, and informative feature ratios. Experimental results demonstrate that the proposed method achieves a fall risk prediction accuracy of 0,9, offering significant advantages over conventional clinical assessment methods.

Keywords: plantar pressure, nonparametric gait model, feature generation, fall risk assessment.

Introduction

With the acceleration of global aging, fall risk assessment has become a hot topic in health management. Traditional methods (such as the TUG test [1] and Berg Balance Scale [2]) suffer from high subjectivity, time consumption, and significant limitations. In recent years, gait analysis based on data collected from plantar pressure sensors has gradually attracted attention [3]. However, generating representative features from the vast amounts of data remains a key challenge [4]. To address this problem, this paper proposes a feature generation method based on a nonparametric gait model. By analyzing plantar pressure data from multiple perspectives, the method comprehensively reflects gait variations and balance status, providing a new approach for early fall risk identification.

Method description

We propose a fall risk feature mining method (FRFMM). The core idea of this method is to use nonparametric walking methods (NPWM) to directly extract spatiotemporal information from raw plantar pressure signals without relying on the fixed parameter assumptions of traditional models. The main process includes data collection and preprocessing, raw feature generation, and feature ratio construction.

After participants wear smart shoes, they walk along a designated corridor while the pressure signals of both feet are collected in real time. The preprocessing module filters, normalizes, and segments the signals temporally to ensure the accuracy of subsequent feature extraction.

Based on the plantar pressure signals, features that reflect changes in the foot center of pressure are extracted in both the lateral and longitudinal directions. Raw spatial features are then constructed using the pressure distribution from various sensors across different regions. In addition, temporal gait features are extracted by combining peak values and time intervals within the gait cycle, to reflect balance status, balance features describing the differences in pressure distribution between the left and right feet are incorporated, along with energy expenditure features estimated from body mass and movement speed.

To enhance the discriminative power of the features, the method further constructs ratio features such as the left and right pressure ratio and time interval ratios. These ratios are used to reveal the underlying balance and stability issues present in gait.

Experimental and results

The feature generation and selection process are based on a dynamic gait fall risk dataset [5]. Each participant wore smart shoes equipped with eight insole pressure sensors, with the right foot sensor placement shown in Figure 1. Under medical supervision, participants walked along 20 meters' corridor for over two minutes while being evaluated with the BBS and TUG test. Plantar pressure data were collected at a sampling rate of 20 Hz and transmitted in real time to a mobile phone.



Figure 1. Distribution of insole pressure sensor placement

A random forest classifier was used to train and validate the extracted features. In Figure 2 illustrates the precision of various feature selection methods. The FRFMM achieves the highest precision at 0,93, demonstrating a strong ability to reduce false positives. The simulated annealing (SA) and genetic algorithm (GA) methods also perform well, with precision values of 0,83 and 0,80, respectively. In contrast, the recursive feature elimination (RFE) method shows the lowest precision at 0,54, suggesting limited effectiveness in identifying discriminative features. The correlation-based (CB) feature selection method yields a moderate performance, indicating that although correlation provides some relevance guidance, it may not be sufficient to isolate the most predictive subset of features in complex classification tasks.

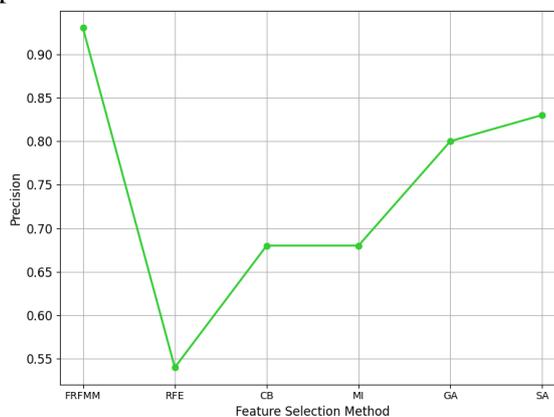


Figure 2. Precision assessment of random forest classifier using the proposed FRFMM and five well known feature selection methods

In Figure 3 illustrates the recall values. FRFMM once again leads with a recall of 0,90, indicating strong ability in identifying true positive instances. GA and SA also demonstrate effective detection capabilities. In contrast, RFE shows the lowest recall at 0,50, indicating significant miss rates.

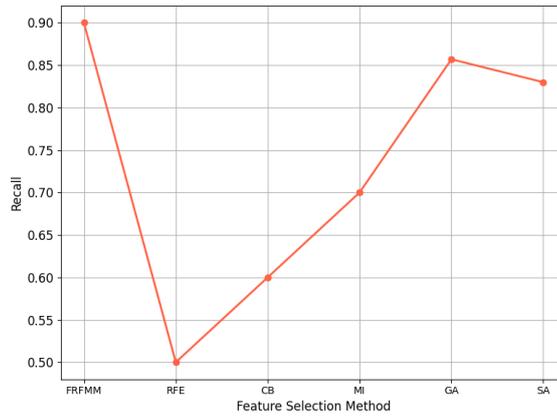


Figure 3. Recall assessment of random forest classifier using the proposed FRFMM and five well known feature selection methods

In Figure 4 compares the F1-score, which is the harmonic mean of precision and recall and reflects the balance between them. FRFMM again achieves the highest F1-score of 0,90, indicating a well-rounded performance. SA (0,83) and GA (0,792) also perform effectively. RFE shows the lowest F1-score at 0,52, reaffirming its poor performance.

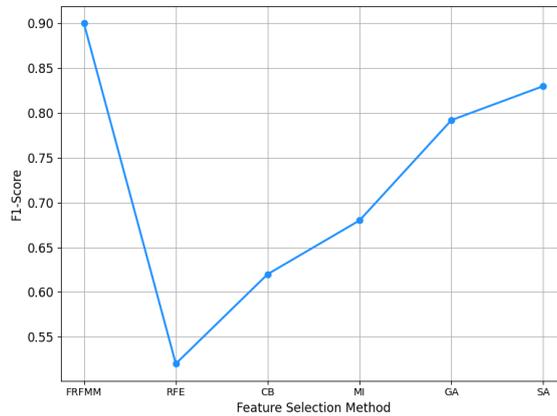


Figure 4. F1-score assessment of random forest classifier using the proposed FRFMM and five well known feature selection methods

In Figure 5 compares the accuracy across different feature selection methods. FRFMM ranks first with an accuracy of 0,90, indicating superior overall classification performance. SA and GA also demonstrate strong effectiveness. RFE again performs the worst with an accuracy of 0,50, consistent with its precision and recall. The CB method and the MI method show moderate performance, with accuracy values of 0,60 and 0,70, respectively.

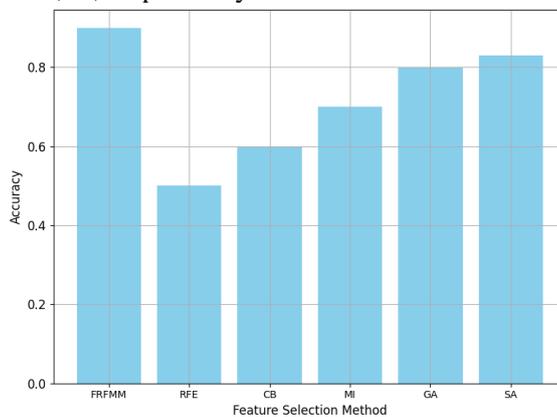


Figure 5. Accuracy assessment of random forest classifier using the proposed FRFMM and five well known feature selection methods

Conclusion

The FRFMM based on a nonparametric gait model proposed in this paper effectively extracts key information from plantar pressure data, enabling early fall risk assessment. Experimental results demonstrate that the method achieves high prediction accuracy and real time performance, providing strong support for practical applications.

References

1. Beauchet O., Annweiler C., Assal F., et al. // *Journal of the Neurological Sciences*. 2010. Vol. 294. P. 102–106.
2. Ayvat E., Doğan M., Ayvat F., et al. // *Neurological Sciences*. 2024. P. 1–5.
3. Savadkoobi M., Oladunni T., Thompson L. A. // *Expert Systems with Applications*. 2021. Vol. 182. P. 115–220.
4. Li H. // *IEEE Sensors Journal*. 2025. Vol. 25(5). P. 8721–8736.
5. Song Z., et al. // *IEEE Trans. on NSPE*. 2022. Vol. 30. P. 1060–1070.

UDC 535.81; 519.25

ENHANCING GAS DISTRIBUTION MAPPING RECONSTRUCTION ACCURACY THROUGH GEOMETRIC SCANNING TECHNIQUES

N.V. BACH

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus**Received March 28, 2025*

Abstract. Gas distribution mapping and source localization are critical for industrial safety, environmental monitoring, and hazard mitigation. This paper evaluates the influence of geometric scanning parameters on the reconstruction accuracy of gas distribution mapping using tunable diode laser absorption spectroscopy. The paper explores the interaction of laser light with gas molecules and surfaces, highlighting the role of absorption, scattering, and reflection in gas concentration measurement. Four laser scanning configurations are analyzed. Five tomographic algorithms are assessed for their effectiveness in reconstructing 2D gas distribution maps. The results demonstrate that the maximum-likelihood expectation maximization algorithm achieves the highest reconstruction accuracy across all configurations, while the triple fan-parallel beam scanning non-uniform distributed configuration offers the best overall accuracy.

Keywords: Gas distribution mapping, scanning configurations, laser light interaction, laser absorption.

Introduction

Gas distribution mapping (GDM) and source localization are critical tasks in various applications, including industrial plant inspections, landfill monitoring, and the detection of explosives or toxic gases at harbors and airports [1]. If the released gas is flammable and explosive, once it explodes, it will cause devastating damage to surrounding life and the environment, serious damage to the health of humans. Therefore, the normalized monitoring and prewarning of the source of hazardous gas leakage is of great importance.

Methods for GDM can be categorized into contact and noncontact measurements. Contact methods involve using semiconductors, electrochemical sensors, and similar technologies. These typically measure gas concentrations point by point using portable sensors or fixed sensor networks [2]. However, they often struggle to provide comprehensive spatiotemporal gas distribution data. Noncontact measurements include optical gas imaging (OGI) [3], laser absorption spectroscopy (LAS) combined with tomographic reconstruction techniques [4]. OGI utilizes infrared absorption properties to visualize gases, particularly effective in industrial settings for detecting gas leaks by providing real-time thermal images that highlight the location and extent of emissions. In contrast, LAS measures gas concentrations by analyzing laser beam absorption at specific wavelengths, using tomographic techniques to reconstruct gas distributions map. LAS generally offers higher accuracy in quantifying gas concentrations due to precise wavelength-dependent measurements, suitable for long-range detection and diverse environmental conditions. However, OGI provides immediate visual feedback for rapid identification and localization of gas leaks, although it may be limited by environmental factors affecting infrared imaging [5]. Laser spectroscopy techniques, such as tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS), have garnered significant development in the field of trace gas detection in recent years due to their advantages of high sensitivity, precision [6].

Principle of TDLAS

The laser of the TDLAS sensor operates near the wavelength corresponding to the absorption spectrum of specific gas molecules, with absorption levels indicating the concentration of the target gas [7]. Transmitted laser intensity based on absorption, scattering and reflectance models is defined as

$$I_t(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot K_r(\theta) \cdot (K_{abs}(y, l) \cdot K_{sca}(l))^2, \quad (1)$$

where $K_{sca}(l) = \exp(-K \cdot l)$ is the coefficient laser intensity attenuation according to the Rayleigh scattering [8, 9], the $K = 32\pi^3(\mu - 1)^2 / 3N_{mol}\lambda^4$ is the opacity coefficient, μ is the refractive index, are quantities experimentally measurable, λ is the wavelength of laser, N_{mol} is the number of molecules per unit volume, $K_{abs}(y, l) = \exp(-P \cdot y \cdot S(T) \cdot \phi(\lambda) \cdot l)$ is the coefficient laser intensity attenuation according to the Beer-Lambert law [7], y is the gas concentration along the laser path, l is the laser path length, P is the gas pressure, $\phi(\lambda)$ is the unity normalized line shape function, and $S(T)$ is the line strength function of temperature, I_0 is output laser intensity, $K_r(\theta)$ is the surface reflection coefficient, θ is the incidence angle of laser beam.

The average concentration of the optical path is determined by the relationship between the incident and transmitted light intensities based on optical reflectance, scattering and absorption models

$$y = \left(\ln \left(\frac{I_0(\lambda) \cdot K_r(\theta)}{I_t(\lambda)} \right) \cdot \frac{\cos \theta}{2 \cdot H} - K \right) \cdot \frac{1}{P \cdot S(T) \cdot \phi(\lambda)}, \quad (2)$$

where $H = l \cdot \cos \theta$ is the high of TDLAS sensor.

For reconstructing 2D image gas distribution mapping, tomographic reconstruction algorithm is used to solve ill-conditioned system of linear equations. Scanning the gas diffusion area to be measured using a TDLAS telemetry sensor (Figure 7), which collects concentration data y along the laser paths at multiple angles or intervals. Therefore, the whole region can be described by the vector Y and the mean gas concentrations in each cell can form a column vector X . Their relationship can be written as

$$\vec{Y} = \vec{L} \cdot \vec{X} + \varepsilon \vec{1}, \quad (3)$$

where $\vec{L} = (l_{ij})_{0 \leq i < M, 0 \leq j < N}$ the absorption path length value matrix that contains the absorption path length value $l_{i,j}$ of the i -th laser beam in the j -th cell matrix, $\vec{X} = (x_0, \dots, x_{N-1})^T$ and x_j are column vector concentration and the averaged gas concentration in cell j and $\vec{1}$ is a column vector of ones of length M , ε is the measurement noise term, M is the number of laser beam, N is the number of grid cell [6].

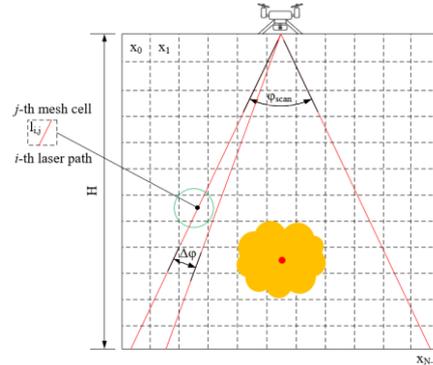


Figure 7. Laser scanning parameters and discretization configuration for gas diffusion area. The yellow area represents gas cloud

According to the measured matrix Y and the known absorption path length value matrix L , the concentration distribution X can be inversely calculated by tomographic algorithms.

Tomography algorithm

Least squares method (LSQR) is an iterative algorithm designed to solve large, sparse linear systems and least squares problems. Tikhonov regularization is widely used to stabilize solutions of ill-posed problems by introducing a regularization term that counteracts the amplification of noise [7]. Maximum-likelihood expectation maximization algorithm (MLEM) is an iterative method used to reconstruct the image by maximizing the likelihood function. It is particularly useful in scenarios with incomplete data. The method iteratively updates the solution to maximize the probability of the observed data given the model. Simultaneous algebraic reconstruction technique (SART) combines relaxation factors and iterative smoothing, providing better noise handling and convergence properties [6].

In order to evaluate the reconstruction quality of methane-diffusion distribution, the following three evaluation indexes are used to quantify the agreement between the original concentration field and the reconstructed result in this work. Three evaluation indexes: the normalized root mean square distance (NRMSD), the normalized average absolute distance (NAAD) and the gas-distribution map similarity coefficient (ϵ) [6].

Experimental result

The optical path configuration affects the reconstruction accuracy. In general, increasing the number of laser beams enhances reconstruction accuracy. However, to achieve an optimal balance between accuracy and computational efficiency, a thorough optimization and selection analysis are applied on the four laser scanning configurations illustrated in Figure 8.

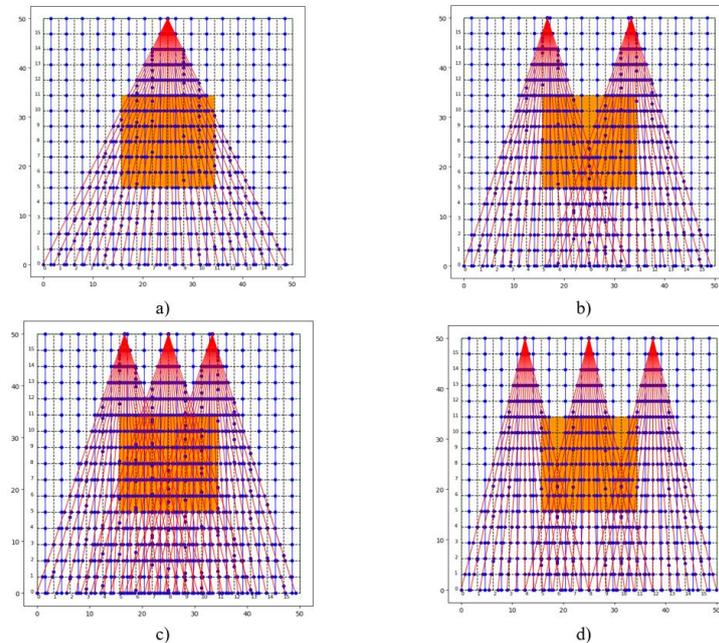


Figure 8. Laser-scanning coverage for the gas distribution mapping reconstruction based on a 16×16 grid discretized. Configurations of laser scanning: a) Single fan-parallel beam scanning (SFPS), b) Double fan-parallel beam scanning (DFPS), c) Triple fan-parallel beam scanning non-uniform distributed (TFPSN), d) Triple fan-parallel beam scanning uniform distributed (TFPSU). The green lines represent the parallel-beam optical paths. The red lines represent the fan-beam optical paths. The yellow area represents gas cloud.

Figure 9 shows the gas-distribution map similarity coefficient of different algorithms under 16×16 grid cells and different type of configurations of laser scanning.

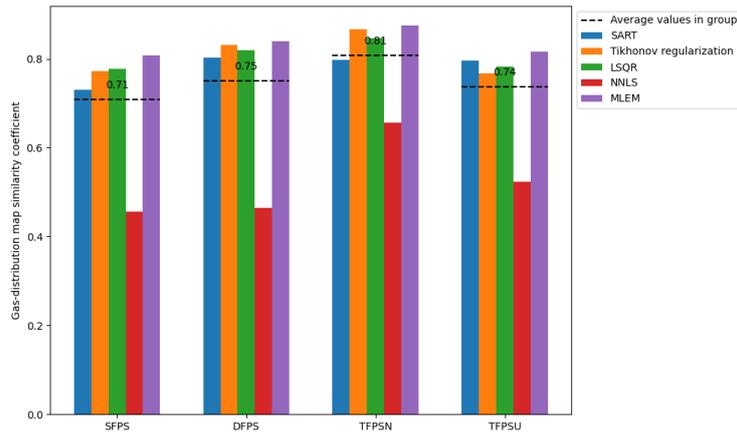


Figure 9. Gas-distribution map similarity coefficient of different algorithms under 16×16 grid cells and different type of configurations of laser scanning

It follows from Figure 9, among the algorithms the MLEM consistently achieves the highest similarity coefficient across all configurations. Furthermore, the TFPSN configuration yields the highest gas-distribution map similarity coefficient compared to the other scanning configurations, regardless of the algorithm used.

Conclusion

This paper presented a general review of gas distribution mapping using TDLAS, focusing on the impact of laser scanning configurations and tomographic reconstruction algorithms. The findings underscore the role of scanning configuration and algorithm selection in enhancing reconstruction accuracy.

Among the tomographic algorithms, MLEM consistently achieved the highest gas-distribution map similarity coefficient, demonstrating its robustness in handling complex and noisy datasets;

The TFPSN configuration provided the best reconstruction accuracy among the four tested configurations, achieving a superior balance between coverage and computational efficiency.

By understanding the behavior of light interactions with gas molecules and surfaces, and optimizing scanning parameters, this study offers significant advancements in the accuracy and efficiency of GDM systems.

References

1. Theophanides M., Anastassopoulou J. // *J. Environ. Sci. Health A Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng.* 2009. Vol. 44. P. 758–766.
2. Wang X., Qian C., Zhao Z., Li J. and Jiao M. // *Chemosensors*. 2023. Vol. 11. P. 96–110.
3. Aoki T., Ohka S., Shiozawa D., Ogawa Y., Sakagami T. // *Engineering Proceedings*. 2023. Vol. 51, P. 44–55.
4. Hu Y., Xu L., Shen X., Jin L. // *Applied Optics*. 2021. Vol. 60. P. 9396–9403.
5. Log T., Pedersen W.B., Moumets H. // *Energies*. 2019. Vol. 12. P. 1454–1464.
6. Wang D., Li Y., Pu Y. // *Sensors*. 2024. Vol. 24. P. 1307–1321.
7. Sun Y., Chen W., Li F., Gu Z., Feng L., Guo D. and Cai H. // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2023 Feb. Vol. 72. P.1–11.
8. Pradhan R. K. // *Science*. 2015. Vol. 28. P. 31–40.
9. Stewart Q. J. // *Opt. Soc. Am.* 1925. Vol. 11. P. 581–597.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ОБЕЗЛИЧИВАНИЯ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХА.М. ТИМОФЕЕВ¹, К.Р. ВОСКОВЦЕВА², Я.А. КЛИНДУХОВ²*1 – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь,**2 – Национальный детский технопарк, Республика Беларусь**Поступила в редакцию 1 апреля 2025*

Аннотация. С учетом требований законодательства Республики Беларусь в сфере защиты информации предложена структурная схема, посредством которой возможна реализация процедуры обезличивания персональных данных на базе метода изменения состава или семантики. Данная схема основана на применении набора доверительных вычислительных баз, разделении персональных данных на отдельные блоки и характеризуется достаточно высоким уровнем информационной безопасности, что определяется усложнением процедуры частотного анализа, который может быть применен со стороны нарушителя информационной безопасности по отношению к обезличенным персональным данным. Реализация обезличивания персональных данных с применением предложенной схемы предусмотрена на базе программных, аппаратных или программно-аппаратных средств, не требует больших вычислительных мощностей со стороны оборудования легитимных пользователей, может быть применена к любым атрибутам персональных данных и позволяет сохранить такое свойство обезличенных персональных данных, как полнота.

Ключевые слова: информационные системы, персональные данные, обезличивание персональных данных, методы обезличивания персональных данных, метод изменения состава или семантики.

Введение

В настоящее время одной из наиболее важных задач, решаемых при построении информационных систем и обработке содержащейся в ней информации, является обеспечение защиты информации [1–3].

Информационной системой называют совокупность банков данных, информационных технологий и комплекса (комплексов) программно-технических средств [4].

Защита информации подразумевает применение комплекса правовых, организационных и технических мер, направленных на обеспечение целостности (неизменности), конфиденциальности, доступности и сохранности информации [4].

В соответствии с требованиями законодательства Республики Беларусь [5, 6] собственник (владелец) информационной системы, предназначенной для обработки персональных данных (информации ограниченного распространения/предоставления) обязан принимать меры по обеспечению информационной безопасности персональных данных в случае, если персональные данные не являются общедоступными, а относятся к биометрическим, генетическим, специальным или иным персональным данным.

Персональными данными является любая информация, относящаяся к идентифицированному физическому лицу или физическому лицу, которое может быть идентифицировано [5].

Физическое лицо, которое может быть идентифицировано, – это физическое лицо, которое может быть прямо или косвенно определено, в частности через фамилию, собственное имя, отчество, дату рождения, идентификационный номер либо через один или несколько признаков, характерных для его физической, психологической, умственной, экономической, культурной или социальной идентичности [5].

Для обеспечения информационной безопасности персональных данных целесообразно использовать методы их обезличивания [6]. К числу таких методов относят метод изменения состава или семантики, сущность реализации которого заключается в обобщении, изменении или удалении части сведений, позволяющих идентифицировать субъекта персональных данных.

Субъект персональных данных – это физическое лицо, в отношении которого осуществляется обработка персональных данных [5].

Обезличивание персональных данных указанным выше методом не требует наличия больших вычислительных мощностей, однако характеризуется следующими недостатками. Во-первых, удаление части сведений, позволяющих идентифицировать субъекта персональных данных, без их сохранения в отдельной базе данных приводит к утрате такого свойства обезличенных персональных данных, как полнота. Во-вторых, простые замены исходных символов персональных данных обезличенными сохраняет вероятности появления соответствующих символов обезличенных персональных данных. В этом случае нарушитель информационной безопасности имеет возможность, получив доступ к обезличенным персональным данным, рассчитать вероятности появления отдельных символов и различных их сочетаний, что позволит ему раскрыть содержимое доверительной вычислительной базы (ДВБ). В связи с этим целью данной работы являлась разработка схемы обезличивания персональных данных, построенной на базе метода изменения состава или семантики, которая свободна от недостатков существующих схем обезличивания персональных данных и не требует больших вычислительных ресурсов от оборудования легитимных пользователей.

В качестве объекта исследования использован метод изменения состава или семантики. Данный метод выбран в качестве объекта исследования, поскольку он является одним из методов обезличивания персональных данных в соответствии с требованиями Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь [6], являющимся государственным органом, который осуществляет регулирование деятельности по обеспечению защиты информации.

Предметом исследования являлась разработка структурной схемы, реализующей обезличивание персональных данных на основе метода изменения состава или семантики с применением набора ДВБ.

Реализация метода изменения состава или семантики

На рис. 1 показана структурная схема обезличивания персональных данных, построенная на базе метода изменения состава или семантики.

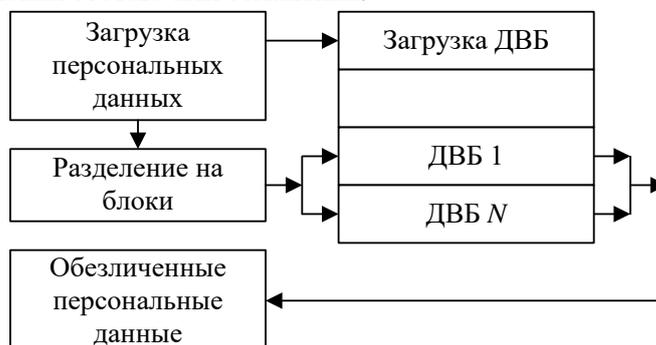


Рис. 1. Структурная схема обезличивания персональных данных, построенная на базе метода изменения состава или семантики с применением наборов ДВБ

Сущность функционирования данной схемы заключается в следующем. Персональные данные, подлежащие обезличиванию, загружают в ДВБ, которая содержит набор таблиц подстановки ДВБ 1, ДВБ 2, ..., ДВБ N. Персональные данные разбивают на блоки, каждый из которых последовательно обезличивают с помощью ДВБ 1, ДВБ 2, ..., ДВБ N, ДВБ 1, ДВБ 2, ..., ДВБ N и т.д.

Важно отметить, что содержимое ДВБ необходимо сохранять в секрете и обновлять в соответствии с требованиями, предъявляемыми в месте эксплуатации информационной системы.

Заключение

Разработана структурная схема обезличивания персональных данных на основе набора доверительных вычислительных баз, содержащих символы исходных персональных данных и символы обезличенных персональных данных.

Предложены принципы обезличивания персональных данных на основе метода изменения состава или семантики, заключающиеся в использовании наборов доверительных вычислительных баз, что позволило повысить уровень информационной безопасности обезличенных персональных данных за счет изменения вероятности появления символов обезличенных персональных данных по отношению к соответствующим символам исходных персональных данных.

STRUCTURAL SCHEME OF DEPERSONALIZATION OF PERSONAL DATA

A.M. TIMOFEEV, K.R. VOSKOVTSOVA, Y.A. KLINDUKHOV

Abstract. A structural scheme of personal data depersonalization is proposed. This scheme is based on the method of changing the composition or semantics and complies with the requirements of the legislation of the Republic of Belarus in the field of information security. The scheme uses a set of trusted computing bases and division of personal data into separate blocks. This complicates the procedure of frequency analysis, which can be applied by an information security violator in relation to depersonalized personal data. The implementation of personal data depersonalization is provided on the basis of software and hardware. At the same time, no large computing power is required from the equipment of legitimate users. The scheme can be applied to any attributes of personal data and allows preserving such a property of depersonalized personal data as completeness.

Keywords: information systems, personal data, depersonalization of personal data, methods of depersonalization of personal data, method of changing the composition or semantics.

Список литературы

1. Ворона В.А. Биометрическая идентификация личности. М., 2023.
2. Коллинз М. Защита сетей. Подход на основе анализа данных. М., 2020.
3. Остапенко Г.А. Информационные операции и атаки в социотехнических системах: организационно-правовые аспекты противодействия. М., 2020.
4. Закон Республики Беларусь от 10 ноября 2008 г. № 455-З «Об информации, информатизации и защите информации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://pravo.by/document/?guid=2012&oldDoc=2008-279/2008-279\(014-027\).pdf&oldDocPage=1](https://pravo.by/document/?guid=2012&oldDoc=2008-279/2008-279(014-027).pdf&oldDocPage=1). – Дата доступа: 28.02.2025 г.
5. Закон Республики Беларусь от 7 мая 2021 г. № 99-З «О защите персональных данных» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H12100099>. – Дата доступа: 28.02.2025 г.
6. Приказ Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь от 10 декабря 2024 г. № 259 «Об изменении приказов Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь от 28 марта 2014 г. № 26 и от 20 февраля 2020 г. № 66» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.oac.gov.by/public/content/files/files/law/prikaz-oac/2024%20-%20259.pdf>. – Дата доступа: 28.02.2025 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИЙ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ СЕТИ

Т.В. ПОЛУЯН, В.Ю. ЦВЕТКОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 05 апреля 2025

Аннотация. Разработан симулятор самоорганизующейся сети передачи данных с возможностью детальной настройкой для оценки качественных характеристик системы передачи данных. Проведено тестирование симулятора с различными сетевыми топологиями. Выполнен сравнительный анализ потерь данных.

Ключевые слова: сетевой симулятор, самоорганизующаяся система, сетевая топология, потери данных, Matlab.

Введение

Самоорганизующиеся сети передачи данных (СОС) представляют собой технологию, которая позволяет сетям автоматически настраиваться, оптимизировать свои параметры и адаптироваться к изменяющимся условиям. Это перспективная технология с множеством преимуществ, но ее внедрение требует тщательной оценки рисков и затрат. Для анализа сетевых характеристик качества передачи информации необходимо выполнить симуляцию передачи пакетных данных между узлами сети. Немаловажную роль играет сетевая топология. Передача данных в самоорганизующихся сетях подчиняется законам систем массового обслуживания. Как правило, такие системы строятся по принципу сетей Ad-hoc, не имеющих постоянной структуры [1]. Представляет интерес вариант многоуровневой топологии [2]. Для тонкой настройки и адаптации симуляции под требования анализа качественных показателей передачи данных необходима разработка сетевого симулятора, который имитирует сеть передачи данных.

Настройка топологии

На начальном этапе строится двумерная решетка узлов, каждый из которых будет иметь буфер для хранения пакетов. Далее определяется матрица связности, которая будет описывать, как узлы взаимодействуют с соседними (вверх, вниз, влево, вправо). Схематично топологии представлены на рис. 1.

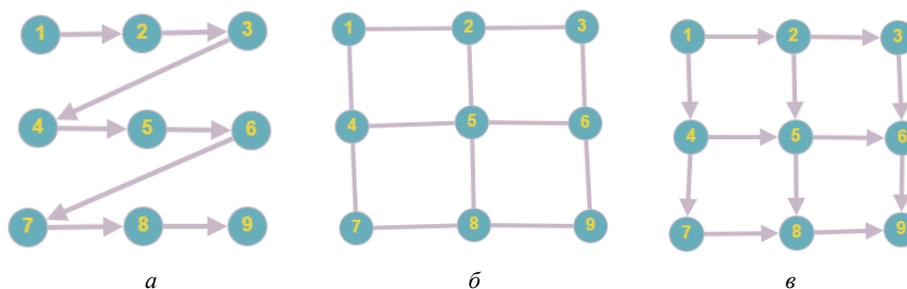


Рис. 1. Сетевые топологии: а – ad-hoc; б – одноуровневая неориентированная; в – многоуровневая ориентированная

Возможна настройка следующих параметров сети: размер решетки, размер буфера и интенсивность поступления пакетов. По умолчанию реализована следующая структура узлов: каждый узел хранит информацию о текущем размере буфера и количестве потерянных пакетов.

Алгоритмы работы

Построена тестовая сеть из узлов с ограниченным буфером. Генерация времени до следующего прибытия пакета осуществляется случайно по правилу протокола Aloha [3] с помощью выражения $t = e^{-\lambda}$, где λ – интенсивность поступления пакетов (пакетов/с).

В основном цикле сгенерированные пакеты поступают в случайные узлы. Если буфер переполнен, пакет теряется.

Алгоритм работы симулятора представлен в виде блок-схемы на рис. 2.

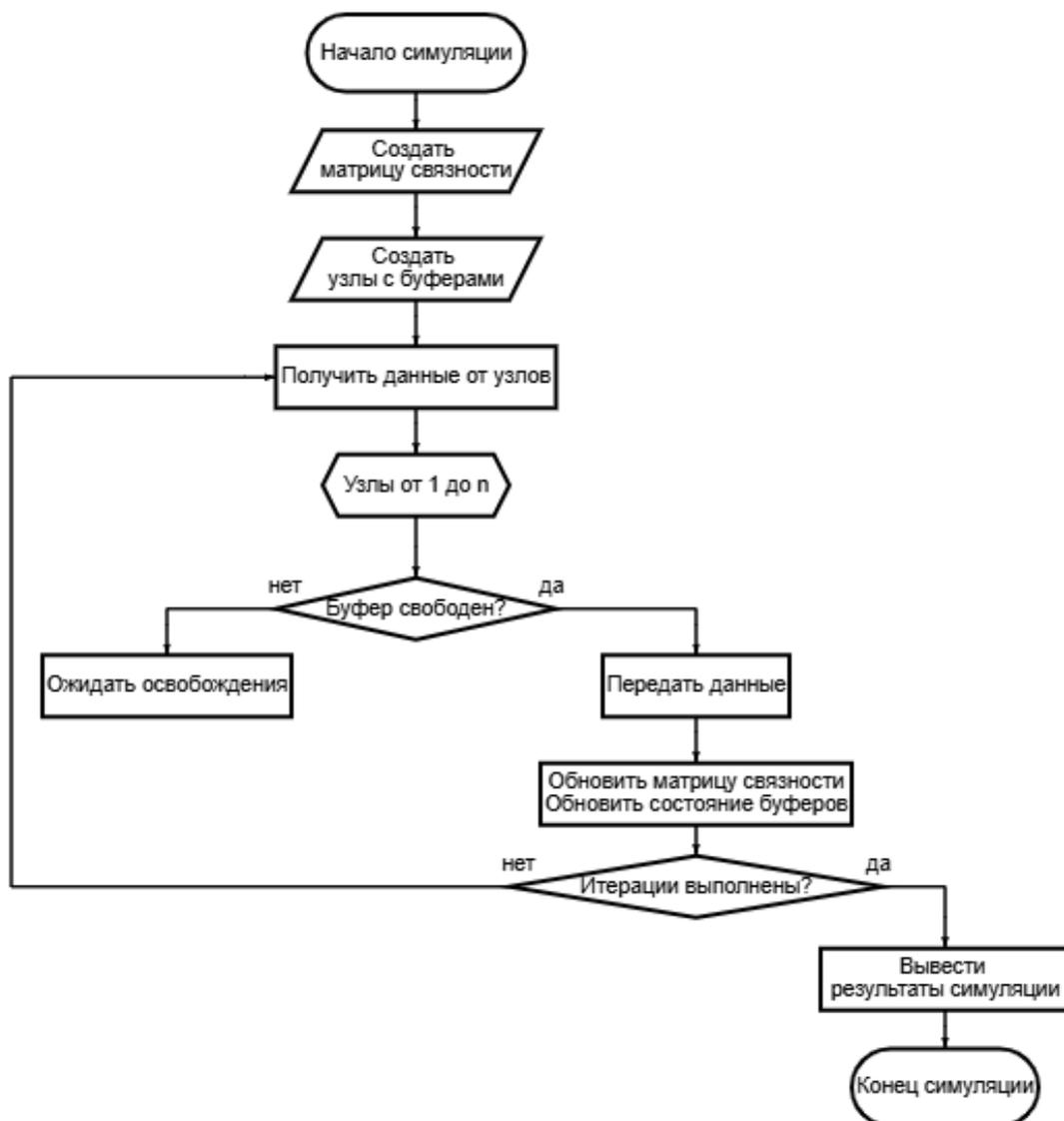


Рис. 2. Блок-схема алгоритма работы симулятора

Сравнение результатов моделирования

В результате симуляции выводится информация о потерянных пакетах и текущем состоянии каждого узла. Результаты представлены в табл. 1.

Для анализа топологий самоорганизующейся сети было выполнено тридцать итераций моделирования работы сети, по результатам которых проанализирован объем потерь данных. Графически объем потерь представлен на рис. 3.

Табл. 1. Результат оценки потерь в СОС

Итерация	Потерянные пакеты		Итерация	Потерянные пакеты		Итерация	Потерянные пакеты	
	Ad-hoc	Многоуровневая ориентированная		Ad-hoc	Многоуровневая ориентированная		Ad-hoc	Многоуровневая ориентированная
1	22	14	11	22	23	21	25	28
2	21	17	12	22	23	22	26	28
3	29	18	13	33	25	23	28	28
4	19	19	14	25	25	24	21	29
5	25	19	15	17	25	25	27	29
6	31	21	16	20	25	26	34	30
7	32	21	17	25	25	27	38	30
8	18	21	18	20	26	28	21	32
9	33	22	19	32	27	29	23	32
10	24	23	20	29	28	30	18	35

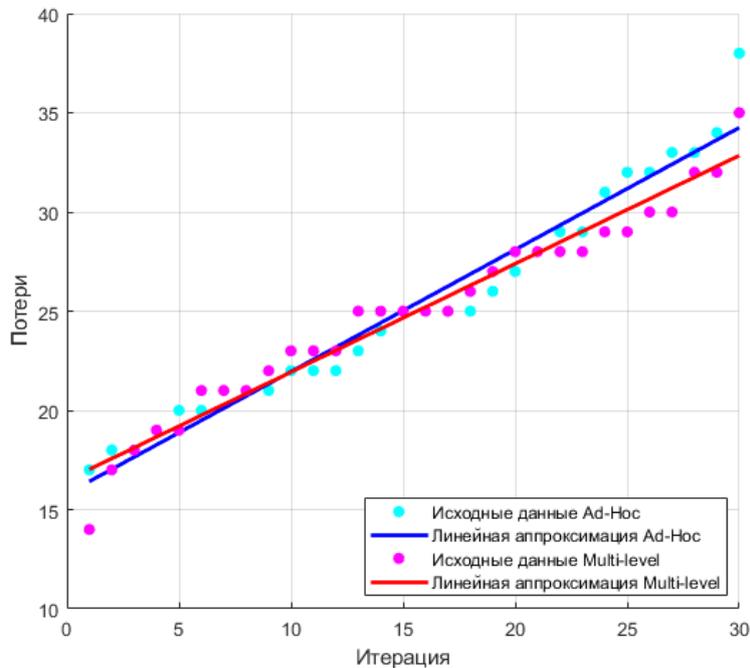


Рис. 3. Потери данных (топологии ad-hoc и многоуровневая ориентированная)

Заключение

Разработан симулятор для оценки качественных показателей передачи данных самоорганизующейся сети. Реализована функция масштабирования сети, настройки сетевой топологии и задержки передачи пакетов данных. Симулятор позволяет оценить статистические показатели потерь данных при построении сетей разных топологий. Остается возможность расширения функционала симулятора с учетом следующих аспектов: реализация различных алгоритмов маршрутизации, моделирование различных типов трафика, графическое представление состояния сети.

MODELING THE TOPOLOGY OF A SELF-ORGANIZING NETWORK

T.V. PALUYAN, V. YU. TSVIATKOU

Abstract. A simulator of a self-organizing data transmission network with the possibility of detailed adjustment for assessing the qualitative characteristics of the data transmission system has been developed. The simulator has been tested with various network topologies. A comparative analysis of data losses has been performed.

Keywords: network simulator, self-organizing system, network topology, data loss, Matlab

Список литературы

1. Boukerche A. Algorithms and protocols for wireless and mobile ad hoc networks. Wiley-IEEE Press, 2009.
2. Полуян Т. В., Цветков В. Ю. // Доклады БГУИР. – 2024. – Т. 22, № 4. – С. 84-91.
3. Степанов С. Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. Телеком, 2015.

RESEARCH ON RELATIVE LOCALIZATION OF MOBILE ROBOTS BASED ON MONOCULAR VISION AND KNOWN TAGS

QICHENG GUO

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

Received April 1, 2025

Abstract. This paper proposes a monocular vision-based method for relative pose estimation utilizing known-dimension tags. By equipping vehicle B with a rectangular red tag of precisely calibrated dimensions, vehicle A acquires visual data through a monocular camera. Through image processing and geometric model derivation, the proposed approach achieves accurate localization of the target vehicle. The method demonstrates advantages including low computational complexity, cost-effectiveness, and real-time performance, making it suitable for applications in autonomous vehicles and robotic navigation systems.

Keywords: monocular camera, pose estimation, fiducial marker, image processing, relative localization.

Introduction

With the continuous advancement of autonomous driving technology, visual perception, as one of its core technologies, plays a vital role in autonomous navigation and localization. Common visual sensors include monocular cameras, stereo cameras, and LiDAR. While stereo vision-based localization methods can calculate depth information of target objects through binocular disparity, they suffer from high hardware costs and significant computational complexity [1]. In contrast, monocular cameras have been widely adopted in mobile robotics and related fields due to their advantages such as low cost, lightweight design, and ease of installation [2].

In monocular visual localization, several studies have utilized reference objects with known dimensions to facilitate relative position computation. Chen et al. [3] proposed a calibration pattern-based monocular localization method that achieves positioning through geometric feature detection of predefined markers. The vehicle localization problem addressed in this study operates within a monocular vision framework. By attaching a rectangular tag of known dimensions to vehicle B, vehicle A can determine the relative position of vehicle B through visual analysis of the captured tag image. This approach provides a simple yet effective solution for collaborative robotics applications, demonstrating significant potential in mobile robot coordination scenarios.

Methodology

1. Camera calibration.

The proposed approach is based on monocular camera-captured images of vehicle B, utilizing the relationship between the known physical dimensions of the tag and its pixel coordinates in the image. Assuming the rectangular tag attached to vehicle B has predefined dimensions and occupies a defined pixel area in the image, the relative pose can be calculated through the following steps using perspective geometry principles.

To enable the transformation from pixel coordinates in images to real-world coordinates, camera calibration is first required. By capturing a series of calibration target images with precisely known dimensions, both the intrinsic parameters (e.g., focal length, principal point coordinates) and extrinsic

parameters (i.e., transformation matrices between the camera and world coordinate systems) of the camera are derived.

2. Tag feature extraction.

Vehicle A captures images of Vehicle B and its attached tag using a monocular camera. Due to the superior performance of the HSV color space in red object detection [4], the tag typically manifests as a rectangular red region in the acquired images. The system first extracts the tag's contour through image processing techniques (e.g., color threshold segmentation and contour detection). Subsequently, dimensional attributes (e.g., length and width) and pixel coordinates of the extracted tag are acquired, which serve as fundamental parameters for subsequent pose estimation calculations.

3. Pose estimation based on the EPnP algorithm.

The Efficient Perspective-n-Point (EPnP) algorithm is designed to compute the camera pose (rotation matrix R and translation vector t) from n pairs of 3D spatial points and their corresponding 2D image projections. These correspondences are governed by the perspective projection relationship

$$p_i = K[R | t]X_i, \quad (1)$$

where $p_i = [u_i, v_i]^T$ denotes the pixel coordinates of the i -th point in the image; $X_i = [X_i, Y_i, Z_i]^T$ represents the 3D coordinates of the i -th point in the world frame; K is the camera intrinsic matrix, which includes the focal length, principal point, and other calibration parameters; R is the rotation matrix describing the orientation of the camera; t is the translation vector representing the positional offset of the camera.

Experiments and results analysis

To validate the effectiveness of the proposed method, the following experiments were conducted: A red rectangular tag of known dimensions was affixed to the rear of vehicle B, while vehicle A captured images of vehicle B using a monocular camera. The tag contour was extracted through color threshold segmentation processing, and the relative pose of vehicle B with respect to vehicle A was computed using the aforementioned methodology. During the experiments, multiple image sets were acquired under varying distances and angles. The pixel dimensions of the tag were measured and compared with actual distances. Figure 1 illustrates the image dataset captured by vehicle A's camera.

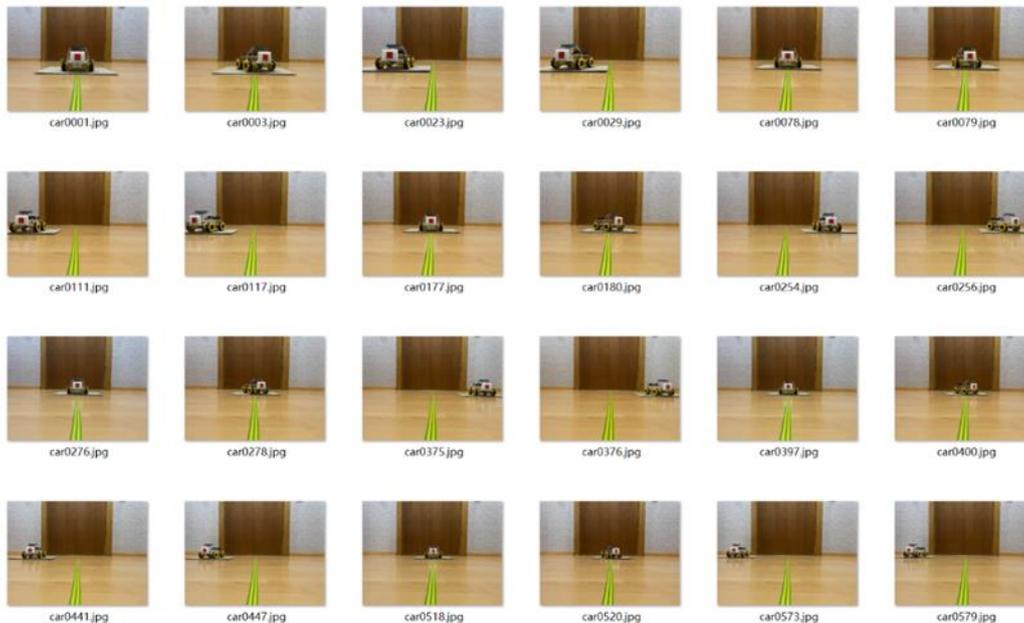


Figure 1. The relationship between the four coordinate systems

To comprehensively evaluate the accuracy of the proposed method, this paper conducts an analysis of reprojection errors. The reprojection error quantifies the discrepancy between the projected positions of reconstructed 3D world coordinates on the image plane and their corresponding actual positions in the acquired images. This metric directly impacts positioning accuracy, particularly when

calculating the relative position of Robot B with respect to Robot A, where the magnitude of these errors significantly impacts the accuracy of the final position estimation. The calculated mean and maximum errors are presented in Table 1.

Table 1. Average error and maximum error

Number	1-4	5-8	9-12	13-16	17-20	21-24	Average
Average error	0,92	0,84	0,74	0,58	0,58	0,97	0,7633
	0,43	1,05	1,12	1,02	1,02	0,82	
	1,37	0,64	0,83	0,53	0,53	0,79	
	1,14	0,68	0,91	0,36	0,36	0,59	
Maximum error	1,04	0,95	0,81	0,64	0,07	1,06	0,8104
	0,46	1,13	1,17	1,04	0,53	0,84	
	1,44	0,69	0,87	0,56	0,87	0,82	
	1,22	0,71	0,94	0,38	0,6	0,61	

The experimental results demonstrate that the calculated position of vehicle B exhibits minimal deviation from the ground truth, with a mean average error of 0,7633 pixels and a mean maximum error of 0,8104 pixels. These findings indicate that when the reprojection error remains controlled within 1 pixel, the positioning accuracy sufficiently satisfies practical application requirements.

Conclusion

This paper presents a monocular vision-based relative pose estimation method utilizing known-size markers, with experimental validation confirming its feasibility and effectiveness. The proposed approach demonstrates computational efficiency and cost-effectiveness, making it applicable to relative positioning tasks in automated systems such as mobile robots and vehicles.

While the method achieves computational simplicity and satisfactory real-time performance, several limitations persist. For instance, the accuracy of marker extraction degrades significantly when the marker occupies a small area in the image or when subjected to excessive viewing angle deviation. Furthermore, environmental factors such as image noise and illumination variations may further increase computational errors. Future work will focus on optimizing image preprocessing techniques and enhancing marker detection algorithms to improve system robustness.

References

- Huang, Y., Zhang, L., & Li, H. (2018). A stereo vision-based positioning system for mobile robots. *Journal of Robotics and Automation*, 5(1), P. 23–34.
- Zhang, X., Li, J., & Wang, H. (2019). Real-time monocular localization using feature matching and pose estimation. *International Journal of Advanced Robotics*, 10(3), P. 45–59.
- Chen, Y., Wang, D., & Zhang, X. (2017). A monocular camera-based localization approach using fiducial markers. *Robotics and Autonomous Systems*, 89(4), P. 125–134.
- Smith, S. (2017). Real-time color segmentation for robotics applications. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* P. 567–574.

A REVIEW OF YOLOV11 BASED ON SAR SHIP DETECTION

S.Y. ZHAO, C. ZHANG, J. MA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

Received April 5, 2025

Abstract. Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging technology holds significant value in military reconnaissance and civil maritime monitoring due to its all-weather and all-time imaging capabilities. Ship detection, as a core task of maritime monitoring, plays a crucial role in ensuring maritime safety, combating illegal fishing, protecting the marine environment, and military target reconnaissance. However, inherent issues in SAR images, such as noise, the difficulty of detecting small targets, and interference from complex sea conditions, pose significant challenges to the design of ship detection algorithms. In recent years, the YOLO series of algorithms has continuously evolved in SAR ship detection, with the latest version, YOLOv11, effectively enhancing detection accuracy and efficiency through innovations such as lightweight design, multi-scale feature modeling, and improved attention mechanisms. This paper starts with the key technologies in SAR ship detection, providing a detailed analysis of the performance advantages of YOLOv11 and its comparison with YOLOv10. The results indicate that YOLOv11 significantly outperforms YOLOv10 in core metrics such as precision, recall, and mAP50, while also exhibiting faster convergence and stronger generalization capabilities. Additionally, this paper explores the application prospects of YOLOv11 in complex scenarios and proposes future optimization directions regarding the physical modeling and adaptability issues of SAR images, providing important references for solving target detection problems in complex environments.

Keywords: SAR ship detection, YOLOv11, object detection algorithm.

Introduction

With the increasing global demand for the development of marine resources, maritime traffic regulation, and military reconnaissance, the importance of marine monitoring has become increasingly prominent. Ship detection, as one of the core tasks of marine monitoring, not only supports maritime safety regulation but also plays a significant role in monitoring illegal fishing, protecting the marine environment, and military target reconnaissance. However, traditional optical sensors are limited by weather and lighting conditions, making it difficult to meet the requirements for all-weather monitoring. Therefore, synthetic aperture radar (SAR), as an active microwave imaging technology, has become an important tool in the field of marine monitoring due to its all-weather and all-time imaging capabilities.

Despite the significant advantages of SAR technology in ship detection, its application still faces many challenges. First, the inherent speckle noise in SAR images poses a threat to target detection accuracy; second, the low resolution limits the effective identification of small targets; additionally, complex sea conditions and target occlusion further increase the difficulty of detection. Therefore, how to utilize advanced algorithmic techniques to improve the accuracy and efficiency of SAR ship detection has become a key issue in current research. This paper will discuss these challenges and explore the development and application prospects of related technologies.

Core Technical Features of YOLOv11

YOLOv11 demonstrates outstanding performance in various computer vision tasks, including object detection, feature extraction, instance segmentation, pose estimation, object tracking, and image classification, marking a significant breakthrough in real-time object detection technology. According

to the literature, YOLOv11 significantly enhances feature extraction and object recognition capabilities by introducing the following core components:

C3k2 Block: A lightweight design that replaces the traditional C2f block, reducing the number of parameters while maintaining multi-scale feature fusion capabilities.

SPPF (Fast Spatial Pyramid Pooling): Enhances the model's robustness to object sizes through multi-scale pooling.

C2PSA (Parallel Spatial Attention Convolution Block): Combines self-attention mechanisms with parallel processing paths to strengthen global feature modeling.

These improvements enable YOLOv11 to perform better in tasks such as instance segmentation, pose estimation, and oriented object detection, thereby expanding its application range in complex scenarios like autonomous driving and industrial quality inspection. The structure diagram of YOLOv11 is shown in Figure 1.

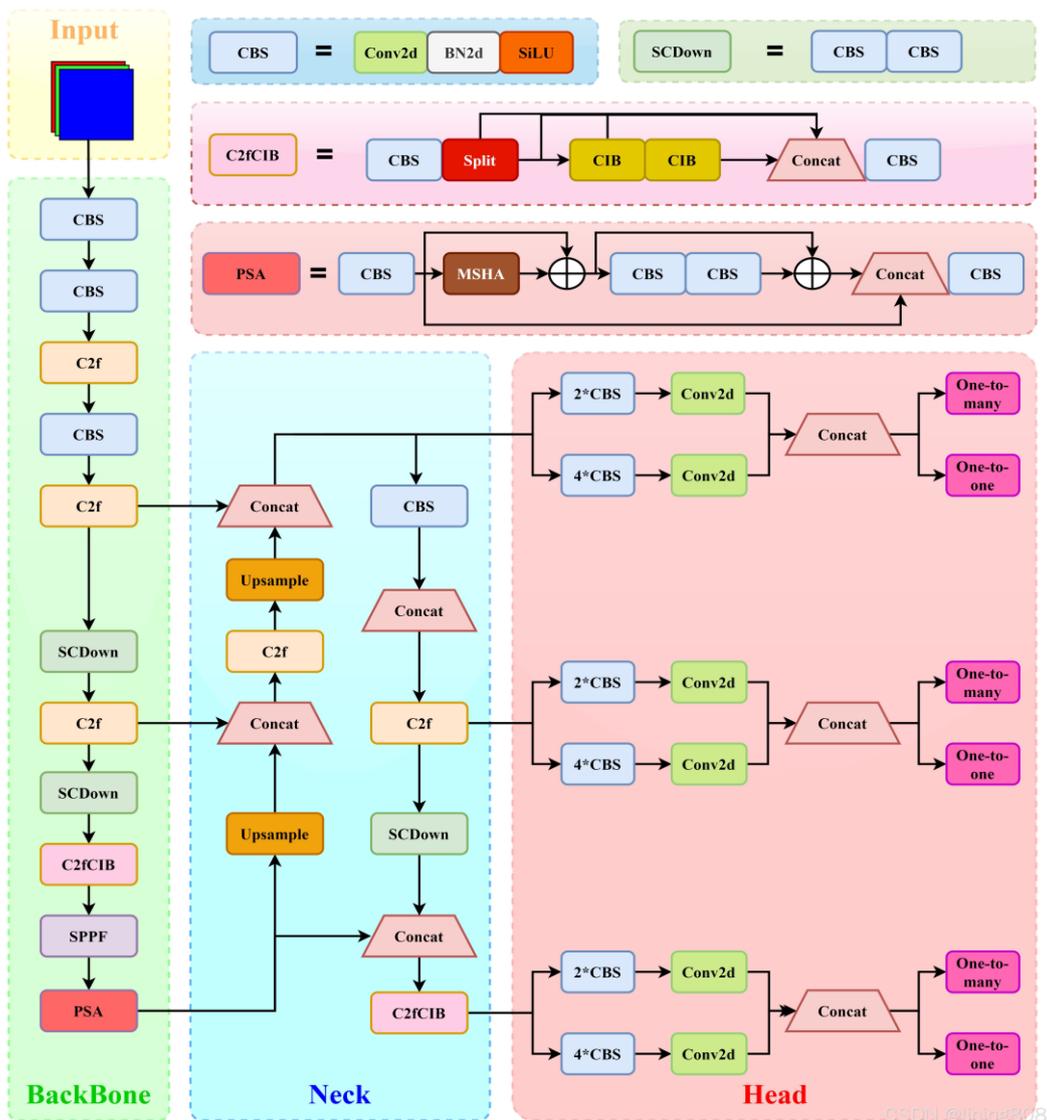


Figure 1. YOLOv11 structural diagram

YOLOv11 combined with SAR ship detection images

YOLOv11 performs excellently in SAR ship detection, mainly due to its multiple technical improvements. First, it can simultaneously capture global features of large targets and detailed information of small targets through a multi-scale feature pyramid and a dynamic anchor point allocation mechanism, effectively addressing the issue of significant size differences in ships. Second, in

response to the complex sea waves and clutter backgrounds in SAR images, YOLOv11 introduces an improved attention mechanism and context information modeling, significantly enhancing its ability to suppress background noise and reducing both false detection and missed detection rates 0. Additionally, YOLOv11 adopts a lightweight design, with only 2,4M parameters, fast inference speed, and high computational efficiency, meeting real-time requirements 0. This makes it highly applicable and reliable in practical applications such as maritime safety monitoring. Overall, YOLOv11 provides strong technical support for SAR ship detection with high precision, adaptability, and efficient performance.

Performance Comparison and Experimental Analysis

In this experiment, we used the SAR-Ship-Dataset. It is a dataset focused on ship target detection in the field of SAR (Synthetic Aperture Radar) images, widely applied in the research and performance validation of target detection algorithms. Its characteristics include scene diversity, target density, and high-quality annotations, which support the testing and optimization of different algorithms' generalization capabilities in complex backgrounds 0. We trained on this dataset using YOLOv10 and YOLOv11, and their performance metrics are shown in Table 1.

Table 1. YOLO Model Performance Evaluation Table

Model	P	R	mAP50	mAP50-95
YOLOv10	0,906	0,869	0,947	0,613
YOLOv11	0,927	0,898	0,967	0,613

Table 1 presents the performance evaluation results of the YOLO model across different versions. By comparing four metrics: precision (P), recall (R), mAP50, and mAP50-95, it can be observed that YOLOv11 shows significant improvements over YOLOv10 in the first three metrics. Specifically, the precision of YOLOv11 increased from 0,906 to 0,927, indicating enhanced accuracy in object recognition. The recall rate improved by about 3,34 %, demonstrating further expansion in the coverage of target detection. The mAP50 improved by approximately 2,11 %, indicating that YOLOv11 has higher detection accuracy with an IoU threshold of 50 %. However, in the comprehensive accuracy metric mAP50-95, both versions scored 0,613, showing no difference. Overall, YOLOv11 outperforms YOLOv10 in core performance metrics, showcasing stronger object detection capabilities.

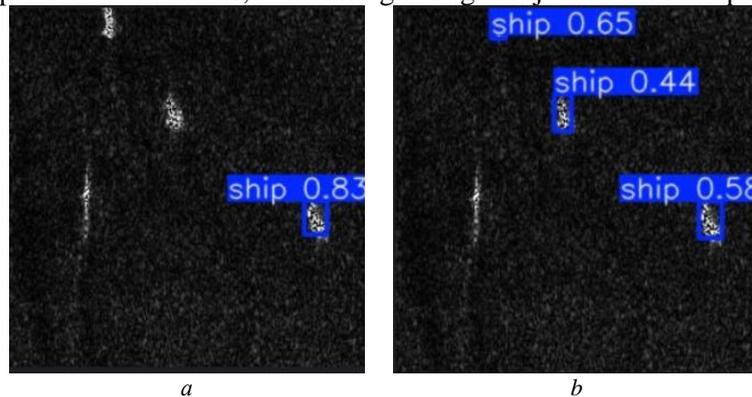


Figure 2. Ship detection comparison: *a* – detection results of YOLOv10m; *b* – detection results of YOLOv11m

According to the images in Figure 2, the training and validation loss curves of the YOLOv10m and YOLOv11m models in the SAR ship detection task reveal their performance differences. From the box_loss curves for training in Figure 3, it is evident that the loss values of YOLOv11m are generally lower than those of YOLOv10m, indicating that YOLOv11m has better fitting ability and lower error in bounding box regression. Additionally, the training loss curves of YOLOv11m decline more quickly and smoothly, suggesting that this model converges faster during training and has stronger generalization capabilities. In contrast, the validation loss curve of YOLOv10m decreases more slowly and tends to stabilize at higher loss values, which may indicate significant underfitting issues. Therefore, overall, the YOLOv11m model demonstrates superior performance in the SAR ship detection task, being able to complete object detection tasks more accurately.

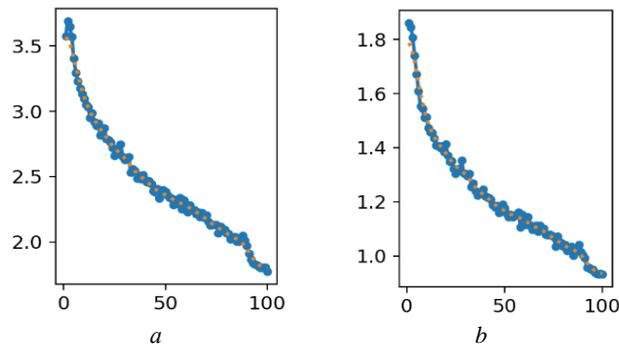


Figure 3. Training curves of the model: *a* – loss curve of YOLOv10m; *b* – the loss curve of YOLOv11m

Conclusion

YOLOv11 demonstrates exceptional technical advantages in the SAR ship target detection task, achieving a good balance between detection accuracy and speed. Experimental results indicate that, compared to YOLOv10, YOLOv11 shows significant improvements in key performance metrics such as precision, recall, and mAP50, with precision increasing by approximately 2,32 %, recall by about 3,34 %, and mAP50 by around 2,11 %. Additionally, the validation loss curve declines more quickly and smoothly, indicating faster convergence and stronger fitting ability. These advantages enable YOLOv11 to quickly complete ship target detection tasks in complex backgrounds, showcasing greater adaptability and generalization capabilities. However, despite YOLOv11's technical performance surpassing that of YOLOv10, its performance on the comprehensive metric mAP50-95 has not yet broken through, reflecting ongoing challenges in physical modeling and adaptability to complex environments in SAR image detection. Characteristics of SAR images, such as variations in target scale, background interference, and scattering effects, increase the complexity of detection algorithms, especially in scenarios with multiple scenes and densely distributed targets. Future research should further optimize the algorithm's adaptability to complex physical environments and model the physical characteristics of SAR images to enhance detection robustness and overall performance. Overall, the technical performance of YOLOv11 in SAR ship detection provides important references for subsequent research and points the way to solving target detection problems in complex environments.

References

1. Wang Y., Jiang Y., Xu H., Xiao C., Zhao K. // *Processes*. 2025. 13(1).
2. Guan T., Chang S., Wang C., Jia X. // *Remote Sensing*. 2025. 17(5).
3. Huang J., Wang K., Hou Y., Wang, J. // *Sensors*. 2024. 25(1).
4. Zongyong C., Xiaoya W., Junnan S., Zongjie C., Jianyu Y. // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2022.

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПЕРЕГРУЗОК В ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ

В.Ю. МИШЕПУД, В.О. СОРКИН, М.Ю. ШУХМАН, К.А. ХАДЖИНОВА

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 4 апреля 2025

Аннотация. В статье рассмотрена возможность использования цифровых двойников на основе мультиагентных систем для управления транспортными сетями и прогнозирования перегрузок в них. Приведены преимущества внедрения цифровых двойников и мультиагентных систем для управления потоками в транспортных сетях, особенности и принципы работы данных технологий, а также перспективы и возможности их применения в Беларуси. Описан пример типовой шестимерной структуры цифрового двойника, применяемой для моделирования транспортной сети. Предложен подход применения агентного метода при создании симулятора транспортной сети с целью повышения эффективности принятия решений при регулировании транспортных потоков.

Ключевые слова: мультиагентные системы, цифровые двойники, транспортные сети, прогнозирование перегрузки, симуляция транспортных потоков, оптимизация движения, интеллектуальный агент, управление движением.

Введение

Многоагентные, или мультиагентные, системы (МАС) представляют собой одно из наиболее перспективных направлений в области искусственного интеллекта. Эти системы используются для решения сложных задач, которые требуют координации множества независимых агентов, взаимодействующих между собой. Агент в данном контексте – это автономная сущность (программа, устройство или робот), способная воспринимать окружающую среду, принимать решения и действовать для достижения поставленных целей. МАС находят применение в различных областях, таких как робототехника, управление сетями, включая транспортные, логистика, кибербезопасность и многие другие [1].

Из-за растущего населения, быстрого роста числа транспортных средств и ограниченных возможностей расширения инфраструктуры традиционные методы управления дорожным движением перестают справляться со своими задачами. Их неспособность реагировать на ситуацию в режиме реального времени приводит к возникновению пробок на дорогах, застоев на железнодорожных и морских путях. Это, в свою очередь, приводит к неэффективному расходу топлива, срыву сроков перевозок, увеличению выброса загрязняющих веществ. Поэтому в настоящее время внедрение интеллектуальных систем управления транспортными сетями является одним из наиболее перспективных направлений в данной сфере.

При внедрении интеллектуальных систем, в том числе и транспортных, очень важно создать "полигон" – тестовую среду, которая моделирует процессы, происходящие в реальной физической системе. Для этого применяется технология цифровых двойников. Цифровой двойник (ЦД) – это виртуальный двойник физического объекта, способный работать с данными в режиме реального времени для создания симуляций и моделей прогнозирования. Работа в реальном времени, цифровизация и проактивность позволяют более эффективно оптимизировать работу транспортной системы и оказывают положительное влияние на экономическую и экологическую устойчивость [2].

Целью статьи является исследование возможностей использования технологии ЦД на основе МАС в применении к прогнозированию перегрузок в транспортных сетях.

Проблема перегрузок в транспортных сетях

Главной проблемой стандартных методов управления дорожным движением является неспособность реагировать на текущее состояние на дороге и, соответственно, изменять свою конфигурацию (например, продолжительность сигналов светофора). С ростом числа участников дорожного движения количество возможных состояний транспортной сети становится чрезвычайно велико, и поэтому применение заранее подготовленных планов управления транспортными потоками не имеет большого смысла. Возникновение новых событий приводит к последствиям, которые быстро меняют все состояние сети, в результате чего планы по регулированию трафика часто оказываются неэффективными.

Явным проявлением данной проблемы является перегрузка транспортной сети. Заторы приводят к большому количеству негативных эффектов: потеря времени на передвижение, рост выброса выхлопных газов, возникновение аварийных ситуаций и многое другое. Классифицировать перегрузки можно по причинам возникновения и по характеру распространения. Основными причинами заторов являются ДТП, плохая организация движения, неблагоприятные погодные условия, ремонтные работы. По характеру распространения существуют такие заторы, как точечные (пробка на конкретном перекрестке или светофоре), линейные (пробка на протяженном участке, например, в тоннелях или проспектах), волновые (резкое торможение одного автомобиля вызывает волну остановок), регулярные (массовый въезд или выезд автомобилей в одно время).

Основными способами противодействия пробкам являются улучшение инфраструктуры города, изменение транспортной сети, внедрение технологий моделирования и управления дорожным движением. Если первые два способа направлены на создание или изменение элементов системы дорожного движения (строительство новых дорог, оборудование перекрестков, перестройка улиц, организация перекрытий), то последний предполагает использование уже существующей экосистемы, что требует намного меньшего количества денежных и материальных ресурсов. На текущий момент перспективным решением для управления сложными транспортными сетями стали МАС.

Применение МАС в транспортных сетях

Существует множество различных автоматизированных систем управления дорожным движением (АСУДД), которые можно классифицировать по различным признакам: метод оптимизации потока в транспортной сети, регулируемые характеристики светофоров, гибкость перестроения, используемые методы детектирования. При рассмотрении возможности применения МАС в транспортных сетях ключевыми характеристиками являются метод оптимизации и гибкость перестройки [3].

Многие компоненты системы, используемые в управлении дорожным движением, такие как светофоры, датчики и детекторы движения, погодные и другие датчики, видекамеры, проекторы, можно сделать более автономными и, следовательно, более адаптивными, если смоделировать их в качестве агентов. Знания о текущих транспортных потоках и общие данные (ремонтные работы на дороге, аварии, перекрытия и прочее) могут быть собраны локально региональными (зональными) агентами, которые контролируют эффективность дорожного движения в каждом регионе (зоне). Если событие может иметь последствия для районов, находящихся под контролем соседних зон, соответствующие агенты могут быть проинформированы с целью корректировки и координации своего плана соответствующим образом. Преимущество такой системы заключается в том, что изменения и вмешательства рассматриваются на региональном уровне и немедленно устраняются. Если эти события будут иметь последствия для каких-либо других регионов, то только агенты, отвечающие за затронутые регионы, должны будут перепланировать свою деятельность. Следовательно, система может гораздо быстрее реагировать и адаптироваться к новым ситуациям. Вместо автономной системы поддержки принятия решений, с помощью агентов эта поддержка может быть оказана в режиме online [4].

Другим преимуществом применения МАС является возможность прогнозирования перегрузок транспортной сети на основе собранных данных. Прогнозирование позволяет

принять превентивные меры, направленных на оптимизацию транспортных потоков. Анализ исторических данных в сочетании с текущими показателями дает возможность выявлять закономерности возникновения перегрузок, что способствует повышению точности прогнозных моделей. Это, в свою очередь, позволит своевременно выполнять управляющие воздействия, такие как адаптивное регулирование сигнальных светофоров, динамическое изменение маршрутов общественного транспорта или информирование водителей через интеллектуальные транспортные системы. Кроме того, прогнозирование способствует более эффективному планированию дорожной инфраструктуры, поскольку выявленные узкие места и зоны повышенной нагрузки могут быть учтены при проектировании новых магистралей или модернизации существующих.

Несмотря на очевидные преимущества МАС, имеются серьезные сложности для исследователей и разработчиков. Ключевые проблемы включают вопросы масштабирования для крупных городов, интеграции с существующей инфраструктурой и надежной работы в нестандартных ситуациях, таких как аварии или неблагоприятные погодные условия. Важно отметить, что большинство текущих исследований основаны на компьютерном моделировании, а не на реальных условиях эксплуатации, что ограничивает понимание практического применения МАС в сложной городской среде. Городской трафик зависит от множества факторов, включая поведение водителей, непредвиденные события и ограничения инфраструктуры. Для успешного развертывания МАС в реальных условиях необходимо решить проблемы масштабируемости, совместимости и координации между агентами [5].

Цифровые двойники для транспортных систем

ЦД в транспортной инфраструктуре, как правило, имеет шестимерную структуру, как показано на рис. 1.

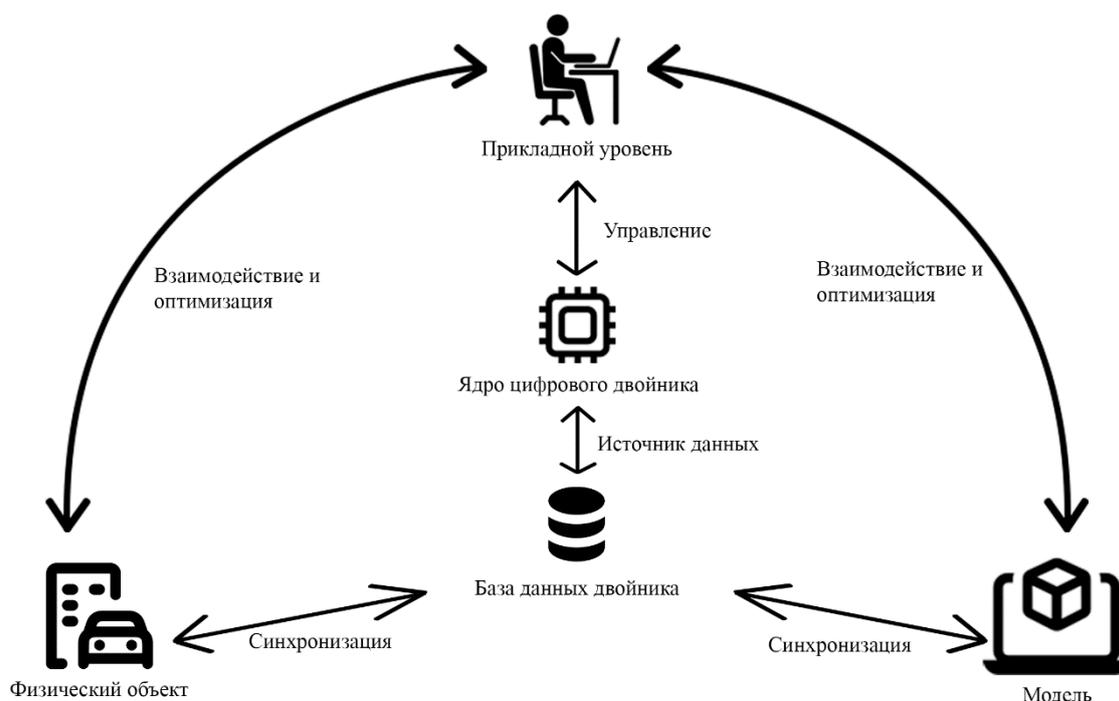


Рис. 1. Шестимерная структура цифрового двойника

Такой ЦД объединяет физические объекты и виртуальные модели с помощью "ядра цифрового двойника" для обеспечения взаимодействия с данными в реальном времени, оптимизации моделирования и прогнозного анализа. Физические транспортные средства представляются в интерактивном режиме с высокой степенью точности.

Система обеспечивает взаимодействие с данными в режиме реального времени, оптимизацию моделирования и прогнозирование с помощью ядра ЦД. Она охватывает все

аспекты транспортной инфраструктуры, начиная от планирования, проектирования и строительства и заканчивая эксплуатацией, техническим обслуживанием и обновлением.

Источником данных является физический объект, составляющий основу транспортной инфраструктуры. Сюда входят все объекты, связанные с транспортом в реальном мире: дороги, мосты, транспортные средства, автобусные станции, дорожные знаки и так далее. У всех физических объектов имеется свой набор свойств, который учитывается при расчетах инфраструктуры: материалы, прочность, износ, размеры и так далее. Транспортные средства различаются по типам моделей, скорости, пассажироместимости и нормам выбросов. Каждый объект является активным динамичным элементом, тесно связанным с жизнью транспортной сети. ЦД предоставляет отражение реального мира с помощью таких датчиков, как камеры, инфракрасные датчики, GPS, акселерометры и датчики температуры.

Виртуальная модель является главным рабочим компонентом ЦД, храня и представляя собой очень точное отображение физического мира в электронном виде. Модель имитирует поведение, атрибуты и взаимодействия физических объектов, что позволяет проводить динамическое моделирование производительности инфраструктуры. Виртуальная модель – это не просто статичное трехмерное представление, она охватывает динамическое поведение, механические характеристики, свойства материалов и взаимодействие физических объектов с окружающей средой.

Эта интеграция позволяет проводить моделирование, начиная от прогнозирования транспортных потоков и заторов в определенных местах и в определенное время и заканчивая производительностью и реакцией конструкций на определенные нагрузки, а также долгосрочными потребностями в техническом обслуживании. Кроме того, виртуальная модель открыта для подключения к другим цифровым моделям, источникам данных и приложениям, объединяясь в единую цифровую экосистему.

База данных двойника является источником данных виртуальной модели, представляя состояние, поведение и экологический контекст каждого физического объекта, а также прогнозы и обратную связь, которые фундаментально управляют всей системой. Данные также включают непрерывный ввод в режиме реального времени, такой как состояние транспортного потока, поведение транспортных средств и данные об окружающей среде, которые позволяют ЦД с высокой точностью отражать реальный мир. Все эти данные разнообразны, гетерогенны и крупномасштабны по своей природе, поскольку они поступают от разных датчиков и устройств, каждое из которых имеет разные форматы и структуру.

Ядро ЦД служит движущей силой всей системы. Оно обрабатывает, анализирует и интерпретирует данные, поступающие от двойников, для реализации синхронной работы физических объектов с виртуальными моделями в режиме реального времени. Ядро выполняет моделирование, оптимизацию транспортных потоков, прогнозы относительно будущих условий и интеллектуальную аналитику. Передовые алгоритмы в сочетании с крупномасштабным анализом данных используются для обеспечения возможностей прогнозирования, что позволяет оптимизировать управление сигналами и планирование маршрутов, а также другие эксплуатационные возможности транспортной системы.

Прикладной уровень преобразует эти возможности в полезные приложения для пользователей. Он включает в себя инструменты и сервисы поддержки принятия решений: мониторинг дорожного движения, прогнозирование заторов, реагирование на аварии и городское планирование.

Другие сервисы, которые позволяют транспортным менеджерам и населению взаимодействовать с ЦД для получения ценной информации об условиях в режиме реального времени.

API-интерфейсы позволяют интегрировать другие объекты в систему с помощью сторонних приложений, тем самым предоставляя разработчикам гибкость в создании новых инструментов на основе данных и функциональности, вытекающих из ЦД.

Уровень подключения выступает в роли посредника между физическим миром и виртуальной моделью, обеспечивая постоянный поток данных между компонентами системы. Этот уровень поддерживает синхронизацию в реальном времени, позволяя ЦД точно отражать текущее состояние физической инфраструктуры. Он отвечает за целостность и точность данных,

используя надежные протоколы и технологии для управления большими объемами передачи данных с минимальными задержками и потерями.

Вместе шесть компонентов образуют единую сеть, которая обеспечивает функционирование всей транспортной инфраструктуры, обеспечивая существенную технологическую поддержку для непрерывного, интеллектуального и эффективного развития городских транспортных систем [2].

Перспективы применения ЦД на основе МАС для прогнозирования перегрузок

ЦД с интегрированными многоагентными системами предоставляют возможности для прогнозирования и предотвращения перегрузок транспортных сетей. Такие системы позволяют тестировать управленческие решения в виртуальной среде перед их реализацией в реальном транспортном потоке. Это особенно важно для предсказания критических ситуаций, таких как заторы на магистралях, перегруженность узловых развязок или резкое увеличение трафика в определенные часы пик.

Использование агентного подхода в ЦД обеспечивает распределенное принятие решений, когда каждый элемент – будь то светофор, датчик или транспортное средство – действует автономно, но при этом координируется с остальными участниками системы. В контексте предсказания перегрузок это позволяет моделировать поведение отдельных участников транспортной системы, таких как автомобилисты, водители общественного транспорта или пешеходы, и анализировать их совокупное влияние на общий поток. Например, если в систему поступают данные о росте интенсивности движения на одном из участков дороги, МАС может автоматически скорректировать работу светофоров, предложить альтернативные маршруты или даже временно ограничить доступ к перегруженным участкам.

Для транспортной системы Беларуси внедрение МАС в ЦД транспортных сетей актуально с точки зрения оптимизации существующей инфраструктуры без необходимости масштабного строительства. Это позволит адаптироваться к растущей транспортной нагрузке и повысить пропускную способность дорог. Особенно эффективным становится использование таких технологий для прогнозирования перегрузок в условиях массовых мероприятий, праздничных дней или спортивных событий. ЦД могут моделировать сценарии, учитывающие как текущую загруженность дорог, так и исторические данные о трафике в аналогичных ситуациях, что позволяет заранее выявить потенциальные "узкие места" и разработать планы их разгрузки.

Одним из ключевых преимуществ комбинации ЦД и МАС является возможность работы с большими данными в режиме реального времени. Система может интегрироваться с датчиками движения, видеонаблюдением, мобильными приложениями и GPS-трекерами, чтобы получать актуальную информацию о состоянии транспортной сети. На основе этих данных алгоритмы машинного обучения могут выявлять закономерности, предсказывать вероятность возникновения пробок и предлагать меры предварительного реагирования для их предотвращения. Например, если система обнаруживает, что в определенное время дня трафик на конкретной магистрали начинает расти, она может заранее рекомендовать изменение светофорных циклов или информировать водителей о наличии альтернативных маршрутов через мобильные приложения.

ЦД играют ключевую роль в долгосрочном планировании. Они позволяют моделировать последствия изменения светофорных циклов, тестировать различные схемы организации движения, оценивать эффективность новых маршрутов общественного транспорта и прогнозировать влияние дорожных работ и временных ограничений. В условиях активного участия Беларуси в международных торговых маршрутах, особенно в рамках инициативы "Один пояс, один путь", такие технологии становятся важным инструментом для управления логистическими потоками. ЦД могут предсказать, как изменения в транспортной инфраструктуре или в графике грузоперевозок повлияют на загруженность транспортных узлов, и предложить оптимальные решения для минимизации задержек.

Внедрение таких технологий сопряжено с рядом вызовов. Основной проблемой является интеграция с устаревшими системами. Для эффективной обработки больших объемов данных необходимо использование граничных вычислений, а для обеспечения кибербезопасности может применяться технология блокчейна. Кроме того, успешное функционирование системы зависит

от качества входных данных: чем точнее и полнее информация о текущем состоянии транспортной сети, тем выше точность прогнозов и эффективность принимаемых решений.

Комбинация ЦД и многоагентных систем представляет собой мощный инструмент для предсказания и предотвращения перегрузок транспортных сетей. Это позволяет не только решать текущие проблемы, но и создавать устойчивую транспортную инфраструктуру, способную адаптироваться к будущим вызовам.

Заключение

Внедрение ЦД с применением МАС может дать значительный импульс развитию в сфере транспорта, поскольку эта концепция открывает возможности для мониторинга всего жизненного цикла транспортной инфраструктуры. Благодаря развитию ИТ-технологий появляется доступ к данным о дорожном движении в реальном времени, что создает основу для моделирования и формирования детального цифрового отображения транспортных потоков в режиме online.

Ключевое предложение – разработка симулятора, работающего в реальном времени, в котором с помощью агентного моделирования воспроизводится и предсказывается поведение динамически синхронизируемых цифровых копий транспортных потоков с их последующей оптимизацией. В качестве исходных данных используется информация с IoT-датчиков, установленных на дорожной сети (например, на автомагистралях).

Принцип работы ЦД (симулятора) основан на постоянной корректировке модельных сценариев в соответствии с изменениями реальной дорожной обстановки. Обработывая поступающие с датчиков данные в режиме реального времени, система способна не только точно воспроизводить текущую дорожную ситуацию, но и прогнозировать вероятные точки возникновения перегрузок. Благодаря такому подходу становится возможным заранее выявлять потенциально проблемные участки дорожной сети и своевременно принимать меры для предотвращения образования заторов. Это позволяет перевести управление транспортными потоками на принципиально новый уровень, где решения принимаются на основе прогнозного моделирования.

Такая система создает основу для внедрения интеллектуальных методов анализа транспортной нагрузки, что имеет ключевое значение для повышения безопасности и эффективности дорожного движения. Результаты моделирования открывают перспективы для создания комплексной системы мониторинга транспортной инфраструктуры Беларуси, способной оперативно реагировать на изменения дорожной ситуации.

DIGITAL TWINS FOR CONGESTION FORECASTING IN TRANSPORT NETWORKS BASED ON MULTI-AGENT SYSTEMS

V.Y. MISHEPUD, V.O. SORKIN, M.Y. SHUHMANN, K.A. KHADZHYNAYA

Abstract. The article examines advanced technologies for managing transportation networks and forecasting congestion. The primary focus is on digital twins, which enable the modeling of complex systems, including real-world transportation networks, and multi-agent systems that facilitate efficient real-time decision-making. The advantages of integrating digital twins and multi-agent systems for traffic management are outlined, along with the key features and operational principles of these technologies. The prospects and potential applications of these approaches in Belarus are also discussed. A typical six-dimensional structure of a digital twin used for transportation network modeling is described. Additionally, the implementation of an agent-based approach in the development of a transportation network simulator is proposed, which is expected to enhance decision-making efficiency in traffic flow regulation.

Keywords: multi-agent systems, digital twins, transport networks, congestion forecasting, traffic flow simulation, movement optimization, intelligent agent, traffic management.

Список литературы

1. Мультиагентные системы искусственного интеллекта : научные труды КубГТУ / М. П. Малыхина, Д. А. Герасимов ; Кубан. гос. технологический ун-т. – Краснодар : КубГТУ, 2018. – 9 с. – URL: <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0051/2074.pdf> (дата обращения: 04.03.2025).
2. Digital Twin Technology in Transportation Infrastructure: A Comprehensive Survey of Current Applications, Challenges, and Future Directions / Di Wu, Ao Zheng, Wenshuai Yu [et al.]. – Basel : Licensee MDPI, 2025. – 5 p.
3. Горошко, В. С. Классификация характеристик адаптивных систем управления дорожным движением / В. С. Горошко. – Красноярск : Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева, 2013. – 1 с.
4. Burmeister, B. Application of Multi-Agent Systems in Traffic and Transportation / B. Burmeister, A. Haddadi, G. Matylis. – Berlin : IEE Proceedings-Software, 1997. – 8 p.
5. Utilization of Multi-Agent Systems in Managing Smart Transportation Systems in Urban Areas / Amelia Hayati, Rachmat Prasetyo, Mariana Diah Puspitasari, Deng Jiao. – Indonesia: Journal of Computer Science Advancements, 2024. – 367 p.

APPLICATION OF SORTED METRICS BASED ON INSOLE FEATURE MINING

H. LI, V. Yu. TSVIATKOU

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus**Received April 04, 2025*

Abstract. To improve the accuracy and real time performance of fall risk assessment, this study proposes a feature selection method based on sorted metrics. The method evaluates previously generated spatiotemporal features using correlation coefficient (CCF), bayes factor (BF), and self-information index (SII) to identify the most informative features. The results show that these metrics play complementary roles in the feature selection process. CCF measures the linear correlation between features and helps eliminate redundancy. BF emphasizes the statistical significance between high-risk and low-risk groups. SII captures distributional differences from the perspective of information entropy. Comparative analysis across various metrics demonstrates that the combined method achieves high accuracy across multiple performance indicators while significantly reducing computational complexity.

Keywords: sorted metrics, fall risk, self-information index, bayes factor.

Introduction

Falls are a common and serious health issue among the elderly and individuals with neurological disorders. They not only lead to physical injuries but may also trigger psychological fear, a decline in quality of life, and increased medical costs. Therefore, developing an efficient, real time, and reliable method for fall risk assessment has become a crucial research focus in the field of intelligent health monitoring [1].

In recent years, with the advancement of wearable technology, gait analysis based on plantar pressure sensors has emerged as an important approach for evaluating individual stability and motor function. By analyzing spatiotemporal features associated with fall risk, researchers can identify potentially high-risk individuals at an early stage, enabling timely intervention and prevention.

However, the large number of gait features generated by nonparametric models can lead to the curse of dimensionality and may degrade model performance due to redundant or low-quality information. Therefore, efficiently selecting the most discriminative key features from massive datasets has become a core challenge in fall risk modeling.

To address this issue, this paper proposes a feature selection method based on sorted metrics, which applies multiple evaluation criteria to progressively screen features, thereby optimizing model performance and improving prediction accuracy. Compared with traditional feature selection methods, this approach not only significantly improves accuracy but also enhances real time responsiveness and model simplicity, making it highly suitable for practical applications.

Feature mining based on sorted metrics

Feature selection is a critical step in pattern recognition and machine learning. Its primary goal is to reduce the number of input variables as much as possible without compromising predictive performance, thereby lowering computational complexity and enhancing model generalization. Traditional feature selection methods perform well when dealing with linear features or small datasets, but they often suffer from information loss or overfitting when faced with high-dimensional, redundant, or nonlinear feature structures.

To address these challenges, this study introduces a sorted metrics method based on statistical and information theoretic principles. This method offers strong interpretability and adaptability, allowing flexible combination of various metrics suitable for different data distributions and feature types. Specifically, the proposed method ranks and filters features through multiple stages using three core metrics.

First, the correlation coefficient (CCF) [2] measures the linear correlation between features and removes redundant ones based on a defined threshold. Common forms include Pearson coefficient, Spearman rank coefficient, and Kendall Tau coefficient.

Second, the bayes factor (BF) [3], as a Bayesian hypothesis testing tool, evaluates the significance of features between high-risk and low-risk groups. A smaller BF value indicates stronger discriminative power.

Third, the self-information index (SII) [4] characterizes the variation in feature information based on entropy, capturing the degree of surprise to reveal key differences between risk groups.

Based on these metrics, a three-stage selection strategy is implemented. The first stage uses CCF to eliminate low correlation or duplicate features. The second stage employs BF to retain features with strong group discrimination. The third stage applies SII to select features with significant information differences, resulting in the final feature subset.

This strategy optimizes the selection process from correlation analysis to statistical significance evaluation and information density comparison, ensuring that the final features are representative, independent, and highly predictive.

Experimental results and analysis

This section presents a detailed evaluation of the proposed sorted-metrics-based feature selection approach by analyzing the performance of various metric-based methods. The comparison focuses on three categories of metrics used in feature screening: correlation-based, statistical hypothesis-based, and information-theoretic methods. The results are summarized in Figure 1 and evaluated using multiple performance indicators, including accuracy, sensitivity, specificity, positive predictive value (PPV), negative predictive value (NPV), and execution time.

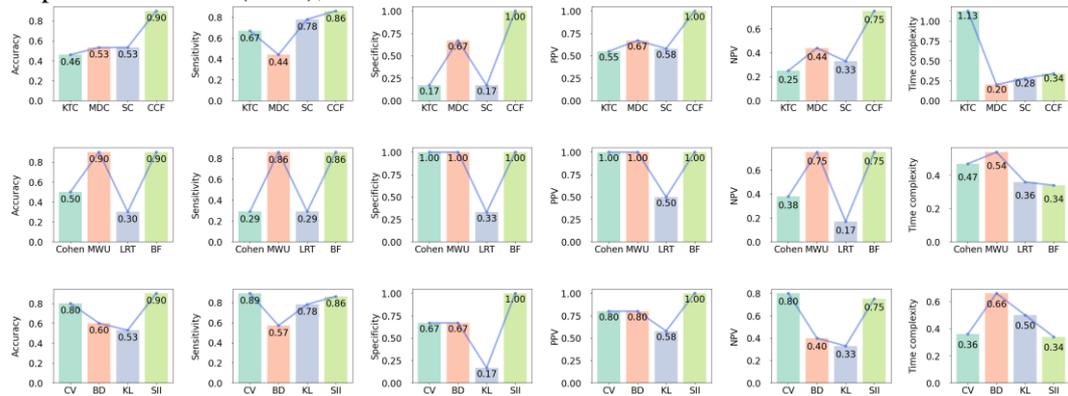


Figure 1. Performance assessment of multiple sorted-metrics based methods

The first category includes methods based on the correlation coefficient, such as Kendall tau correlation (KTC), multivariate distance correlation (MDC), and spearman correlation (SC). These metrics quantify the level of association between features, making them useful for identifying and removing redundant features during the initial screening stage. Among these, CCF demonstrates the most consistent and robust performance. It not only achieves high classification Accuracy but also maintains low computational cost, making it especially suitable for real time fall risk detection systems.

The second category consists of methods based on the bayes factor, including Cohen’s effect size, the Mann Whitney U test (MWU), and the likelihood ratio test (LRT). These metrics evaluate the difference in feature distributions between high risk and low risk groups using hypothesis testing principles. Both BF and MWU show strong predictive power, with BF slightly outperforming others in terms of Accuracy. However, MWU has longer Execution Time, which may hinder its practical use in applications requiring fast responses.

The third category includes information theoretic methods, such as the coefficient of variation (CV), Bhattacharyya distance (BD), and Kullback divergence (KL). These metrics assess the differences in feature distributions based on entropy, divergence, and variability. SII performs competitively in this category. Although it slightly lags behind CV in Sensitivity and NPV, SII surpasses other methods in Accuracy and shows a well-balanced performance across most criteria.

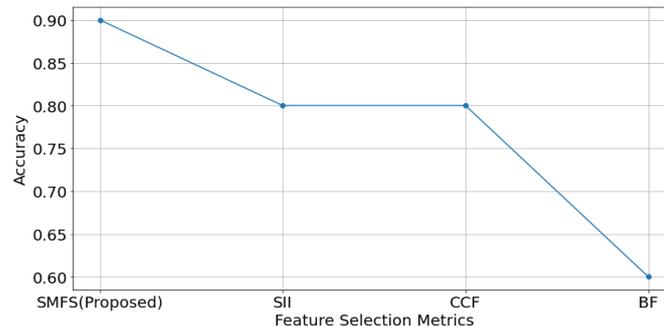


Figure 2. Performance assessment of hybrid and nonhybrid sorted-metrics based methods

In Figure 2 illustrates the relationship between fall risk prediction accuracy and the use of different sorted metrics, including the proposed SMFS method and individual metric based on methods derived from the three metrics: SII, CCF, and BF. The graph shows that both SII and CCF achieve the same level of accuracy. However, CCF selects 38 features, whereas SII requires only 4, highlighting the superior efficiency of SII in reducing feature dimensionality. The proposed SMFS method achieves the highest accuracy of 0,9, outperforming all single-metric approaches and clearly demonstrating the necessity and effectiveness of SMFS.

In summary, the experimental results indicate that CCF, BF, and SII consistently outperform other metrics in selecting the most relevant and discriminative features for fall risk prediction. The combination of these three metrics supports a multistep feature selection process that moves from redundancy reduction to statistical separation and finally to information density enhancement. This approach not only improves classification Accuracy but also ensures the selected features are efficient for real-time implementation in wearable systems using plantar pressure data.

Conclusion

This paper proposes a feature selection method based on sorted metrics for fall risk assessment. Experimental results demonstrate that the method achieves high prediction accuracy while reducing the number of selected features and satisfying real-time computational constraints. Future work will focus on enhancing multi-sensor data fusion and refining decision rules to develop more comprehensive solutions for both clinical and home-based monitoring applications.

References

1. Gardner H. // Harvard Graduate School of Education. 2011. P. 9.
2. Kass R. E. // Journal of the American Statistical Association. 1995. Vol. 90(430). P. 773–795.
3. Asuero A. G., Sayago A., González A. G. // Critical Reviews in Analytical Chemistry. 2006. Vol. 36(1). P. 41–59.
4. Li H. // IEEE Sensors Journal. 2025. Vol. 25(5). P. 8721–8736.

УДК 004.56: 65.011.56

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ В СЕТЕВОМ ТРАФФИКЕ

И.А. ТРЕТЬЯКОВ, М.Г. ЧУМАЧЕНКО

Донецкий государственный университет, Российская Федерация

Поступила в редакцию 01 апреля 2025

Аннотация. В настоящей работе разработана автоматизированная система оповещения о потенциальных атаках на сетевой трафик. Система способна в реальном времени анализировать трафик на предмет наличия аномалий, характерных для различных видов атак, что значительно повышает уровень информационной безопасности в условиях постоянно растущей угрозы сетевых атак.

Ключевые слова: информационная безопасность, аномалия, сетевая атака, трафик, автоматизированная система, машинное обучение, python.

Введение

В современном мире, где объёмы передаваемых данных постоянно растут, и сетевые технологии становятся всё более сложными и многофункциональными, вопросы информационной безопасности занимают одно из центральных мест в повестке дня многих организаций и индивидуальных пользователей. Среди многочисленных аспектов информационной безопасности особое внимание привлекают атаки на сетевой трафик [1-3], способные нарушить нормальное функционирование информационных систем, привести к утечке или потере данных, а также к существенным финансовым потерям. Предотвращение таких угроз информационной безопасности невозможно без разработки и внедрения специализированных автоматизированных систем на основе методов и средств машинного обучения [4-6].

Архитектура разрабатываемой системы

Автоматизированная система обнаружения аномалий в сетевом трафике реализована на высокоуровневом языке программирования общего назначения Python и представляет собой комплексное решение, способное в режиме реального времени анализировать трафик на предмет наличия потенциальных атак и аномальных действий. Архитектура системы разрабатывалась с учетом необходимости обеспечения высокой производительности, масштабируемости и гибкости в интеграции с существующими сетевыми инфраструктурами.

Компоненты автоматизированной системы обнаружения аномалий в сетевом трафике:

1. Модуль захвата данных отвечает за перехват сетевых пакетов посредством библиотеки Scapy. Scapy позволяет детально анализировать структуру каждого пакета, что является критически важным для последующего выявления аномалий.

2. Модуль предварительной обработки преобразует сырые данные пакетов в структурированный формат, подготавливая их к анализу. Включает в себя фильтрацию и валидацию данных, обеспечивая, что только релевантная информация будет передана на следующий этап.

3. Модуль машинного обучения анализирует обработанные данные на предмет выявления аномальных шаблонов основываясь на алгоритмах кластеризации (KMeans). Использование

библиотеки Sklearn позволяет эффективно применять сложные алгоритмы машинного обучения для определения потенциальных угроз.

4. Модуль логирования записывает все действия и события в системе, обеспечивая возможность последующего анализа и аудита безопасности.

5. Пользовательский интерфейс реализован посредством библиотеки Tkinter и приведен на рис. 1. Интерфейс предоставляет пользователям легкий доступ к функционалу системы, включая запуск анализа, просмотр результатов и конфигурацию настроек.

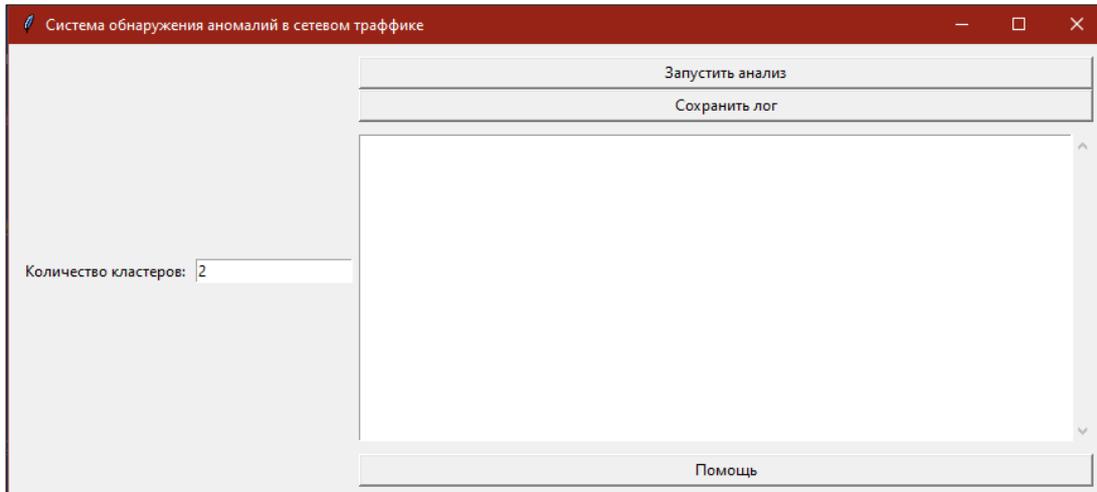


Рис. 1. Пользовательский интерфейс

Каждый компонент автоматизированной системы обнаружения аномалий в сетевом трафике спроектирован так, чтобы обеспечить максимальную эффективность и точность при идентификации потенциальных угроз. Важной частью системы является проверка корректности IP-адресов и портов, которые вводит пользователь. Валидация этих входных данных выполняется с использованием регулярных выражений и дополнительных проверок на диапазон значений, чтобы гарантировать, что анализ будет выполнен только с корректными параметрами. На рис. 2 представлены две функции, реализующие валидацию IP-адресов и портов.

```
def validate_ip(ip_address):
    """Проверяет, является ли введенный IP-адрес валидным IPv4 адресом..."""
    ip_pattern = re.compile(r"^(?:[0-9]{1,3}\.){3}[0-9]{1,3}$")
    if not ip_pattern.match(ip_address):
        raise ValueError("Некорректный IP-адрес.")

1 usage
def validate_port(port):
    """Проверяет, является ли введенный порт валидным..."""
    try:
        port_num = int(port)
        if not 1 <= port_num <= 65535:
            raise ValueError("Номер порта должен быть в диапазоне от 1 до 65535.")
    except ValueError:
        raise ValueError("Номер порта должен быть в диапазоне от 1 до 65535.")
```

Рис. 2. Пример реализации кода по валидации IP адреса и порта

Функция `validate_ip(ip_address)` предназначена для проверки является ли введенная строка корректным IPv4 адресом. Функция `validate_port(port)` проверяет, находится ли введенное значение порта в допустимом диапазоне (от 1 до 65535). Эти функции являются ключевыми компонентами системы валидации входных данных, обеспечивая базовую безопасность и корректность данных, используемых в дальнейших операциях системы.

После проверки корректности IP-адресов и портов, которые вводит пользователь, система начинает свою работу с захвата траффика, который проходит через сетевой интерфейс. После захвата пакеты проходят через этап предварительной обработки, где осуществляется их фильтрация и стандартизация. Далее обработанные данные направляются в модуль машинного обучения, где происходит анализ на предмет классификации траффика на нормальный и аномальный. В случае обнаружения аномалии система фиксирует событие в логах и через пользовательский интерфейс оповещает об этом администратора (рис. 3).

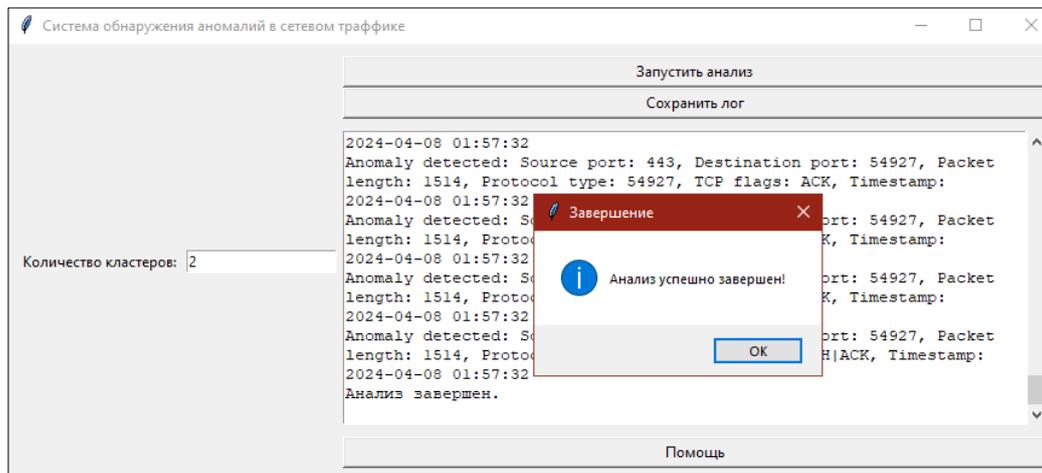


Рис. 3. Визуализация результатов анализа

Заключение

Таким образом, разработанная автоматизированная система обнаружения аномалий в сетевом траффике представляет собой мощный инструмент для обеспечения сетевой безопасности, способный оперативно реагировать на угрозы и предотвращать возможные атаки в реальном времени.

AUTOMATED SYSTEM OF ANOMALY DETECTION IN NETWORK TRAFFIC

I.A. TRETIAKOV, M.G. CHUMACHENKO

Abstract. In this paper, we have developed an automated system of notification for potential attacks on network traffic. The system is able to analyze traffic in real time for the presence of anomalies characteristic of various types of attacks, which significantly increases the level of information security in the face of an ever-growing threat of network attacks.

Keywords: information security, anomaly, network attack, traffic, automated system, machine learning, python.

Список литературы

1. Третьяков И.А., Кожекина Е.Н., Лебедев К.Е. Выявление проблем безопасности веб-сайтов посредством DoS-атаки // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. 2022. № 1. – С. 19-32. EDN UOSGY.
2. Чаругин В.В., Чесалин А.Н. Анализ и формирование наборов данных сетевого траффика для обнаружения компьютерных атак // International Journal of Open Information Technologies. 2023. Т. 11, № 6. С. 100-106. EDN HZDNHW.
3. Лаута О.С., Скоробогатов С.Ю., Перов Р.А., Привалов А.А. Разработка модели обнаружения компьютерных атак на программно-конфигурируемые сети // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 5. С. 181-193. EDN GJPBPF.

4. Кажемский М.А., Шелухин О.И. Многоклассовая классификация сетевых атак на информационные ресурсы методами машинного обучения // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5, № 1. С. 107-115. EDN JARTWC.
5. Муллоха В.А., Лабошин Л.Ю., Лукашин А.А., Нашивочников Н.В. Машинное обучение для анализа и классификации зашифрованного сетевого трафика // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2020. Т. 1. С. 238-241. EDN XYQCZP.
6. Бабичева М.В., Третьяков И.А. Применение методов машинного обучения для автоматизированного обнаружения сетевых вторжений // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023. Т. 50, № 1. С. 53-61. EDN MGBAGF.

METHODS OF LOW DATA IMAGE CLASSIFICATION WITH NEURAL NETWORK

Y.M. CHEN

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

Received April 04, 2025

Abstract. Image classification has evolved from relying on handcrafted feature engineering to a data-driven deep learning paradigm, with recent breakthroughs extending its capabilities to zero-shot and few-shot learning scenarios. This paper introduces emerging paradigms for low-data scenarios: (1) zero-shot learning methods, including multimodal models (e.g., CLIP) that align visual and textual embeddings for open vocabulary classification and generative frameworks for synthesizing features of unseen classes; and (2) few-shot learning strategies, such as meta-learning (e.g., MAML), metric-based networks (e.g., ProtoNet), and fast adaptation techniques (e.g., Tip-Adapter) that leverage pre-trained knowledge for fast adaptation. While these methods reduce the reliance on labeled data, challenges remain in domain adaptation, fine-grained classification, and computational efficiency.

Keywords: Image classification, Deep learning, Zero-shot learning, Few-shot learning, CLIP, Convolutional Neural Networks (CNNs), Vision Transformers (ViTs)

Introduction

Image classification, the task of assigning semantic labels to digital images based on their visual content, has become an essential task in modern computer vision. Its applications range from medical imaging and autonomous driving to social media content moderation, driving the continuous demand for accurate, scalable, and adaptable solutions. Traditional approaches are rooted in feature engineering techniques such as scale-invariant feature transform (SIFT) and histogram of oriented gradients (HOG), relying on manually designed descriptors combined with machine learning classifiers such as support vector machines (SVM). While these methods are effective for constrained scenes, they face significant limitations in handling real-world variations including occlusions, illumination changes, and viewpoint changes due to their reliance on domain expertise and rigid feature representations.

The advent of deep learning marked a paradigm shift. Convolutional neural networks (CNNs), exemplified by the breakthrough of AlexNet in the ImageNet competition, demonstrated an unprecedented ability to learn hierarchical features directly from raw pixels. Subsequent architectures such as VGGNet, ResNet, and DenseNet further improved accuracy through innovations such as networks and deeper connections. Recently, Vision Transformers (ViTs) challenged the dominance of CNNs by leveraging self-attention mechanisms to model global dependencies, achieving state-of-the-art performance on large-scale datasets. However, these data-hungry models require large amounts of labeled training data, which limits their remaining usefulness in scenarios where annotations are scarce, expensive, or dynamically changing common challenges in medical, ecological, or industrial applications.

To address these limitations, the field has increasingly focused on low-data schemes, particularly zero-shot learning (ZSL) and few-shot learning (FSL). Zero-shot methods aim to classify unseen categories by leveraging auxiliary information such as semantic attributes or textual descriptions, while few-shot techniques adapt models to new tasks using minimal labeled examples. Pioneer methods in ZSL, such as attribute embeddings and generative adversarial networks (GANs), have laid the foundation for bridging semantic and visual spaces. Meanwhile, meta-learning frameworks such as model-agnostic meta-learning (MAML) and prototypical networks have redefined few-shot adaptations

by learning transferable initialization parameters or similarity metrics. The advent of multimodal models such as Contrastive Language-Image Pretraining (CLIP) has further revolutionized the field by unifying vision and language through contrastive learning, enabling open vocabulary classification without the need for task-specific fine-tuning.

Methods

As image classification tasks gradually shift from relying on large amounts of data to low-data scenarios, a variety of innovative methods have been proposed to address the challenges of zero-shot and few-shot learning. These methods significantly improve the generalization ability of models under limited supervision through strategies such as multimodal alignment, meta-optimization, prototype matching, feature generation, and lightweight adaptation.

These methods not only expand the boundaries of traditional deep learning but also provide flexible solutions for dynamic needs in practical applications.

CLIP (Contrastive Language-Image Pretraining), developed by OpenAI, represents a paradigm shift in image classification by unifying vision and language through multimodal contrastive learning. The model jointly trains a visual encoder (e.g., Vision Transformer or ResNet) and a text encoder (e.g., Transformer) on a large dataset of image-text pairs, mapping both modalities into a shared embedding space. Figure 1 shows the approach of their method. During inference, CLIP achieves zero-shot classification by comparing image embeddings with text embeddings of user-defined class descriptions (e.g., "satellite photo of a rainforest"), eliminating the need for task-specific fine-tuning. This approach performs well in open vocabulary scenarios, allowing flexible adaptation to new categories via natural language cues. However, its performance on fine-grained tasks (e.g., distinguishing between bird subspecies) is still limited by the semantic granularity of the text cues, and biases in the training data from the network can propagate to downstream applications.

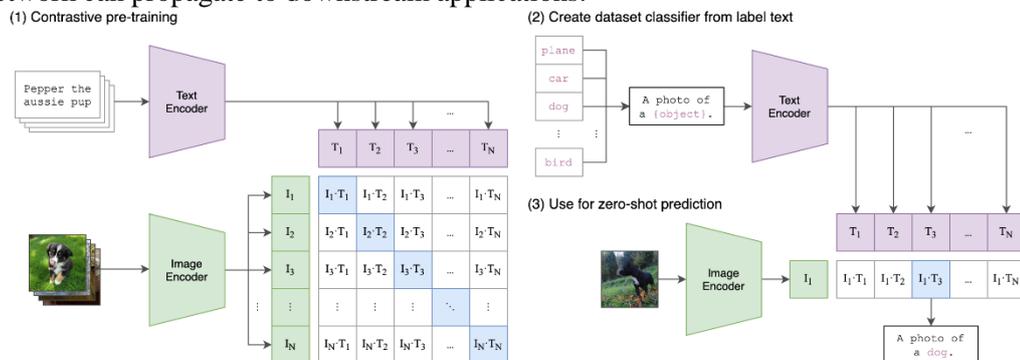


Figure 1. Summary of CLIP's approach [1]

MAML (Model-Agnostic Meta-Learning [2]) is a foundational meta-learning framework that solves the few-shot learning problem by "learning to learn". Instead of training a model for a specific task, MAML optimizes a set of initial parameters that can quickly adapt to new tasks with minimal labeled examples. By training across scenarios of different tasks, the model internalizes a generalizable initialization, enabling efficient fine-tuning using gradient updates on a small support set. While MAML performs well in domains ranging from robotics to medical imaging, it is computationally expensive as it requires second-order derivative computations during meta-training. Furthermore, performance depends on the diversity and quality of the meta-training task distribution, which poses a challenge in scenarios with limited task variation.

ProtoNet (Prototypical Network) simplifies few-shot classification by leveraging principles of metric learning. For each class in the support set, the network computes a "prototype" as the average feature vector of its labeled examples. Figure 2 demonstrated the classification mechanism of the prototype network in few-shot and zero-shot scenarios. During inference, a query sample is classified based on its Euclidean or cosine distance to these prototypes in the embedding space. This approach bypasses complex architectural modifications and instead relies on a well-structured feature space learned through episodic training. The simplicity and efficiency of ProtoNet make it a popular baseline for few-shot benchmarks, but its performance degrades when the support samples are noisy or

insufficient to capture intra-class variation. Extensions to this framework, such as leveraging attention mechanisms, have been proposed to enhance robustness.

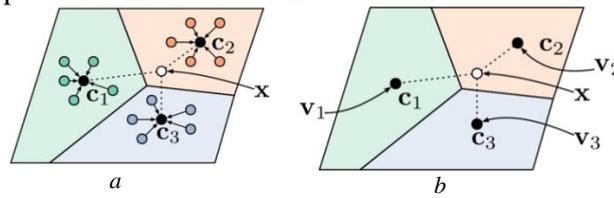


Figure 2. Prototypical networks in the few-shot and zero-shot scenarios [3]:
a – few-shot scenario; *b* – zero-shot scenario

f-CLSWGAN (Feature-Conditioned Least Squares Wasserstein GAN [4]) tackles zero-shot learning by synthesizing features for unseen classes, effectively transforming the problem domains into a supervised learning task. By conditioning a Wasserstein GAN on semantic attributes or text descriptions, the model generates synthetic visual features that mimic real data distributions. These generated features are then used to train a classifier for unseen categories, bridging the gap between semantic and visual. While this approach mitigates the “domain shift” problem common in zero-shot learning, its success heavily depends on the quality and diversity of generated features. Imperfections in feature synthesis, such as mode collapse or unrealistic variations, can propagate errors to downstream classification.

Tip-Adapter [5] bridges the gap between large-scale pre-trained models and small-sample adaptation by combining feature caching with lightweight neural networks. The approach stores pre-trained image features of supporting examples in a key-value cache and then trains a small adapter network to map query features to cached prototypes through non-parametric retrieval. This hybrid design fully leverages the rich representations of models such as CLIP or ResNet while avoiding extensive fine-tuning, achieving high accuracy with minimal computational overhead. The efficiency of Tip-Adapter makes it particularly suitable for edge devices or scenarios that require fast deployment, although its performance stagnates when the pre-trained features lack discriminative power for the target task.

These methods expand the boundaries of traditional deep learning and provide flexible solutions for dynamic real-world applications.

Conclusion

Image classification has advanced from manual feature design to methods that work with little data. New approaches, like aligning images with text or learning from a few examples, show promise for real-world use. Challenges remain, such as reducing biases and improving efficiency. Future work should focus on making models more adaptable, fair, and efficient. By addressing these issues, image classification can better serve diverse applications, from healthcare to environmental monitoring, even with limited resources.

References

1. Radford, A., et al. // International conference on machine learning. 2021. P. 8748–8763.
2. Finn, Chelsea, et al. // International conference on machine learning. 2017. P. 1126–1135.
3. Snell, J., Swersky, K., Zemel, R. // Advances in neural information processing systems. 2017. P. 4077–4087
4. Xian, Y., Lorenz, T., Schiele, B., & Akata, Z. // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2018. P.5542–5551.
5. Zhang, R., et al. // European conference on computer vision. 2022. P. 493–510.

CONCEPTUAL FRAMEWORK AND THEORETICAL CHALLENGES IN UNSUPERVISED ANOMALY DETECTION FOR NETWORK TRAFFIC DATA

X. WANG, A.M. PRUDNIK

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

Received April 4, 2025

Abstract. This paper outlines the initial design considerations for a system aimed at processing and analyzing network traffic data to detect anomalies using machine learning. The study explores anticipated challenges in data preprocessing, scalability, and algorithm selection, emphasizing the potential of unsupervised learning methods to identify unusual patterns in network traffic. The proposed approach serves as a foundation for future development of anomaly detection systems.

Keywords: network traffic processing, anomaly detection, machine learning, system design challenges

Introduction

Rising network traffic volume and complexity, driven by connected devices and digital services, challenge security systems [1]. Modern networks process high-dimensional, variable data streams, complicating anomaly detection [2]. Signature-based methods excel at known threats but fail against novel attacks [3]. This research proposes a machine learning-based framework for adaptive network traffic analysis, targeting the reliance of traditional methods on predefined signatures and static rules [4]. It leverages machine learning to detect subtle deviations without extensive labeled data, despite technical and operational hurdles [5]. The framework focuses on three challenges: algorithm selection, large-scale preprocessing, and real-time scalability. Unlike implementation-focused studies, it emphasizes theoretical and architectural foundations for robust anomaly detection, contributing to data-driven network security advancements.

Proposed System Architecture

This section outlines a modular architecture for the anomaly detection system, addressing challenges from the introduction. It includes three components: data input/preprocessing, processing layer, and output generation, designed for scalability and adaptability.

The data acquisition framework uses synthetic traffic data for initial validation, aligning with practices in [6]. It incorporates features like temporal patterns and protocol distributions [7]. Operational deployment faces data quality issues, with excessive traffic volume [8]. Adaptive preprocessing pipelines normalize formats, preserving key features. Flexible interfaces support batch and streaming data, meeting large-scale monitoring needs [9].

The processing layer employs a pipeline for analysis. Feature extraction uses dimensionality reduction and z -score normalization to unify diverse metrics. The detection module supports multiple algorithms, addressing varied attack vectors and ensuring adaptability, with flexibility for future methods.

Output Generation and Alert Management

The output module uses a multi-tiered severity classification framework for network anomalies. It generates normalized scores (0–1) based on deviations from baseline traffic, following visualization

practices. Scores align with findings that consistent metrics aid decision-making [10]. Anomalies scoring above 0.8 are critical, prioritized per research showing graduated alerts reduce cognitive load [11]. Protocol-agnostic data structures ensure integration with analysis frameworks, retaining threat context.

The system employs a stateless architecture, storing results in a format compatible with SIEM (Security Information and Event Management) systems, supporting interoperability. Alert generation uses correlation and aggregation to cut redundancy while preserving temporal links. Figure 1 depicts the architecture, showing the relationship between input processing, analysis, and output components.

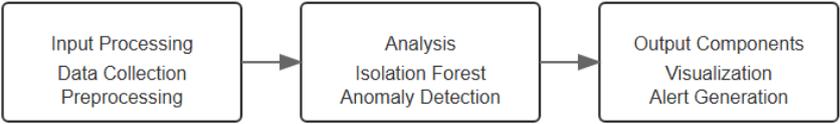


Figure 1. High-level system architecture

Machine Learning Approach

Machine learning outperforms signature-based methods in network anomaly detection, excelling at zero-day and evolving threats. Unsupervised learning addresses the lack of labeled data in operational networks, where attack vectors evolve rapidly. It detects anomalies by deviations from normal behavior, offering scalability for novel threats.

The isolation forest algorithm enhances efficiency in high-dimensional traffic data [12]. It isolates sparse anomalies with $O(n \log n)$ complexity, enabling real-time processing [13]. However, dynamic traffic complicates model adaptation and threshold tuning, and opaque outputs hinder interpretability for security responses. Our framework uses a hybrid approach with visualization. Figure 2 shows normal vs. anomalous patterns in feature space, aiding decision-making. The isolation forest decision boundaries highlight regions where anomalies deviate from normal traffic distributions. High-volume attacks cluster in the upper right, while low and slow attacks appear in the lower left, demonstrating distinct traffic behaviors. The shades of blue in the background represent varying anomaly scores, with darker regions indicating areas more likely to be classified as normal, providing a visual guide for decision-making.

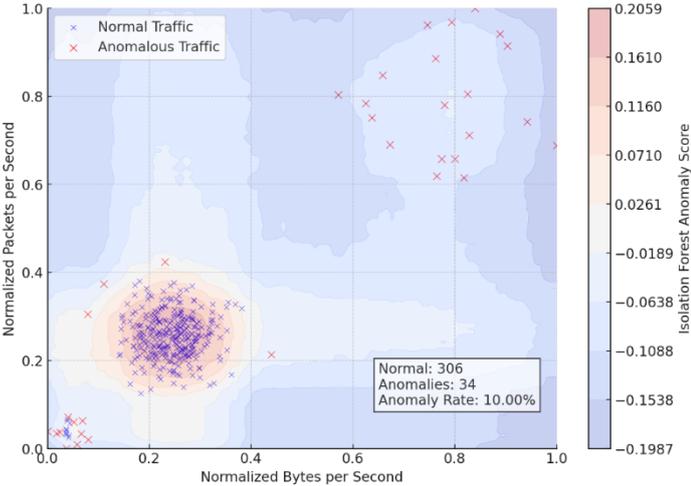


Figure 2. Conceptual visualization of normal versus anomalous traffic patterns

Challenges and Limitations

Implementing unsupervised anomaly detection in network traffic faces challenges beyond algorithms, affecting accuracy and performance. Data quality is a hurdle in operational networks, producing heterogeneous traffic with inconsistent sampling and missing values, cutting detection accuracy. Robust preprocessing is needed to manage irregularities and retain anomaly indicators. Feature selection is critical in high-dimensional traffic, with over 40 features identified [6]. Optimal sets vary by attack type, requiring adaptive mechanisms. Scalability limits real-time analysis, with traffic

over 100 Gbps straining resources [14]. Even optimized systems falter during spikes, needing efficient algorithms and resource management. Parameter optimization in isolation algorithms impacts accuracy by 15 % [15], complicated by dynamic traffic and no labeled data. Interpretability lags, with "black box" outputs increasing alert investigation time by 73 % [16]. Adaptive tuning and explainable frameworks are essential. Figure 3 shows these challenges' overlap.

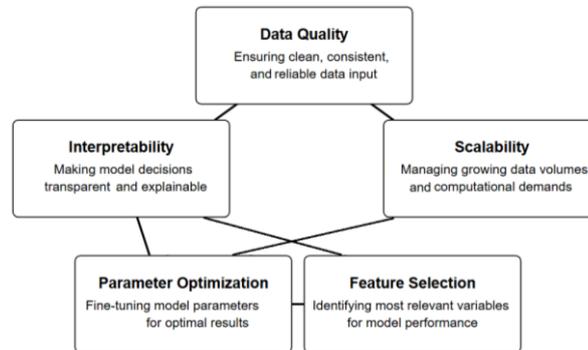


Figure 3. Interconnected relationship between key system design challenges

Conclusion

This research outlines a theoretical framework for network traffic anomaly detection, using unsupervised learning in a modular design. It tackles limitations in current security methods via algorithmic adaptability and flexible architecture. Key challenges identified include data quality, feature optimization, scalability, parameter tuning, and interpretability, offering avenues to advance network security analytics. Future work will involve empirical validation with operational data and algorithm refinement based on performance metrics. This foundation supports robust anomaly detection systems for emerging threats. Ongoing study of these challenges will enhance understanding of unsupervised learning in network security.

References

1. Sommer R., Paxson V. // IEEE Symposium on Security and Privacy. 2010. P. 305–316.
2. García-Teodoro P., Díaz-Verdejo J., Maciá-Fernández G., Vázquez E. // Computers & Security. 2009. Vol. 28. P. 18–28.
3. Buczak A. L., Guven E. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18. No. 2. P. 1153–1176.
4. Ahmed M., Mahmood A. N., Hu J. // Journal of Network and Computer Applications. 2016. Vol. 60. No. C. P. 19–31.
5. Bhuyan M. H., Bhattacharyya D. K., Kalita J. K. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2014. Vol. 16. P. 303–336.
6. Ring M., Wunderlich S., Gründl D., Landes D., Hotho A. // Proc. of the 16th European Conf. on Cyber Warfare and Security. 2017. P. 361–369.
7. Sharafaldin I., Lashkari A. H., Ghorbani A. A. // Proc. of the 4th International Conf. on Information Systems Security and Privacy. 2018. P. 108–116.
8. Bhuyan M. H., Bhattacharyya D. K., Kalita J. K. // Network Traffic Anomaly Detection and Prevention: Concepts, Techniques, and Tools. Springer International Publishing, 2017.
9. Cordero C. G., Vasilomanolakis E., Milanov N., Koch C., Hausheer D., Mühlhäuser M. // IEEE Conf. on Communications and Network Security (CNS). 2015. P. 739–740.
10. D'Amico A., Whitley K. // VizSEC 2007: Proc. of the Workshop on Visualization for Computer Security. 2008. P. 19–37.
11. Perdisci R., Ariu D., Fogla P., Giacinto G., Lee W. // Computer Networks. 2009. Vol. 53. No. 6. P. 864–881.
12. Liu F. T., Ting K. M., Zhou Z. H. // ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data. 2012. Vol. 6. No. 1. P. 1–39.
13. Ding Z., Fei M. // IFAC Proceedings Volumes. 2013. Vol. 46. No. 20. P. 12–17.
14. Perdisci R., Lee W., Feamster N. // 7th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation. 2010. Vol. 12. P. 26.
15. Wang H., Bah M. J., Hammad M. // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 107964–108000.
16. Ribeiro M. T., Singh S., Guestrin C. // Proc. of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2016. P. 1135–1144.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОТОКОЛЫ АУТЕНТИФИКАЦИИ И АВТОРИЗАЦИИ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ

Е.В. БЕГЛЯК, В.А. МАРЦИНКЕВИЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 15 февраля 2025

Аннотация. Статья посвящена анализу современных протоколов аутентификации и авторизации в беспроводных сетях, их безопасности, эффективности и применимости в различных сценариях. Рассмотрены ключевые стандарты, включая WPA3, EAP, OAuth 2.0, OpenID Connect, а также методы управления доступом (RBAC, ABAC, SAML). Проведен сравнительный анализ протоколов по уровню защиты от кибератак, производительности и удобству внедрения. Выявлены основные проблемы, такие как уязвимости в устаревших системах и сложность интеграции в гетерогенные сети. Предложены рекомендации по выбору протоколов для корпоративных сетей, публичного Wi-Fi и IoT-устройств. Обзор подчёркивает необходимость адаптации существующих протоколов безопасности и разработки новых решений для эффективного противостояния современным киберугрозам.

Ключевые слова: аутентификация, авторизация, беспроводные сети, WPA3, EAP, OAuth 2.0, кибербезопасность, управление доступом, RBAC, ABAC, SAML, IoT.

Введение

Современный мир невозможно представить без беспроводных технологий. От корпоративных офисов до умных домов, от общественных пространств до промышленных IoT-систем – Wi-Fi и другие беспроводные сети стали основой цифровой коммуникации. Однако, чем больше устройств подключается к сети, тем шире становится поле для киберугроз. По данным аналитиков Fortinet, в 2023 году более 70 % компаний столкнулись с инцидентами, связанными с утечкой данных через уязвимости в системах аутентификации [1]. При этом традиционные методы защиты, такие как статичные пароли или устаревшие протоколы вроде WEP (Wired Equivalent Privacy), давно перестали быть надежным щитом. Злоумышленники применяют разнообразные методы атак, начиная с грубого перебора паролей и заканчивая использованием уязвимостей в механизмах аутентификации и протоколах обмена данными.

Эта проблема усугубляется разнородностью современных сетей. К одной точке доступа могут подключаться сотрудники с корпоративными ноутбуками, гости со смартфонами, датчики умного здания и даже автономные роботы. Каждое из этих устройств требует индивидуального подхода к управлению доступом. Например, IoT-устройства зачастую не способны поддерживать сложные методы аутентификации из-за ограниченных вычислительных ресурсов, а публичный Wi-Fi в аэропорту нуждается в балансе между безопасностью и удобством для пользователей.

Цель статьи – рассмотреть, как современные протоколы аутентификации и авторизации, такие как WPA3 (Wi-Fi Protected Access), OAuth 2.0, EAP (Extensible Authentication Protocol), OpenID Connect и IEEE 802.1X, решают конкретные задачи в различных сценариях. Анализ этих технологий помогает оценить компромиссы между удобством и безопасностью, а также определить их дальнейшие перспективы в условиях растущих требований к кибербезопасности.

Главное внимание уделено трем ключевым аспектам: эволюции протоколов, практической применимости и гибридным подходам. Новые стандарты, такие как WPA3 и EAP-TLS 1.3 (Transport Layer Security), эффективно закрывают пробелы своих предшественников, обеспечивая более надёжную защиту. В то же время решения, которые идеально подходят для

корпоративных сетей, часто сталкиваются с трудностями в IoT-средах из-за ограничений ресурсов. В ответ на это сложность современных инфраструктур требует применения комбинированных методов аутентификации и авторизации, которые позволяют учитывать разнообразие устройств и сред.

Статья позволит глубже понять, как современные протоколы аутентификации и авторизации отвечают на вызовы цифровой эпохи, демонстрируя их достижения и выявляя области для дальнейшего развития.

Обзор современных протоколов аутентификации

Беспроводные сети, в силу своей открытой природы, требуют особенно тщательного подхода к аутентификации. Современные протоколы развиваются, чтобы противостоять не только традиционным угрозам, но и новым методам атак, которые становятся всё более изощрёнными. Среди множества решений выделяются несколько ключевых стандартов, каждый из которых занимает свою нишу в зависимости от требований к безопасности, масштабу сети и типу устройств.

Одним из наиболее значимых шагов в эволюции безопасности Wi-Fi стало появление WPA3 в 2018 году. Новый протокол решает давние проблемы предыдущего стандарта WPA2, вызвавшие серьёзную критику из-за его уязвимостей. WPA3 ввёл технологию SAE (Simultaneous Authentication of Equals), устранившую риск атак методом перебора паролей, таких как Pixie Dust. Кроме того, протокол обеспечивает механизм «совершенной прямой секретности» (Perfect Forward Secrecy), гарантируя, что даже при компрометации долгосрочного ключа злоумышленник не сможет расшифровать ранее перехваченные данные. Отдельного внимания заслуживает функция Wi-Fi Easy Connect, упрощающая подключение устройств без дисплея – от умных лампочек до промышленных датчиков. Однако, несмотря на прогрессивность WPA3, его внедрение сталкивается с рядом сложностей. Многие организации до сих пор используют оборудование, не поддерживающее новый стандарт, а массовый переход требует значительных финансовых и временных затрат [2].

Для корпоративных сред, где безопасность часто важнее удобства, остаётся актуальным EAP. Гибкость EAP позволяет выбирать из десятков методов аутентификации, адаптируясь к специфике инфраструктуры. Например, EAP-TLS, основанный на взаимной проверке сертификатов, обеспечивает высочайший уровень защиты, но требует развёртывания PKI (Public Key Infrastructure), что может быть избыточным для малого бизнеса. В таких случаях чаще применяются EAP-PEAP (Protected Extensible Authentication Protocol) или EAP-TTLS (Tunneled Transport Layer Security), которые используют туннелирование для защиты учётных данных. Эти методы особенно востребованы в образовательных учреждениях и крупных компаниях, где необходимо балансировать между безопасностью и простотой масштабирования. Для сред с повышенными требованиями к мобильности и многофакторной аутентификации отлично подходит EAP-MSCHAPv2 (Microsoft Challenge Handshake Authentication Protocol), который часто используется в комбинации с PEAP для обеспечения дополнительного уровня защиты, хотя и обладает ограничениями в контексте устойчивости к определённым видам атак. Развитие протоколов EAP продолжается, открывая новые возможности для обеспечения безопасности и повышения эффективности сетевых решений.

Интересный пример конвергенции технологий демонстрирует использование OAuth 2.0 и OpenID Connect в публичных беспроводных сетях. Изначально разработанные для авторизации в веб-приложениях, эти протоколы нашли применение в сценариях, где пользователь должен получить временный доступ к сети через стороннего провайдера. Например, при подключении к Wi-Fi в аэропорту система может перенаправить пользователя на страницу входа через Google или Facebook, используя OAuth 2.0 для делегирования прав. Это упрощает процесс для конечного пользователя и снижает нагрузку на провайдера, которому не нужно хранить пароли. Однако такая модель несёт риски, связанные с фишингом и утечкой токенов, что требует дополнительных мер, таких как обязательная многофакторная аутентификация.

Отдельного упоминания заслуживает стандарт IEEE 802.1X, который служит основой для контроля доступа в крупных сетях. Его архитектура, включающая три компонента – клиент,

аутентификатор и сервер аутентификации – обеспечивает централизованное управление политиками безопасности, минимизируя риск несанкционированного доступа. Например, в университетском кампусе 802.1X может использоваться для сегментирования трафика студентов, преподавателей и администрации, направляя каждую группу в отдельную VLAN (Virtual Local Area Network) для повышения уровня безопасности и оптимизации сетевых ресурсов. Ещё одним преимуществом является гибкость стандарта, позволяющая интегрировать его с различными механизмами аутентификации, такими как EAP–TLS или EAP–PEAP, что делает его универсальным инструментом для различных инфраструктур. Однако, несмотря на надёжность и эффективность, внедрение 802.1X зачастую требует значительных усилий по адаптации существующих сетей и предварительного обучения IT–специалистов, что ограничивает его применение в малых и средних сетях.

Эволюция протоколов аутентификации отражает общий тренд на персонализацию безопасности. Если раньше универсальные решения доминировали на рынке, то сегодня выбор метода зависит от конкретного контекста – от типа устройства до уровня доверия к пользователю. Это создаёт новые возможности, но и усложняет проектирование сетей, требуя от разработчиков глубокого понимания как технологий, так и бизнес-процессов.

Протоколы авторизации

Аутентификация, обеспечивающая проверку подлинности пользователя или устройства, – лишь первый рубеж защиты беспроводной сети. Следующий критически важный этап – авторизация, определяющая, какие ресурсы и в каком объёме доступны субъекту после успешной проверки. Если аутентификация отвечает на вопрос «кто вы?», то авторизация решает, «что вам разрешено делать». В условиях, когда сети становятся всё более сложными и распределёнными, методы управления доступом эволюционируют, предлагая решения для разных уровней гибкости и безопасности.

Одним из наиболее распространённых подходов остаётся RBAC (Role-Based Access Control) – управление доступом на основе ролей. Его принцип прост: каждому пользователю или устройству назначается роль (например, «сотрудник», «гость», «администратор»), которая определяет права доступа к сетевым ресурсам. В корпоративной Wi–Fi–сети – это может означать, что сотрудники отдела разработки получают доступ к серверам с исходным кодом, тогда как гости ограничены лишь выходом в интернет. Преимущество RBAC – в простоте администрирования. Добавление нового пользователя требует лишь присвоения ему соответствующей роли, а не индивидуальной настройки прав. Однако эта же простота становится недостатком в динамичных средах. Например, в университете, где студент одновременно может быть членом нескольких исследовательских групп, ручное управление ролями быстро превращается в логистический кошмар.

Альтернативой выступает ABAC (Attribute-Based Access Control) – управление доступом на основе атрибутов. Вместо жёстких ролей ABAC учитывает множество параметров: тип устройства, местоположение, время запроса, уровень безопасности соединения и даже данные из внешних систем (например, статус подписки из CRM). Представьте умное здание, где датчик температуры получает доступ к облачной платформе только при подключении через защищённую сеть, в рабочее время и, если его показания не выходят за заданный диапазон. Такая гранулярность делает ABAC идеальным для IoT–сетей, где тысячи устройств с разными функциями требуют индивидуальных политик. Однако за гибкость приходится платить: ABAC требует сложной инфраструктуры для анализа атрибутов в реальном времени, что увеличивает нагрузку на серверы авторизации [3].

Особый случай – SAML (Security Assertion Markup Language), который решает проблему федеративной авторизации в распределённых экосистемах. SAML позволяет одной организации делегировать аутентификацию и авторизацию доверенному провайдеру. Например, при подключении к партнёрской Wi–Fi–сети сотрудник компании-соискателя может использовать учётные данные своей корпоративной Active Directory, не создавая новый аккаунт. SAML–токен, подписанный поставщиком удостоверений, содержит всю необходимую информацию о правах доступа, что упрощает кросс-доменное взаимодействие. Этот подход особенно востребован в образовании и здравоохранении, где учреждения часто объединяются в консорциумы. Однако

SAML уязвим к атакам на основе подделки токенов, если не используются строгие методы шифрования и регулярная ротация ключей.

Интересно наблюдать, как эти протоколы комбинируются в реальных сценариях. В крупном университете, например, может использоваться связка EAP-TLS для аутентификации преподавательских и исследовательских устройств, ABAC для динамического управления доступом к студенческим ресурсам на основе курса обучения и текущего семестра, а SAML – для предоставления временного доступа внешним приглашённым лекторам или участникам конференции. Такая многослойность позволяет закрывать разные аспекты безопасности, но создаёт риск конфликта политик. Например, если RBAC ограничивает доступ студентов только к общедоступным библиотечным материалам, а SAML-токен от партнёрского учебного учреждения запрашивает расширенные права, система должна иметь чёткие правила приоритизации.

С учетом постоянно растущей сложности сетевых инфраструктур, комбинированный подход, включающий элементы RBAC, ABAC и SAML, становится необходимостью для обеспечения надежной защиты и гибкости управления доступом.

Сравнительный анализ протоколов

Эффективность протоколов аутентификации и авторизации невозможно оценить в отрыве от контекста их применения. С ростом числа подключённых устройств и усложнением сетевых инфраструктур выбор протоколов аутентификации и авторизации становится критически важным для обеспечения безопасности. Анализ ключевых протоколов демонстрирует, как технологии стремятся найти баланс между защитой и удобством.»

WPA3, безусловно, задаёт новый стандарт безопасности для Wi-Fi-сетей. Его механизм SAE и совершенная прямая секретность делают его практически неуязвимым к атакам, которые успешно эксплуатировали слабости WPA2. Однако эти преимущества теряют смысл, если в сети остаются устройства, поддерживающие только старые протоколы. Например, в гетерогенной среде, где к одной точке доступа подключаются современные смартфоны и устаревшие IoT-датчики, администратор вынужден либо поддерживать смешанный режим (WPA3-Transition Mode), либо жертвовать безопасностью ради совместимости. Это ярко иллюстрирует ключевую дилемму: даже самый прогрессивный протокол бесполезен без массового внедрения.

На этом фоне EAP демонстрирует удивительную гибкость. Методы вроде EAP-TLS, требующие инфраструктуры PKI, идеальны для банков или государственных учреждений, где безопасность превалирует над стоимостью внедрения. В то же время EAP-PEAP, использующий туннелирование поверх MSCHAPv2, подходит для университетов или стартапов, где важно быстро развернуть защиту без сложных настроек. Однако универсальность не исключает проблем, связанных с конфигурацией и управлением, которые становятся критическим фактором для обеспечения надёжности сети. Исследования показывают, что до 40 % утечек в корпоративных сетях связаны с ошибками в настройке RADIUS-серверов, которые часто используются вместе с EAP.

Не менее важно, чтобы протоколы не только обеспечивали защиту и гибкость, но также способствовали улучшению пользовательского взаимодействия. OAuth 2.0 и OpenID Connect, перенесённые из веб-сферы в мир беспроводных сетей, решают принципиально иную задачу – упрощение пользовательского опыта. Их сила – в способности интегрироваться с внешними провайдерами аутентификации, такими как социальные сети или корпоративные SSO-системы. Это делает их незаменимыми для публичных Wi-Fi-сетей в аэропортах, торговых центрах или гостиницах, где посетители ожидают мгновенного доступа без регистрации. Однако обратная сторона медали – уязвимость к фишингу и атакам на токены. Если злоумышленник перехватывает OAuth-токен, он может получить доступ не только к сети, но и к связанным сервисам (например, почте пользователя). Это требует дополнительных слоёв защиты, таких как ограничение времени жизни токенов или привязка к MAC-адресу устройства.

Сравнение методов авторизации – RBAC, ABAC и SAML – раскрывает ещё один пласт противоречий. RBAC, несмотря на простоту, становится узким местом в динамичных средах. Например, в стартапе, где сотрудники часто меняют роли, постоянное обновление политик превращается в рутину. ABAC, напротив, справляется с такими сценариями, но требует

значительных вычислительных ресурсов для анализа атрибутов в реальном времени. В IoT-сетях, где тысячи датчиков генерируют запросы одновременно, это может привести к задержкам авторизации. SAML, будучи идеальным для федеративных систем, сталкивается с проблемой доверия между организациями. Если университет-партнёр не обеспечивает должный уровень защиты своих учётных данных, это ставит под угрозу всю экосистему.

Интересный кейс – использование 802.1X в промышленных IoT-сетях. Стандарт обеспечивает централизованное управление доступом, но его реализация на заводах, где оборудование работает в экстремальных условиях (высокая температура, вибрация), часто приводит к сбоям в работе RADIUS-серверов (Remote Authentication Dial-In User Service). Это вынуждает инженеров идти на компромисс, заменяя 802.1X на упрощённые протоколы вроде Pre-Shared Key (PSK), что снижает общий уровень безопасности.

Общая тенденция такова: не существует «серебряной пули», способной закрыть все сценарии. Выбор протокола напоминает сборку пазла – необходимо совместить требования безопасности, ограничения инфраструктуры и ожидания пользователей. Например, в умном городе, где тысячи устройств от уличных камер до систем освещения объединены в единую сеть, может использоваться гибридная модель: WPA3 для шифрования данных, EAP-TLS для аутентификации критически важных узлов и ABAC для динамического управления доступом на основе данных с датчиков. Таким образом, внедрение протоколов аутентификации и авторизации требует не только технической точности, но и стратегического подхода, где безопасность, производительность и удобство объединяются для создания интегрированных сетевых решений будущего.

Проблемы и вызовы

Несмотря на прогресс в разработке протоколов, их внедрение в реальных условиях сталкивается с рядом системных сложностей. Эти проблемы часто носят не технический, а организационный или инфраструктурный характер, что делает их особенно устойчивыми к быстрому решению.

Унаследованные системы и инерция внедрения. Даже самые совершенные стандарты, такие как WPA3, не могут мгновенно вытеснить устаревшие протоколы. По данным исследования Avast (2023), 58 % роутеров в домашних сетях до сих пор используют WPA2, а 7 % – критически уязвимый WEP [4]. В корпоративном секторе ситуация ненамного лучше: переход на новые стандарты требует замены оборудования, переобучения сотрудников и временных простоев. Например, больница не может позволить себе отключить сеть на время миграции с WPA2 на WPA3, так как это парализует работу подключённых медицинских устройств. Это создаёт порочный круг: уязвимости старых систем остаются неисправленными, а новые технологии внедряются фрагментарно.

Сложность управления в гетерогенных средах. Современные сети объединяют устройства с радикально разными возможностями: от мощных серверов до датчиков с микроконтроллерами на 8-битной архитектуре. Протокол, идеально подходящий для аутентификации смартфонов, может быть неприменим к IoT-устройствам из-за ограничений по энергопотреблению или вычислительной мощности. Например, EAP-TLS, требующий обработки X.509-сертификатов, недоступен для дешёвых RFID-меток, что вынуждает использовать менее безопасные методы вроде статических ключей. Такая «лоскутная» безопасность создаёт точки входа для атак, особенно когда злоумышленник целенаправленно атакует самое слабое звено в системе.

Конфликт между удобством и безопасностью. Публичные Wi-Fi-сети – наглядный пример этого противоречия. С одной стороны, провайдеры заинтересованы в максимально простом подключении пользователей: вход через соцсети, одноразовые SMS-коды, гостевые доступы. С другой – упрощение процессов открывает двери для злоупотреблений. В 2022 году компания Kaspersky зафиксировала рост фишинговых атак через поддельные страницы входа в публичные Wi-Fi, где пользователи добровольно вводили свои учётные данные OAuth. Попытки усилить безопасность (например, ввести обязательную двухфакторную аутентификацию) часто приводят к снижению числа подключений, что экономически невыгодно для бизнеса.

Юридические и регуляторные барьеры. Развитие стандартов безопасности часто опережает законодательство. Это приводит к ситуациям, когда компании формально соблюдают

правила, используя устаревшие, но сертифицированные решения. Более того, в глобальных сетях приходится учитывать противоречивые требования разных юрисдикций. Китайский стандарт WAPI (WLAN Authentication and Privacy Infrastructure), обязательный для устройств, продающихся в стране, несовместим с WPA3, что усложняет создание универсальных продуктов для международного рынка [5].

Человеческий фактор. Даже самая продуманная система безопасности может быть скомпрометирована из-за ошибок пользователей или администраторов. Классический пример – повторное использование паролей. Согласно статье Enzoic, исследование Google показало, что 65 % людей повторно используют пароли на нескольких сайтах, что создает значительные риски для безопасности [6]. В случае утечки это позволяет злоумышленникам получать доступ к критически важным ресурсам. С другой стороны, администраторы часто оставляют настройки по умолчанию (например, стандартные учётные записи RADIUS-серверов), что упрощает проведение атак типа brute force.

Эти вызовы подчёркивают, что безопасность беспроводных сетей – не просто техническая задача, а комплексная проблема, требующая координации между разработчиками, регуляторами и конечными пользователями. Успешное внедрение современных протоколов невозможно без учёта экономических, социальных и юридических аспектов.

Рекомендации по выбору протоколов

Выбор протоколов аутентификации и авторизации напоминает подбор инструментов для сложного ремонта: универсальных решений нет, но есть чёткие принципы, которые помогают избежать критических ошибок. Эти принципы основаны на балансе между рисками, ресурсами и требованиями конкретной экосистемы.

Для корпоративных сетей, где утечка данных может привести к катастрофическим последствиям, приоритетом становится многоуровневая защита. Здесь оптимальна комбинация WPA3 и EAP-TLS, дополненная ABAC для управления доступом. WPA3 обеспечивает современное шифрование и защиту от офлайн-атак, в то время как EAP-TLS, использующий сертификаты, исключает риски, связанные с утечкой паролей. ABAC в такой среде позволяет гибко настраивать политики: например, доступ к финансовым системам может предоставляться только с устройств, подключённых через VPN, и только в рабочее время. Однако такая связка требует значительных инвестиций: развёртывание PKI для EAP-TLS, обновление инфраструктуры для поддержки WPA3 и внедрение систем анализа атрибутов для ABAC. Для среднего бизнеса альтернативой может стать EAP-PEAP с Active Directory-интеграцией – менее безопасный, но более простой в настройке вариант.

Публичные Wi-Fi-сети – зона повышенного риска, где безопасность часто приносится в жертву удобству. В таких сценариях OAuth 2.0 с многофакторной аутентификацией становится компромиссным решением. Например, кафе может предложить гостям вход через Google или Apple ID, что сокращает риски хранения паролей и ускоряет подключение. Для дополнительной защиты стоит ограничить сессию по времени (например, 2 часа) и использовать изоляцию клиентов (Client Isolation), чтобы предотвратить атаки между устройствами в одной сети. Интересный пример – аэропорты, где OAuth 2.0 комбинируют с геолокацией: доступ к Wi-Fi автоматически отключается, когда пользователь покидает зону терминала, что снижает риск удалённых атак.

IoT-сети – пожалуй, самый сложный кейс. Устройства вроде умных датчиков или камер часто неспособны выполнять ресурсоёмкие операции. Здесь на помощь приходят специализированные протоколы, такие как WPA3 Easy Connect, который использует QR-коды или NFC для безопасной передачи ключей без ввода данных пользователем. Для авторизации в IoT-экосистемах эффективен Lightweight ABAC, где политики упрощены до базовых атрибутов (например, «разрешённые IP-адреса» или «временные окна активности»). В умных домах это может выглядеть так: умный замок получает доступ к облаку только при подключении через защищённый канал и только для отправки уведомлений, но не для изменения настроек. Для промышленного IoT, где задержки недопустимы, применяют преаутентификацию – устройство получает временный токен до запуска, сокращая время подключения.

Особняком стоят гибридные сети, объединяющие корпоративные, публичные и IoT-устройства, где сегментация становится эффективным решением. Например, больница может настроить три виртуальных сегмента (VLAN): первый предназначен для медицинского оборудования с использованием WPA3 и EAP-TLS для доступа исключительно к локальным серверам; второй создан для пациентов и гостей, где применяется OAuth 2.0 с перенаправлением на портал и изоляцией от внутренних ресурсов; третий используется для администрации, обеспечивая комбинацию EAP-PEAP и RBAC для доступа к системам управления медицинскими данными (EHR).

Ключевое правило – резервирование. Даже идеальные протоколы, такие как WPA3, требуют альтернативных методов (например, динамических PSK) для критически важных устройств, особенно если обновления невозможны.

Мониторинг и адаптация остаются основой безопасности. Аудит, анализ журналов и тесты на проникновение помогают своевременно устранить уязвимости. Например, частые попытки подбора EAP-PEAP – сигнал к переходу на EAP-TLS или усилению блокировок.

Заключение

Беспроводные сети перестали быть просто каналом передачи данных – они превратились в сложные экосистемы, где пересекаются интересы пользователей, устройств и бизнеса. Современные протоколы аутентификации и авторизации, такие как WPA3, EAP-TLS или ABAC, демонстрируют, что безопасность больше не может быть шаблонной. Каждый протокол решает конкретную задачу: WPA3 закрывает вековые уязвимости Wi-Fi, EAP обеспечивает гибкость для корпоративных сред, а OAuth 2.0 балансирует между удобством и рисками в публичных сетях. Однако их эффективность зависит не только от технического совершенства, но и от контекста, в котором они применяются.

Главный урок, который можно извлечь из эволюции этих стандартов, – безопасность требует постоянной адаптации. Угрозы, которые казались теоретическими пять лет назад (например, атаки на IoT через поддельные точки доступа), сегодня стали повседневной реальностью. При этом прогресс не всегда связан с созданием новых протоколов – иногда достаточно грамотной комбинации существующих решений. Успешные кейсы, будь то умный город или распределённая корпоративная сеть, объединяет одно: многоуровневая защита, где аутентификация, авторизация и шифрование работают как части единого механизма.

Однако даже самые совершенные технологии бессильны перед двумя вызовами: человеческим фактором и инерцией внедрения. Пользователи, использующие одинаковые пароли для рабочей и домашней сети, или компании, откладывающие переход на WPA3 из-за стоимости обновления, создают риски, которые не устранить на уровне протоколов. Это подчеркивает необходимость не только технологических, но и организационных изменений – от обучения сотрудников до пересмотра регуляторных требований.

Перспективы развития протоколов видятся в двух направлениях. Первое – упрощение без потери безопасности. Примеры вроде WPA3 Easy Connect или интеграции OAuth с биометрией показывают, что удобство и защита не всегда взаимоисключающи. Второе – адаптивность. Машинное обучение и анализ поведения уже начинают использоваться для динамического изменения политик доступа, и в будущем это может стать стандартом. Например, сеть, которая автоматически ужесточает аутентификацию при обнаружении подозрительной активности, или IoT-устройство, временно блокирующееся при отклонении от типичного сценария использования.

В конечном итоге, безопасность беспроводных сетей – это не конечная цель, а непрерывный процесс. Технологии будут меняться, угрозы – эволюционировать, но принцип останется неизменным: защита должна быть не сложнее, чем сама атака. Только тогда у злоумышленников не останется шансов.

MODERN AUTHENTICATION AND AUTHORIZATION PROTOCOLS IN WIRELESS NETWORKS

E.V. BEGLIAK, U.A. MARTSINKEVICH

Abstract. The article analyzes modern authentication and authorization protocols in wireless networks, focusing on their security, efficiency, and applicability in various scenarios. Key standards such as WPA3, EAP, OAuth 2.0, OpenID Connect, as well as access control methods (RBAC, ABAC, SAML), are examined. A comparative analysis of protocols is conducted based on their resilience to cyberattacks, performance, and ease of implementation. The study identifies critical challenges, including vulnerabilities in legacy systems and integration complexity in heterogeneous networks. Recommendations are provided for selecting protocols for corporate networks, public Wi-Fi, and IoT devices. The review highlights the need to adapt existing security protocols and develop new solutions to effectively counter modern cyber threats.

Keywords: authentication, authorization, wireless networks, WPA3, EAP, OAuth 2.0, cybersecurity, access control, RBAC, ABAC, SAML, IoT.

Список литературы

1. Global Threat Landscape Report. A Semiannual Report by FortiGuard Labs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fortinet.com/content/dam/fortinet/assets/threat-reports/threat-report-1h-2023.pdf>. – Дата доступа: 22.03.2025.
2. Security. Wi-Fi Alliance. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/security>. – Дата доступа: 25.03.2025.
3. Hu Vincent C., Ferraiolo D. // Guide to Attribute Based Access Control (ABAC). NIST. Computer security. 2014. P. 5-6.
4. Avast Q4/2023 Threat Report - Avast Threat Labs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://decoded.avast.io/threatresearch/avast-q4-2023-threat-report/>. – Дата доступа: 24.03.2025.
5. Chinese Standard GB/T; GBT; GB; YY/T; QC/T [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.chinesestandard.net/>. – Дата доступа: 20.03.2025.
6. 8 Scary Statistics about the Password Reuse Problem [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.enzoic.com/blog/8-stats-on-password-reuse/>. – Дата доступа: 20.03.2025.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРИ ИХ ОБРАБОТКЕ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХА.М. ТИМОФЕЕВ¹, М.А. ТАВГЕНЬ², А.С. ЯНКОВЕЦ²

1 – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь,
2 – Национальный детский технопарк, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 1 апреля 2025

Аннотация. Разработана структурная схема генерации идентификаторов, построенная на базе симметричного блочного стандарта ГОСТ 28147-89. Применение этого стандарта является обязательным для всех организаций и предприятий Республики Беларусь, осуществляющих криптографическую защиту информации. В предложенной схеме секретными параметрами являются ключ шифрования данных длиной 256 бит и 8 узлов замены, содержащихся в блоке подстановки. Шифротексты, полученные с помощью ГОСТ 28147-89, использованы в качестве псевдослучайной величины. Разработана структурная схема деобезличивания персональных данных, которая, как и схема обезличивания персональных данных, построена на базе ГОСТ 28147-89. Это позволило выполнить процедуру деобезличивания аналогичным образом, как и процедуру обезличивания, что упростило реализацию разработанных схем, в сравнении с существующими.

Ключевые слова: информационные системы, персональные данные, обезличивание персональных данных, методы обезличивания персональных данных, метод введения идентификаторов.

Введение

В настоящее время одной из важнейших задач, решаемых при проектировании современных информационных систем, является обеспечение информационной безопасности персональных данных [1–3].

Под персональными данными будем понимать любую информацию, относящуюся к идентифицированному физическому лицу или физическому лицу, которое может быть идентифицировано [4].

Отметим, что для этого целесообразно выполнять обезличивание и деобезличивание любых персональных данных, за исключением общедоступных персональных данных [5].

В соответствии с требованиями законодательства Республики Беларусь одним из методов обезличивания персональных данных является метод введения идентификаторов. Сущность реализации данного метода заключается в том, что персональные данные, позволяющие идентифицировать субъекта персональных данных, заменяют их идентификаторами с последующим созданием таблицы соответствия.

Известные способы реализации обезличивания персональных данных на основе метода введения идентификаторов [6–9] подразумевают использование в качестве идентификаторов хэшированных значений персональных данных. Это не позволяет деобезличить персональные данные без знания таблиц соответствия, что является недостатком способов [6–9]. В связи с этим целью данной работы являлось разработать структурные схемы обезличивания и деобезличивания персональных данных на основе метода введения идентификаторов.

В качестве объекта исследования использован стандарт шифрования данных ГОСТ 28147-89. Данный стандарт выбран в качестве объекта исследования, поскольку он является одним из обязательных алгоритмов криптографического преобразования данных для

всех организаций и предприятий Республики Беларусь в соответствии с требованиями Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь [5].

Предметом исследования являлось установить криптографические операции, позволяющие выполнить обезличивание и деобезличивание персональных данных на основе метода введения идентификаторов, которые не требуют обязательного использования таблиц соответствия.

Реализация метода введения идентификатора

На рис. 1 показаны структурные схемы, реализующие процедуры вычисления идентификаторов и персональных данных.

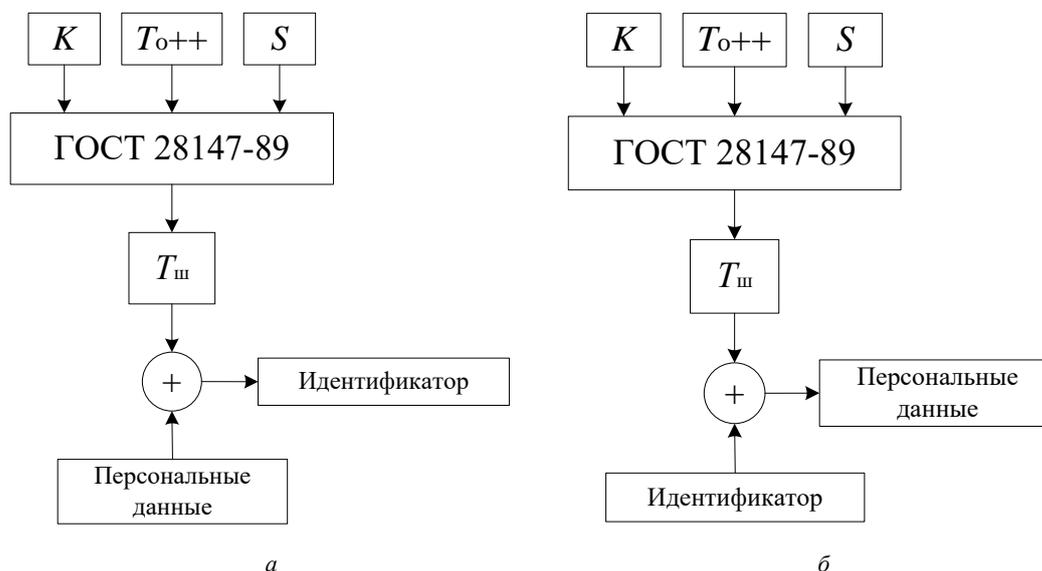


Рис. 1. Структурные схемы: *a* – процедуры вычисления идентификаторов; *б* – процедуры вычисления персональных данных

Схема деобезличивания персональных данных функционирует схожим образом, как и схема обезличивания, за исключением следующего. В процессе деобезличивания на первый вход блока ГОСТ 28147-89 подаются ранее сформированные секретный криптографический ключ K и узлы подстановки S , а на второй вход – блоки открытого текста T_o , которые были использованы при обезличивании. На выходе блока ГОСТ 28147-89 формируются шифротексты $T_{ш}$, которые используются в качестве псевдослучайных последовательностей. Далее выполняют сложение по модулю 2 блоков шифротекстов $T_{ш}$ и идентификаторов, что позволяет восстановить исходные персональные данные. Процесс повторяется до тех пор, пока не будут обработаны все блоки идентификаторов.

Важно отметить, что схема деобезличивания персональных данных, предложенная в настоящей работе, не требует использования таблиц соответствия, что выгодно отличает данную схему, по сравнению с существующими [6–9].

Заключение

При реализации метода введения идентификаторов чрезвычайно важно применять алгоритмы и математические вычисления, которые позволят не только преобразовывать персональные данные к виду идентификаторов (обезличивать их), но и вычислительно выполнить обратную процедуру, т.е. на основе идентификаторов рассчитывать персональные данные.

В рамках выполненных исследований разработана структурная схема генерации идентификаторов, построенная на базе симметричного блочного стандарта ГОСТ 28147-89. Применение этого стандарта является обязательным для всех организаций и предприятий Республики Беларусь, осуществляющих криптографическую защиту информации.

В предложенной схеме секретными параметрами являются ключ шифрования данных длиной 256 бит и 8 узлов замены, содержащихся в блоке подстановки. Шифротексты использованы в качестве псевдослучайной величины.

Разработана структурная схема деобезличивания персональных данных, которая, как и схема обезличивания персональных данных, построена на базе ГОСТ 28147-89. Это позволило выполнить процедуру деобезличивания аналогичным образом, как и процедуру обезличивания. Таким образом, реализовав программное обеспечение для обезличивания персональных данных, появляется возможность использовать это же программное обеспечение для деобезличивания персональных данных, что упрощает практическую реализацию схем обезличивания и деобезличивания персональных данных.

ENSURING INFORMATION SECURITY OF PERSONAL DATA WHEN PROCESSING THEM IN INFORMATION SYSTEMS

A.M. TIMOFEEV, M.A. TAVGEN, A.S. YANKOVETS

Abstract. A block diagram of identifier generation based on the symmetric block standard GOST 28147-89 has been developed. The application of this standard is mandatory for all organizations and enterprises of the Republic of Belarus engaged in cryptographic protection of information. In the proposed scheme, the secret parameters are a 256-bit data encryption key and 8 replacement nodes contained in the substitution block; ciphertexts are used as a pseudorandom value. A structural scheme of depersonalization of personal data has been developed, which, like the scheme of depersonalization of personal data, is based on GOST 28147-89. This made it possible to perform the depersonalization procedure in the same way as the depersonalization procedure.

Keywords: information systems, personal data, depersonalization of personal data, methods of depersonalization of personal data, method of introducing identifiers.

Список литературы

1. Ворона В.А. Биометрическая идентификация личности. М., 2023.
2. Коллинз М. Защита сетей. Подход на основе анализа данных. М., 2020.
3. Остапенко Г.А. Информационные операции и атаки в социотехнических системах: организационно-правовые аспекты противодействия. М., 2020.
4. Закон Республики Беларусь от 7 мая 2021 г. № 99-З «О защите персональных данных» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H12100099>. – Дата доступа: 28.02.2025 г.
5. Приказ Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь от 10 декабря 2024 г. № 259 «Об изменении приказов Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь от 28 марта 2014 г. № 26 и от 20 февраля 2020 г. № 66» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.oac.gov.by/public/content/files/files/law/prikaz-oac/2024%20-%20259.pdf>. – Дата доступа: 28.02.2025 г.
6. Raghunathan, S. The Complete Book of Data Anonymization: From Planning to Implementation. CRC Press, 2013.
7. Ali, J., Dyo, V. Practical Hash-based Anonymity for MAC Addresses [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2005.06580>. – Дата доступа: 28.02.2025 г.
8. Determe J.-F., Azzagnuni S., Horlin F., De Doncker P. MAC Address Anonymization for Crowd Counting [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2009.09876>. – Дата доступа: 28.02.2025 г.
9. European Data Protection Supervisor. Introduction to the Hash Function as a Personal Data Pseudonymisation Technique [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.edps.europa.eu/sites/default/files/publication/19-10-30_aepd-edps_paper_hash_final_en.pdf, свободный. – Дата доступа: 28.02.2025 г.

UDC 004.021

RESEARCH ON DEPTH ESTIMATION FOR MONOCULAR CAMERAS BASED ON PRIOR INFORMATION

QICHENG GUO

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus**Received April 1, 2025*

Abstract. This study presents a monocular camera-based depth estimation method that estimates the distance between a vehicle and the camera using the camera's intrinsic parameters, distortion correction, and the size of the object in the camera's image. The method involves detecting a red rectangular tag with a known size positioned behind the vehicle, calculating its image width, and then using the camera's focal length and the tag's actual dimensions to estimate the depth. This approach does not rely on additional hardware sensors but achieves accurate distance estimation through image processing techniques, providing a potential solution for low-cost depth estimation. Experimental results demonstrate that the method is both accurate and computationally efficient, making it suitable for practical applications.

Keywords: depth estimation; monocular camera, image processing, distortion correction, label recognition.

Introduction

Depth estimation represents a critical research direction in computer vision and robotics. Depth information finds extensive applications in autonomous driving, robotic navigation, augmented reality, and related technologies. However, traditional depth acquisition methods such as LiDAR and stereo camera systems often involve high costs and complex installations. Monocular cameras, as cost-effective and widely available devices, have emerged as vital tools for depth estimation with advancements in image processing techniques. Monocular-based depth estimation approaches not only significantly reduce hardware costs but also simplify system architectures.

Existing monocular depth estimation methods can be broadly categorized into two classes: deep learning-based approaches and traditional geometry-modeling methods utilizing camera calibration. Deep learning methods typically employ trained neural networks to automatically extract image features and directly predict depth maps. Nevertheless, these approaches require substantial annotated training data and demand high computational resources, making them challenging to meet real-time requirements [1]. In contrast, traditional methods estimate depth by combining camera intrinsics with physical models, deriving depth from object dimensions in images [2]. This paper proposes a depth estimation method based on known dimensional markers. By detecting red rectangular tags in images and integrating the camera's focal length with the tag's physical dimensions, the proposed approach enables effective depth estimation for mobile vehicles.

Related work

Depth estimation has become a research focus in computer vision. Early methods primarily relied on multi-sensor systems such as stereo vision and LiDAR, which required additional hardware support and suffered from complex system architectures and high costs. To reduce costs, many studies have begun exploring monocular camera-based depth estimation approaches.

Monocular depth estimation methods can be broadly categorized into geometry-based and learning-based approaches. Geometry-based methods utilize camera models and assume relationships between object dimensions in images and their actual depths [3]. Zhang et al. [4] proposed a technique

that calculates depth using camera intrinsic parameters obtained through calibration and known object dimensions. Similarly, Chen et al. [5] developed a method to estimate depth by analyzing variations in object width within images, leveraging known object dimensions and camera focal length.

With advancements in deep learning, an increasing number of Convolutional Neural Network (CNN)-based methods have emerged for monocular depth estimation in recent years. Lee et al. [6] demonstrated promising results using deep learning networks to extract depth information from monocular images. Although these approaches can achieve high accuracy in specific applications, they typically require large-scale annotated datasets, substantial computational resources, and lengthy training processes.

This study integrates geometric models with image processing techniques, utilizing camera intrinsic parameters and known object dimensions in images for depth estimation. The proposed method eliminates dependence on deep learning networks, features lower computational overhead, enables real-time processing, and achieves high accuracy under specific operational constraints.

Methodology

The core concept of this approach lies in depth estimation through establishing the relationship between known object dimensions (specifically the width of the red rectangular tag) and their corresponding imaging dimensions in the captured image. Based on camera calibration where the intrinsic parameters and distortion coefficients are predetermined, we derive the distance using the following geometric model. Let f denote the camera focal length, W represent the physical width of the tag, and w indicate the imaged width in pixels. The depth D of the object can then be calculated using the formula

$$D = \frac{f \cdot W}{w} . \quad (1)$$

1. Camera calibration and Distortion Correction.

Camera calibration serves as the foundation for depth estimation methods based on intrinsic camera parameters. The calibration results comprise the intrinsic matrix (K) and distortion coefficients ($distCoeffs$). The intrinsic matrix typically contains information such as focal length and principal point coordinates, while the distortion coefficients are used to correct radial and tangential distortions caused by the lens. Prior to image processing, distortion correction is first performed using the calibration results to eliminate lens-induced artifacts. The `cv2.undistort` function in OpenCV is employed to implement image distortion correction.

2. Camera calibration and Distortion Correction.

Red markers in images are detected through color space conversion. The image is converted from BGR color space to HSV color space, where predefined HSV thresholds are applied to extract red regions. Morphological operations are subsequently performed to remove noise, followed by contour detection to identify marker positions and dimensions. The marker width (w) is obtained by calculating the bounding rectangle of the detected contours. Once the marker width is determined, the depth can be computed using the camera intrinsic parameters and the physical width of the marker through the aforementioned formula.

Experiments and results

To validate the effectiveness of the proposed method, we constructed an image dataset containing vehicles and red markers for experimental verification, as illustrated in Fig. 1. Each vehicle in the images is affixed with a red rectangular marker of known dimensions (3 cm edge length) on its rear. The camera's intrinsic parameters and distortion coefficients were obtained through calibration tools.

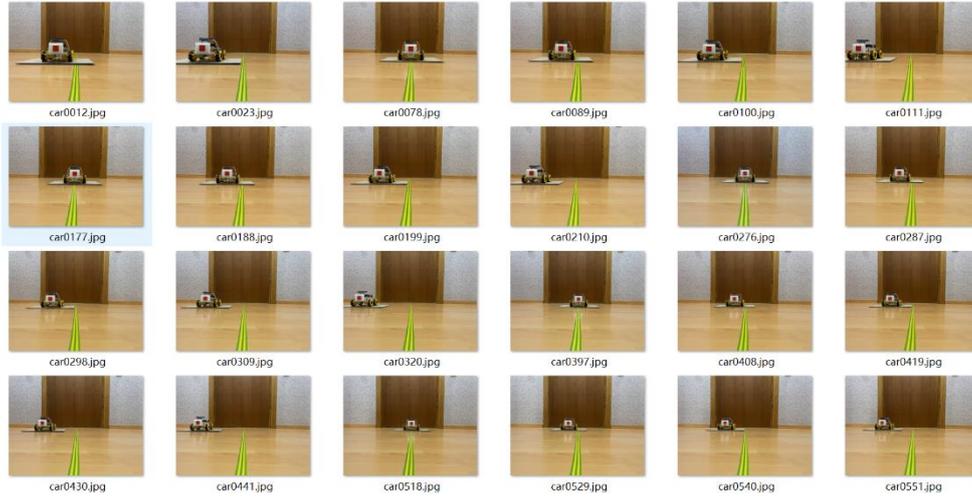


Figure 1. Image dataset

Table 1 presents the depth estimation results for the images.

Table 1. Depth calculation results

Image Number	Calculating Depth (m)	Actual Depth (m)	Error (%)
car0001	0,4994	0,5	0,12
car0002	0,4967		0,66
car0003	0,4914		1,72
car0004	0,6006	0,6	0,1
car0005	0,5967		0,55
car0006	0,5816		3,07
car0007	0,5638		6,03
car0008	0,7015	0,7	0,21
car0009	0,6909		1,3
car0010	0,6757		3,47
car0011	0,6611		5,56
car0012	0,8061	0,8	0,76
car0013	0,7991		0,11
car0014	0,7854		1,83
car0015	0,7922		0,98
car0016	0,7595		5,06
car0017	0,9098	0,9	1,09
car0018	0,9098		1,09
car0019	0,8922		0,87
car0020	0,8922		0,87
car0021	0,8752		2,76
car0022	0,9989	1,0	0,11
car0023	1,0098		0,98
car0024	0,9989		0,11
car0025	0,9989		0,11
car0026	0,9776		2,24
car0027	0,9572		4,28

The experimental results demonstrate that the red marker-based depth estimation method can accurately determine the distance between the vehicle and the camera. As shown in Table 1, the minor discrepancies between calculated and actual depths confirm the effectiveness and high precision of this approach. The primary sources of estimation errors were identified as positioning inaccuracies of markers in captured images and residual errors from distortion correction. Extensive image testing revealed a root mean square error (RMSE) of 0,02 meters, indicating superior measurement accuracy for practical applications.

Conclusion

This paper proposes a monocular camera-based depth estimation method that utilizes red rectangular tags with known dimensions to measure the distance between the camera and the target

vehicle. Experimental results demonstrate that the proposed approach achieves computational efficiency and high accuracy, fulfilling the requirements for real-time depth estimation. Future research may focus on enhancing the robustness of tag detection algorithms in complex environments.

References

1. Masoumian, A., Rashwan, H. A., Cristiano, J., Asif, M. S., & Puig, D. Monocular Depth Estimation Using Deep Learning: A Review. *Sensors*. 2022. 22(14), P. 5353
2. Zhang, M., Liu, Z., & Xie, S. Monocular Depth Estimation Using Geometry-Based Approach with Object Size and Camera Calibration. *IEEE Transactions on Robotics*. 2021. 39(4), P. 1023–1037.
3. Liu, L., Guo, Z., & Liu, C. Monocular Depth Estimation from Single Images Using Geometry-Based Methods. *International Journal of Computer Vision*. 2021. 120(3), P. 489–503.
4. Zhang, Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2000. 22(11), P. 1330–1334.
5. Chen, Z., Wang, J., & Li, F. Geometric-based Monocular Depth Estimation with Camera Calibration and Object Size Constraints. *International Journal of Computer Vision*. 2020. 128(2), P. 345–360.
6. Lee, Y., & Kim, J. Monocular Depth Estimation Using Convolutional Neural Networks. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2019. 28(10), P. 4902–4913.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОБИЛЬНЫХ СЕТЕЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ В ИНТЕРНЕТЕ ВЕЩЕЙ

В.А. КРАГЕЛЬ, М.В. РОМАНЮК

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 21 марта 2025

Аннотация. Рассматриваются ключевые аспекты развития Интернета вещей в контексте мобильных сетей нового поколения. Анализируются их преимущества, проблемы внедрения и возможные направления дальнейшего совершенствования.

Ключевые слова: интернет вещей, мобильные сети, передача данных, искусственный интеллект.

Введение

Современные технологии Интернета вещей (IoT) стремительно развиваются, находя применение в различных сферах деятельности. В промышленности сенсоры и контроллеры обеспечивают мониторинг оборудования и оптимизацию производственных процессов. В городской инфраструктуре решения IoT помогают управлять освещением, отслеживать движение общественного транспорта и предоставлять информацию о дорожной ситуации, а также контролировать экологическую обстановку. В медицине носимые устройства позволяют в реальном времени следить за жизненными показателями пациентов, а в повседневной жизни все большую популярность приобретают умные дома с голосовыми помощниками и автоматизированными системами безопасности [1].

Широкое распространение IoT требует эффективной передачи и обработки данных, что, в свою очередь, предъявляет высокие требования к сетевой инфраструктуре. Для обеспечения стабильной работы миллионов подключенных устройств необходимы технологии, обеспечивающие высокую скорость передачи информации, минимальные задержки и поддержку большого количества одновременных соединений. Именно поэтому развитие Интернета вещей неразрывно связано с эволюцией мобильных сетей, в частности, с внедрением пятого (5G) и перспективного шестого (6G) поколений, открывающих новые возможности для IoT. В связи с этим актуальным является изучение ключевых аспектов развития Интернета вещей в контексте мобильных сетей нового поколения, их преимуществ, проблем внедрения и возможных направлений совершенствования.

Обзор технологий Интернета вещей

Интернет вещей представляет собой концепцию, в рамках которой физические устройства, оснащенные датчиками, микроконтроллерами и средствами связи, взаимодействуют друг с другом и с облачными платформами. Основной принцип IoT заключается в сборе, передаче и анализе данных с целью автоматизации процессов и повышения эффективности работы различных систем. Сети IoT включают широкий спектр технологий, таких как LPWAN (Low-Power Wide-Area Network), Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, и сотовые сети, каждая из которых имеет свои преимущества и ограничения. Например, LPWAN отличается низким энергопотреблением и большой зоной покрытия, но имеет ограниченную пропускную способность, в то время как Wi-Fi обеспечивает высокую скорость передачи данных, но требует значительных энергозатрат. Сравнение трех наиболее используемых технологий приведено в табл. 1.

Табл. 1. Сравнение сетей Интернета вещей

Параметр	LPWAN	Wi-Fi	Мобильная сеть
Диапазон	Очень широкий (до нескольких километров)	Ограниченный (до нескольких сотен метров)	Широкий (до десятков километров)
Скорость передачи данных	Низкая (до 100 Кбит/с для некоторых технологий)	Средняя (до 1–10 Гбит/с для последних стандартов)	Высокая (до 1 Гбит/с для 4G, до 10 Гбит/с для 5G)
Энергопотребление	Очень низкое (оптимизировано для длительной работы от батарей)	Среднее (необходима постоянная энергия для работы)	Среднее (в зависимости от технологии)
Количество устройств	Очень большое количество устройств на одной ячейке сети	Ограниченное количество устройств на точке доступа	Поддержка миллионов устройств (особенно 5G)
Задержка	Очень высокая (от 1 до 10 секунд)	Низкая (до нескольких миллисекунд)	Средняя (меньше для 5G, до нескольких миллисекунд)
Применение	Работа в удаленных местах	Домашняя и офисная сети	Мобильный интернет, автономные транспортные системы
Тип соединения	Не требует постоянного подключения, связь по мере необходимости	Постоянное соединение, высокоскоростная передача данных	Постоянное подключение, высокая мобильность
Стоимость	Обычно дешевле для устройств (низкая стоимость подключения)	Стоимость установки может быть высокой для крупных объектов	Высокая стоимость для пользователей (плата за мобильный трафик)

Главной целью Интернета вещей является повышение уровня автоматизации процессов, минимизация человеческого участия в рутинных задачах и оптимизация использования ресурсов. В промышленности (Industrial IoT) использование интеллектуальных датчиков и контроллеров позволяет отслеживать работу оборудования в реальном времени. Так, датчики вибрации на производственных линиях могут фиксировать аномалии в работе машин, предсказывая поломки до того, как они произойдут.

В сельском хозяйстве устройства Интернета вещей широко применяются для оптимизации процессов производства. Датчики, установленные в почве, могут измерять температуру, влажность, уровень питательных веществ, что позволяет автоматизировать полив и удобрение растений. Умные устройства для мониторинга состояния животных с помощью чипов и датчиков активности дают фермерам возможность отслеживать здоровье и поведение скота.

В здравоохранении используются умные браслеты и мониторы для наблюдения за сердечным ритмом, артериальным давлением и уровнем кислорода в крови. Эти устройства собирают данные в реальном времени и отправляют их медицинским специалистам для быстрого реагирования. Например, умные ингаляторы могут отслеживать использование лекарств астматиками и автоматически сообщать врачу о нарушениях в режиме их применения.

В транспорте технологии IoT находят применение для создания умных транспортных систем, включая оптимизацию движения и повышение безопасности на дорогах. Интеллектуальные системы управления трафиком собирают данные о плотности движения, прогнозируют пробки, позволяя перенаправлять транспорт в обход загруженных участков. Автономные транспортные средства используют датчики для мониторинга дорожной обстановки в реальном времени, а системы отслеживания грузов позволяют отслеживать местоположение и состояние товаров, что повышает эффективность логистики. Распространенный случай использования технологий IoT – отслеживание состояния шин и предупреждения водителей о необходимости технического обслуживания.

Одной из ключевых тенденций в развитии Интернета вещей является интеграция технологий искусственного интеллекта (ИИ). Благодаря машинному обучению и анализу больших данных такие устройства могут не только собирать информацию, но и прогнозировать будущие события, адаптироваться к изменяющимся условиям и принимать автономные решения. Например, в сфере безопасности камеры с ИИ могут распознавать потенциальные угрозы и реагировать на них без участия человека. В промышленности алгоритмы машинного

обучения анализируют данные с датчиков и позволяют оптимизировать производственные процессы, снижая затраты и повышая производительность.

Несмотря на очевидные преимущества IoT, существуют и определенные ограничения в его применении. Одной из главных проблем является безопасность данных, поскольку большое количество подключенных устройств увеличивает уязвимость сетей перед кибератаками [2]. Кроме того, высокая зависимость IoT от стабильного интернет-соединения делает необходимым развитие мощной инфраструктуры связи. Решение этих проблем требует использования современных методов защиты информации, таких как сквозное шифрование данных и аутентификация устройств. С учетом этих аспектов становится очевидным, что дальнейшее развитие IoT невозможно без совершенствования сетевых технологий, что делает мобильные сети нового поколения важным фактором его эволюции.

Мобильные сети нового поколения

Разница между 4G и 5G заключается в нескольких ключевых аспектах, касающихся скорости передачи данных, архитектуры сети, пропускной способности, времени отклика и способности работать с большим количеством устройств.

В 4G максимальная скорость передачи данных достигает около 1 Гбит/с для скачивания и 100 Мбит/с для загрузки. Эти скорости вполне достаточны для большинства современных приложений, таких как потоковая передача видео или загрузка веб-страниц, однако они не соответствуют требованиям задач, где требуется передача больших объемов данных или высокая пропускная способность. В 5G скорость передачи данных значительно выше, достигая 10 Гбит/с, что в значительной степени обеспечивается за счет применения технологий MIMO (Multiple Input, Multiple Output) и Massive MIMO [3].

MIMO – это технология, использующая несколько антенн на передающей и принимающей сторонах для увеличения производительности системы без использования дополнительных частотных ресурсов. С помощью этой технологии возможно одновременно передавать несколько независимых потоков данных, что значительно увеличивает общую пропускную способность канала. В четвертом поколении MIMO уже применяется, но ограничивается относительно небольшим количеством антенн, обычно до восьми. Massive MIMO, в свою очередь, является усовершенствованной версией MIMO, которая использует от восьми до нескольких сотен антенн, что схематично отображено на рис. 1.

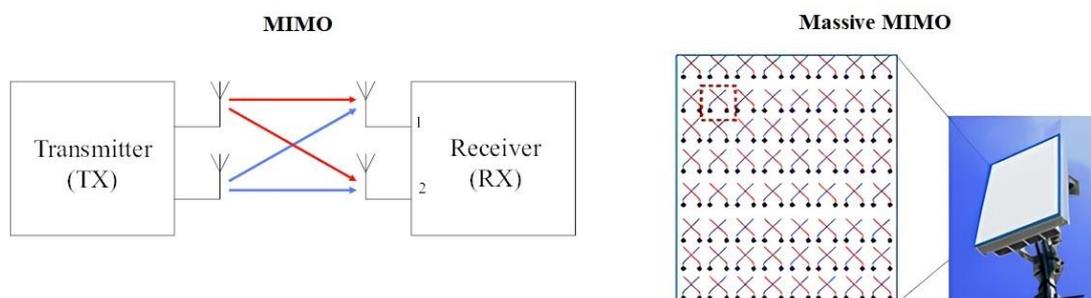


Рис. 1. Схема работы MIMO и Massive MIMO

Задержка в 4G составляет около 30–50 миллисекунд, что является приемлемым для большинства приложений, однако для некоторых критически важных технологий, таких как автономные автомобили или дистанционное управление роботами, требуется значительно меньшая задержка. В 5G задержка снижается до 1 миллисекунды или даже ниже, что обеспечивает практически мгновенный отклик, что крайне важно для приложений, где скорость реакции имеет решающее значение.

Пропускная способность и плотность подключений также значительно увеличиваются в 5G по сравнению с 4G. Сети четвертого поколения способны поддерживать несколько тысяч устройств на квадратный километр, в то время как 5G может обслуживать до 1 миллиона устройств на квадратный километр, что критично для сценариев массового подключения устройств. Кроме того, пятое поколение использует гораздо более широкий спектр частот, от 24

до 100 ГГц, что позволяет увеличить пропускную способность сети и оптимизировать работу в условиях высокой плотности устройств. В сравнении с 4G, которое использует частотные диапазоны от 700 МГц до 2,5 ГГц, 5G обеспечивает более высокие скорости передачи данных и показывает лучшую производительность в условиях густонаселенных городов.

Перспективы 6G связаны с улучшениями в тех же областях, что и предыдущие поколения. Ожидается, что сети 6G будут использовать терагерцевый и субтерагерцевый диапазоны частот, что позволит значительно расширить спектральные возможности и обеспечить более высокую пропускную способность по сравнению с 5G. Прогнозируется, что скорость передачи данных в сетях 6G будет варьироваться от 100 Гбит/с до 1 Тбит/с, что позволит передавать огромные объемы информации в реальном времени и поддерживать новые высокопроизводительные приложения.

Одной из ключевых задач для шестого поколения является достижение существенно меньшей задержки при передаче данных. Планируется, что уровень задержки сможет опускаться до микросекунд (около 0,1 мс), что значительно превосходит показатели сетей 5G и откроет новые возможности для критически важных систем связи, дистанционного управления и приложений, требующих мгновенного отклика.

Кроме того, обеспечение высокой энергоэффективности остаётся приоритетной задачей для 6G, особенно в условиях увеличения числа подключенных устройств и роста объемов передаваемых данных. Для эффективного управления сложной инфраструктурой сетей 6G предполагается использование систем искусственного интеллекта, способных оптимизировать распределение ресурсов, управлять трафиком и проводить предиктивное обслуживание сети.

Анализ развития Интернета вещей

Переход к мобильным сетям пятого поколения является важным этапом в развитии Интернета вещей, обеспечивая существенные преимущества в скорости передачи данных, надежности соединений и плотности подключений. В отличие от предыдущих поколений, 5G предлагает значительно меньшую задержку и высокую пропускную способность, что делает возможным мгновенный обмен данными между устройствами Интернета вещей, особенно в критически важных системах, таких как автономный транспорт и промышленная автоматизация.

Одним из преимуществ внедрения 5G в IoT является поддержка массовой связи между устройствами (Massive Machine-Type Communications, mMTC). Эта технология позволяет подключать миллионы датчиков и интеллектуальных устройств, что можно использовать в городской инфраструктуре, логистике и сельском хозяйстве. Например, в городах сети 5G могут обеспечить эффективное управление дорожным движением и интеллектуальное распределение энергоресурсов, что приведет к снижению затрат и повышению качества жизни [4]. В сфере логистики это способствует оптимизации цепочек поставок, обеспечивая точное отслеживание грузов в реальном времени, автоматизацию складских процессов и эффективное управление транспортными средствами, что снижает издержки и повышает скорость доставки.

Кроме влияния на инфокоммуникационные технологии, развитие IoT на базе 5G окажет воздействие на экономику и социальную сферу. Улучшение связи позволит расширить телемедицинские услуги, повысить качество дистанционного образования. В промышленности повышение скорости передачи данных и надежности соединений приведет к ускоренной цифровизации производств и внедрению концепции «умных фабрик», требующих применения IoT, искусственного интеллекта, автоматизированных систем управления и облачных технологий.

Однако переход к новым поколениям мобильных сетей сопряжен и с рядом проблем. Основной из них является необходимость значительных инвестиций в модернизацию сетевой инфраструктуры, включая установку новых базовых станций и разработку совместимых устройств. Кроме того, увеличение числа подключенных устройств создает дополнительные риски для кибербезопасности, требуя внедрения новых стандартов защиты данных. Высокие энергозатраты устройств, работающих в сетях 5G, также представляют проблему, особенно в случаях, когда требуется долговременная автономная работа датчиков и сенсоров.

Заключение

Мобильные сети пятого поколения оказывают значительное влияние на развитие Интернета вещей, предоставляя более эффективные и надежные механизмы передачи данных. Их внедрение позволяет значительно расширить функциональные возможности IoT-устройств, повышает уровень автоматизации процессов и обеспечивает мгновенный обмен информацией в реальном времени. Однако дальнейшее развитие этих технологий требует решения ряда технических и экономических проблем, включая модернизацию инфраструктуры, снижение энергопотребления и повышение уровня безопасности данных. В ближайшие годы ключевыми направлениями исследований станут разработка более энергоэффективных решений, усиление защиты сетевых соединений и интеграция Интернета вещей с искусственным интеллектом для создания более интеллектуальных и автономных систем.

THE PROSPECTS FOR NEXT-GENERATION CELLULAR NETWORKS IN THE INTERNET OF THINGS

V.A. KRAGEL, M.V. ROMANYUK

Abstract. Key aspects of the development of the Internet of Things in the context of next-generation mobile networks are explored. Their advantages, problems of implementation and possible directions of further improvement are analyzed.

Keywords: Internet of Things, mobile networks, data transmission, artificial intelligence.

Список литературы

1. Довгаль, В. А. Интернет Вещей: концепция, приложения и задачи / В. А. Довгаль, Д. В. Довгаль // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2018. – № 1. – С. 129–135.
2. Ли, П. Архитектура интернета вещей / пер. с англ. М. А. Райтмана. – М. : ДМК Пресс, 2019. – 454 с.
3. Кокорева, Е. В. Сравнительная характеристика систем мобильной связи четвертого и пятого поколения / Е. В. Кокорева // Экономика и качество систем связи. – 2022. – № 3. – С. 37–44.
4. Баланов, А. Н. IoT-решения: принципы, примеры, перспективы: учебное пособие для вузов / А. Н. Баланов. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 280 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

1. Барсукевич Сергей Николаевич – инженер-программист, центр информатизации и инновационных разработок
2. Бегляк Екатерина Валерьевна – инженер – программист первой категории отдела сетевых технологий Центра информатизации и инновационных разработок БГУИР, ассистент кафедры вычислительных методов и программирования БГУИР, магистрант кафедры проектирования информационно-компьютерных систем.
3. Богуш Рихард Петрович – д.т.н., доцент, заведующий кафедрой вычислительных систем и сетей Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой
4. Вабищевич Алесья Сергеевна – студент кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
5. Ван Вэньци – студент кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
6. Васютич Андрей Дмитриевич – студент кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР, техник-конструктор ОАО «Пеленг»
7. Вергель Илья Вадимович – студент кафедры программного обеспечения информационных технологий БГУИР
8. Вишняков Владимир Анатольевич – д.т.н., профессор кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
9. Восковцева Кристина Рахимовна – учащаяся учреждения образования «Национальный детский технопарк» по направлению «Информационная безопасность»
10. Го Цичэн – аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
11. Давыдова Надежда Сергеевна – к.т.н., доцент кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
12. Дань Цзыфэн – студент кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
13. Дробот Сергей Викторович – к.т.н., доцент, декан факультета информационной безопасности БГУИР

14. Зорько Михаил Иванович – ассистент кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
15. Игнатьева Светлана Александровна – старший преподаватель кафедры вычислительных систем и сетей Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой
16. Кацко Мария Олеговна – магистрант кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
17. Клиндухов Ярослав Алексеевич – учащийся учреждения образования «Национальный детский технопарк» по направлению «Информационная безопасность»
18. Кобяк Игорь Петрович – доцент кафедры электронных вычислительных машин БГУИР
19. Кострицкий Виталий Владимирович – старший преподаватель кафедры автомобильного транспорта Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой
20. Крагель Вадим Александрович – студент кафедры программного обеспечения информационных технологий БГУИР
21. Краснопрошин Виктор Владимирович – д.т.н., профессор кафедры информационных систем управления БГУ
22. Курилович Андрей Владимирович – старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
23. Левоненко Иван Игоревич – студент факультета информационной безопасности БГУИР, техник-конструктор ОАО «Пеленг»
24. Ли Хао – аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
25. Литвинов Сергей Владимирович – зам. директора ООО «ЮВР»
26. Ловецкий Михаил Юрьевич – ассистент кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
27. Лю Цзяхань – студент кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
28. Ма Цзюнь – ассистент кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
29. Макейчик Екатерина Геннадьевна – старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР

30. Максак Максим Юрьевич – магистрант кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
31. Марков Алексей Николаевич – м.т.н., старший преподаватель кафедры информатики БГУИР
32. Марцинкевич Владислав Антонович – ведущий инженер – электроник отдела сетевых технологий Центра информатизации и инновационных разработок БГУИР, ассистент кафедры электронных вычислительных машин БГУИР, магистрант кафедры инфокоммуникационных технологий.
33. Мигалевич Сергей Александрович – м. т. н., старший преподаватель кафедры информатики БГУИР
34. Мишепуд Владислав Юрьевич – студент факультета информационных технологий и управления БГУИР
35. Нгуен Ван Бась – аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
36. Нестеренков Сергей Николаевич – к.т.н., доцент кафедры программного обеспечения информационных технологий
37. Полуян Татьяна Владимировна – аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
38. Прудник Александр Михайлович – к.т.н., доц. кафедры инженерной психологии и эргономики БГУИР
39. Пъае Пъио Хлайнг – магистрант кафедры информационных радитехнологий БГУИР
40. Робачевский Александр Дмитриевич – студент факультета информационной безопасности БГУИР
41. Романюк Максим Валерьевич – магистр, ассистент кафедры информатики
42. Рощупкин Яков Викторович – старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
43. Русакович Владимир Николаевич – старший преподаватель кафедры электроники БГУИР
44. С. Ван – магистрант кафедры защиты информации БГУИР

45. Савоневская Маргарита Олеговна – студент факультета информационных технологий и управления БГУИР
46. Сацук Сергей Михайлович – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой электроники БГУИР
47. Семенченко Екатерина Андреевна – магистрант кафедры вычислительных системы и сетей Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой
48. Сиротко Сергей Иванович – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой информатики БГУИР
49. Ситников Алексей Владимирович – инженер-программист ОИТ ЦИИР БГУИР
50. Скалозуб Ксения Александровна – студент кафедры электронных вычислительных машин БГУИР
51. Соркин Всеволод Олегович – студент факультета информационных технологий и управления БГУИР
52. Старовойтов Александр Александрович – аспирант кафедры информационных систем управления БГУ
53. Столярова Виолетта Витальевна – студентка факультета информационных технологий и управления БГУИР
54. Сюн Шуан – студент кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
55. Жэнь Сюнь Хуань – доцент кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР, к.т.н.
56. Тавгень Максим Алексеевич – учащийся учреждения образования «Национальный детский технопарк» по направлению «Информационная безопасность»
57. Тимофеев Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры защиты информации БГУИР
58. Томашевич Никита Александрович – студент четвертого курса специальности вычислительные машины, системы и сети Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой
59. Третьяков Игорь Александрович – к.т.н., доц., зам. декана по научной работе, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»

60. Хаджинова Ксения Александровна – студентка факультета информационных технологий и управления БГУИР
61. Хаджинова Наталья Владимировна – старший преподаватель кафедры информационных технологий автоматизированных систем БГУИР
62. Цветков Виктор Юрьевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий БГУИР
63. Чепикова Виолетта Викторовна – старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
64. Черникова Лолита Александровна – студентка факультета информационных технологий и управления БГУИР
65. Чернявский Кирилл Эдуардович – студент кафедры электронных вычислительных машин БГУИР
66. Чжан Сюй – студент кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
67. Чжан Чи – студент кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
68. Чжао Шуи – студент кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
69. Чумаченко Максим Геннадьевич – магистрант кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
70. Чэнь Имин – аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР
71. Швая Александр Александрович – студент факультета информационной безопасности БГУИР
72. Шухман Максим Юрьевич – студент факультета информационных технологий и управления БГУИР
73. Янковец Александр Сергеевич – учащийся учреждения образования «Национальный детский технопарк» по направлению «Информационная безопасность»
74. Ярмош Александр Дмитриевич – инженер-программист ОИТ ЦИИР БГУИР