
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит два раза в квартал

Научный журнал издается с января 2003 года

Главный редактор **В.А. Богущ**

Редакционная коллегия:

Л.М. Лыньков (зам. главного редактора),
А.Н. Осипов (зам. главного редактора),
Т.В. Борботько (ответственный секретарь),
М.П. Батура, В.Е. Борисенко, А.Л. Гурский, С.Е. Карпович, В.К. Конопелько,
А.П. Кузнецов, А.А. Кураев, В.А. Лабунов, В.В. Муравьев, М.М. Татур

Редакционный совет:

И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, И.С. Азаров, В.В. Баранов, А.И. Белоус, И.В. Боднарь,
С.В. Бордусов, С.В. Гапоненко, Н.В. Гапоненко, В.В. Голенков, В.Ф. Голиков, Л.И. Гурский,
А.П. Достанко, В.А. Емельянов, А.А. Иванюк, В.М. Колешко, Ф.Ф. Комаров, Ф.П. Коршунов,
С.П. Кундас, В.А. Куренев, В.И. Курмашев, Н.И. Листопад, С.В. Лукьянец, В.Е. Матюшков,
Л.И. Минченко, Ф.И. Пантелеенко, В.А. Пилипенко, С.Л. Прищепа, А.М. Русецкий, Н.К. Толочко,
А.А. Хмыль, В.Ю. Цветков, В.В. Цегельник, Г.П. Яблонский, В.Н. Ярмолик

Адрес редакции: ул. П. Бровки, 6, к. 326, г. Минск, 220013, Беларусь

Телефон редакции: +375-17-293-88-41

Web-сайт: www.doklady.bsuir.by

E-mail: doklady@bsuir.by

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

Гурский Л.И., Каланда Н.А., Ярмолич М.В., Бобриков И.А., Желудкевич А.Л., Киреев П.Н., Кривченя Д.А. Малоугловое рассеяние нейтронов на образцах Sr_2FeMoO_6 с разной степенью сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo.....	5
Колосов С.В., Зайцева И.Е. Гиротроны с конусообразными резонаторами	14
Taha M., Azarov E.S., Likhachov D.S., Petrovsky A.A. An efficient speech generative model based on deterministic/stochastic separation of spectral envelopes	23
Вишняков В.А., Качан Д.А. Управление интернет-маркетингом в системе образования с использованием блокчейн-технологий	30
Янушкевич К.О., Чубенко Е.Б., Бондаренко В.П. Формирование и оптические свойства осажденного электрохимическим методом легированного никелем оксида цинка	37
Цветков В.Ю. Определение размера LIFO-стека для выращивания областей изображений	45
Катковский Л.В. Расчет параметров тепловизионной съемки объектов с беспилотных авианосителей.....	53
Искра Н.А. Подход к анализу изображений для систем технического зрения	62

Янцевич М.А., Филиппович Г.А. Методика синтеза квазидвухполосовых согласующих устройств	71
Киселёв М.Г., Габец В.Л., Монич С.Г., Петров В.А. Методика и аппаратные средства определения усилия, необходимого для движения шток-поршня шприца однократного применения.....	80
Хижняк А.В. Оптимизационный метод нечеткой автоматической классификации в задаче объединения оценок траекторных измерений в радиолокационной системе.....	89
Михнёнок Е.И. Способ обработки изображений в задаче обнаружения движущихся объектов в оптико-электронных системах наблюдения тепловизионного типа	96
Солодуха В.А., Пилипенко В.А., Комаров Ф.Ф., Горушко В.А. Влияние временных режимов термообработки на микроструктуру системы Pt-Si	105

Корректурa и верстка Л.В. КОНДАКОВА
Компьютерный дизайн О.В. БОЙПРАВ

Подписано в печать 31.03.2020. Формат 60×84 ¼. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.
Усл. печ. л. 13,25. Уч.-изд. л. 13,0. Тираж 100 экз. Заказ 49.
Индекс для индивидуальной подписки 00787.
Индекс для ведомственной подписки 007872.

Издатель: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1087 от 23.01.2010.

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 14.04.2014. 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2020

DOKLADY BGUIR

Published twice quarterly

The journal has been published since January, 2003

Editor-In-Chief V. A. Bogush

Address of editorial office: P. Brovka str., 6, room 326, Minsk, 220013, Belarus

Phone number of editorial office: +375-17-293-88-41

Web-site: www.doklady.bsuir.by

E-mail: doklady@bsuir.by

CONTENTS

ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS

Hurski L.I., Kalanda N.A., Yarmolich M.V., Bobrikov I.A., Zhaludkevich A.L., Kireev P.N., Krivchenya D.A. Small-angle scattering of neutrons on $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ samples with different-degree superstructural ordering of Fe/Mo cations	5
Kolosov S.V., Zaitseva I.E. Gyrotrons with cone-shaped resonators	14
Taha M., Azarov E.S., Likhachov D.S., Petrovsky A.A. An efficient speech generative model based on deterministic/stochastic separation of spectral envelopes	23
Vishniakou U.A., Kachan D.A. Management of Internet marketing in education system with blockchain technologies	30
Yanushkevich K.O., Chubenko E.B., Bondarenko V.P. Synthesis and optical properties of Ni-doped ZnO grow by electrochemical deposition.....	37
Tsviatkou V.Yu. LIFO-stack size determination for growing of the image regions	45
Katkovsky L.V. Calculation of objects thermal imaging parameters from unmanned aerial vehicles	53
Iskra N.A. Approach to image analysis for computer vision systems	62
Yantsevich M.A., Filipovich H.A. The method of synthesis of quasi-dual-band matching device.....	71
Kiselev M.G., Gabets V.L., Monich S.G., Petrov V.A. Methodology and hardware for determining the force required to move the plunger rod of a disposable syringe	80

Khizhniak A.V. The optimization method of fuzzy automatic classification in the problem of combining the assessments of trajector measurements in the radar system.....	89
Mikhniok E.I. Method of image processing in the problem of detecting moving objects in optical-electronic surveillance systems of thermal imaging type	96
Saladukha V.A., Pilipenko V.A., Komarov F.F., Gorushko V.A. Influence of time modes of thermal treatment on the Pt-Si system microstructure.....	105



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-5-13>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 538.9: 539.2: 548.4

МАЛОУГЛОВОЕ РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ НА ОБРАЗЦАХ $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ С РАЗНОЙ СТЕПЕНЬЮ СВЕРХСТРУКТУРНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ КАТИОНОВ Fe/Mo

ГУРСКИЙ Л.И.¹, КАЛАНДА Н.А.², ЯРМОЛИЧ М.В.², БОБРИКОВ И.А.³, ЖЕЛУДКЕВИЧ А.Л.²,
КИРЯЕВ П.Н.⁴, КРИВЧЕНЯ Д.А.²

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
(г. Минск, Республика Беларусь)

² ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» (г. Минск, Республика Беларусь)

³ Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований,
(г. Дубна, Россия)

⁴ Институт порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 19 декабря 2018

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Однофазные образцы $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ с различной степенью сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo (P , 76, 86 и 93 %) были получены твердофазным методом. На основании результатов измерения магнитных характеристик в образцах установлено, что увеличение величин намагниченности (26,41, 32,36 и 42,66 $\text{A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$), магнитного момента (1,33, 3,07 и 3,58 $\mu\text{B}/\text{f.e.}$) и температур Кюри (422, 428 и 437 K) с ростом параметра P (76, 86 и 93 %) можно объяснить присутствием антиструктурных дефектов, а также антиферромагнитных включений. Наличие таковых обуславливает перераспределение электронной плотности, что сопровождается изменением электронной конфигурации части катионов Fe/Mo. На основании данных температурных зависимостей магнитного момента образцов, измеренных в ZFC и FC режимах, и малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов (МУРН) установлено, что образцы находятся в магнитно-неоднородном состоянии. Важным результатом является обнаруженное различие между наклоном кривых МУРН образцов с различным содержанием кислорода, что свидетельствует о разной микроструктуре неоднородностей. Основными неоднородностями, на которых происходит рассеяние, являются магнитные включения с характерными размерами, зависящими от сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo. Показано, что согласно закону Порода при значениях волнового вектора $0,1 > q > 0,002 \text{ \AA}^{-1}$ образцы $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ содержат полидисперсные зерна с гладкой и шероховатой поверхностью, а при $q > 0,1 \text{ \AA}^{-1}$ наблюдается отклонение от закона Порода, что указывает на наличие в зернах магнитных неоднородностей диаметром менее 6 нм.

Ключевые слова: ферромolibдат стронция, сверхструктурное упорядочение, кислородная нестехиометрия, намагниченность, малоугловое нейтронное рассеяние.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках программы ЕС «Горизонт-2020» (H2020-MSCA-RISE-2018-823942 – FUNCOAT) и задания 1.02 ГПНИ Республики Беларусь «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Материаловедение и технологии материалов», а также проекта БРФФИ № Ф18Д-009.

Для цитирования. Гурский Л.И., Каланда Н.А., Ярмолич М.В., Бобриков И.А., Желудкевич А.Л., Киреев П.Н., Кривченя Д.А. Малоугловое рассеяние нейтронов на образцах $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ с разной степенью сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo. Доклады БГУИР. 2020; 18(2): 5-13.

SMALL-ANGLE SCATTERING OF NEUTRONS ON $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ SAMPLES WITH DIFFERENT-DEGREE SUPERSTRUCTURAL ORDERING OF Fe/Mo CATIONS

LEONID I. HURSKI¹, NIKOLAY A. KALANDA², MARTA V. YARMOLICH²,
IVAN A. BOBRIKOV³, ALIAKSANDR L. ZHALUDKEVICH², PETR N. KIREEV⁴,
DMITRY A. KRIVCHENYA²

¹ *Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

² *Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)*

³ *Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russia)*

⁴ *Powder Metallurgy Institute of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 19 December 2018

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. Single-phase $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ samples with different-degreesuperstructural ordering Fe/Mo cations superstructural ordering (P , 76, 86 and 93 %) were obtained by the solid-phase technique. Based on the results of measuring the magnetic characteristics in the samples, we found that an increase in magnetization (26.41, 32.36 and 42.66 $\text{A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$), magnetic moment (1.33, 3.07 and 3.58 $\mu_{\text{B}}/\text{f.u.}$) and Curie temperatures (422, 428 and 437 K) with parameter P (76, 86 and 93 %) can be explained by the presence of antistructural defects, as well as antiferromagnetic inclusions. This determines the redistribution of electron density, which is accompanied by the change in electronic configuration of a part of Fe/Mo cations. Based on the temperature dependences of the magnetic moment of the samples measured in ZFC and FC modes, and on small-angle polarized neutron scattering (SANS), we found that the samples are in a magnetically inhomogeneous state. An important result to mention is that we detected the difference between the slope of the SANS curves of samples with different oxygen content, which demonstrates a different microstructure of inhomogeneities. The main inhomogeneities are magnetic inclusions with the dimensions depending on the superstructural ordering of Fe/Mo cations. According to the Porod law, it was shown that the $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ samples with wave vector values $0.1 > q > 0.002 \text{ \AA}^{-1}$ contain polydisperse grains with a smooth surface. For $q > 0.1 \text{ \AA}^{-1}$ a deviation from the Porod law is observed, confirming the presence of magnetic inhomogeneities with a diameter $< 6 \text{ nm}$ in the grains.

Keywords: strontium ferromolybdate, superstructural ordering, oxygen non-stoichiometry, magnetization, small-angle neutron scattering.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. This work was carried out as part of the European project H2020-MSCA-RISE-2018-823942 – FUNCOAT and the Assignment No. 1.02 of the State Program of Scientific Research of the Republic of Belarus “Physical Materials Science, New Materials and Technologies” subprogram “Materials Science and Technologies”.

For citation. Hurski L.I., Kalanda N.A., Yarmolich M.V., Bobrikov I.A., Zhaludkevich A.L., Kireev P.N., Krivchenya D.A. Small-angle scattering of neutrons on $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ samples with different-degree superstructural ordering of Fe/Mo cations. Doklady BGUIR. 2020; 18(2): 5-13.

Введение

Исследования материалов со структурой двойного перовскита широко распространены в последнее время. Особый интерес исследователей вызывают металлооксидные ферромагнетики $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ (SFMO) ввиду их уникальных свойств – существенное отрицательное магнитосопротивление в относительно слабых магнитных полях ($MR \sim 38\%$ в поле 1,0 Тл при $T = 50$ К), высокие значения степени спиновой поляризации электронов проводимости ($\sim 100\%$) и температуры Кюри ($T_C \sim 420$ К) [1–3]. Эти особенности данных материалов делают их уникальными и важными ввиду потенциального применения в спинтронике (в датчиках слабых магнитных полей, устройствах для записи и обработки информации и т. д.) [4–6].

Одним из условий существования высокой степени спиновой поляризации в SFMO является наличие сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo (P), расположенных в центрах октаэдров, в вершинах которых находятся анионы кислорода [7, 8]. В идеальной структуре SFMO катионы железа и молибдена находятся в высокоспиновом состоянии и имеют валентность $\text{Fe}^{3+}(3d^5)$ и $\text{Mo}^{5+}(4d^1)$. В реальной структуре присутствуют антиструктурные точечные дефекты и анионные вакансии, что приводит к перераспределению электронной плотности и разрушает сверхструктурное упорядочение. Это обуславливает реализацию смешанных магнитных состояний в SFMO, что приводит к различным магнитным и гальваномагнитным характеристикам.

Прямыми способами изучения эволюции выделяющихся фаз и различного рода кластеров, формирующихся при термической обработке в объеме материала, являются нейтронные методы. Главным образом это относится к методу малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН), поскольку нейтроны оказывают влияние не только на кристаллическую решетку, но и на магнитные моменты SFMO. Методом МУРН регистрировалось наличие антиферромагнитных кластеров в SFMO со средними размерами 20–30 нм [9]. Кроме этого, согласно результатам измерений магнитной восприимчивости на переменном токе и температурных зависимостей намагниченности, измеренных в FC (охлаждение в магнитном поле) и ZFC (охлаждение в нулевом магнитном поле) режимах в интервале температур от 4,2 до 300 К, также установлено наличие антиферромагнитных включений в ферромагнитной матрице. Особый интерес представляет изучение динамики формирования антиферромагнитных включений, изменения их размеров, фрактальной размерности и структурной организации в зависимости от концентрации антиструктурных точечных дефектов и анионных вакансий. Такая информация в настоящее время в литературе отсутствует ввиду того, что такие методы исследования, как рентгеновская и нейтронная дифракции, электронная микроскопия и др., неприменимы для решения поставленной задачи.

На основании вышеизложенного в данной работе главной целью является изучение влияния кислородной нестехиометрии и степени сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo на динамику формирования, фрактальную размерность и структурную организацию антиферромагнитных вкраплений в SFMO.

Методика проведения эксперимента

Порошки $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ синтезировали методом твердофазных реакций из частично восстановленных прекурсоров $\text{SrFeO}_{2,5}$ и SrMoO_4 . Прекурсоры получали по керамической технологии из оксидов MoO_3 , Fe_2O_3 , SrCO_3 марки ОСЧ. При синтезе прекурсоров $\text{SrFeO}_{2,5}$ и SrMoO_4 предварительный отжиг осуществлялся на воздухе при 970 и 1070 К в течение 20 и 40 ч соответственно. Помол и перемешивание смеси стехиометрического состава исходных реагентов проводились в вибромельнице в этаноле в течение 3 ч. Полученные смеси сушили при температуре 350 К и затем прессовались в таблетки. Для повышения однородности шихты использовали вторичный помол полученных таблеток. Окончательный синтез при получении прекурсора $\text{SrFeO}_{2,5}$ осуществлялся при $T = 1470$ К в течение 20 ч в потоке аргона, а прекурсора SrMoO_4 – при $T = 1470$ К в течение 40 ч при $p_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot 10^5$ Па с последующей закалкой прекурсоров на комнатную температуру. Затем полученные прекурсоры прессовались в таблетки диаметром 10 мм и толщиной 4–5 мм,

которые отжигались в потоке газовой смеси 5 %H₂/Ar при 1420 К в течение 5 ч и закачивались на комнатную температуру.

Содержание кислорода в образцах определялось путем взвешивания до и после их полного восстановления до оксида SrO и металлов Fe и Mo в потоке смеси газов (30 % водорода и 70 % аргона) при 1473 К в течение 20 ч. Установлено, что образцы имели однофазный состав Sr₂FeMoO_{5,99} без сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo ($P = 0$). Получение образцов с различным содержанием кислорода реализовывалось путем их отжига при 1420 К различной длительности в потоке газовой смеси 5%H₂/Ar: *A-1* (Sr₂FeMoO_{5,97}, $P = 76$ %) в течение 20 ч, *A-2* (Sr₂FeMoO_{5,94}, $P = 86$ %) – 50 ч и *A-3* (Sr₂FeMoO_{5,94}, $P = 93$ %) – 90 ч.

Параметры кристаллической решетки определялись с использованием базы данных ICSD–PDF2 (Release 2000) и программного комплекса PowderCell, FullProf методом Ритвельда по данным рентгеновской дифракции на установке ДРОН-3 в CuK_α-излучении. Степень сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo рассчитывалась по формуле $P = (2SOF - 1)100$ %, где SOF – фактор заселенности позиций (Seat Occupancy Factor). Температура Кюри всех образцов определялась пондеромоторным методом в ходе измерений их удельной намагниченности в интервале температур 77–800 К во внешнем магнитном поле 0,86 Тл.

Исследования сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo в ферромагнетиках состава SFMO проводились с использованием малоуглового рассеяния неполяризованных и поляризованных нейтронов (режим пропускания при плоской геометрии) в г. Гестхатт (Германия) на установке SANS-1. Поляризация пучка осуществлялась методом зеркального отражения от намагниченных оптических зеркал, в процессе которого при разности в сечениях рассеяния нейтронов для спиновых состояний $\pm 1/2h$ достигается уровень поляризации $0,9 < P < 1$. Дифференциальное сечение рассеяния на единицу объема (интенсивность рассеяния I) получалось как функция вектора рассеяния с модулем $q = (4\pi/\lambda)\sin(\theta/2)$, где $\lambda = 0,81$ нм – длина волны нейтронов (немонохроматичность 10 %), а θ – отклонение нейтронов при рассеянии от направления пучка, определяемое на позиционно-чувствительном детекторе за образцом. Измеряемый диапазон составлял $q = 0,005 \div 0,25 \text{ \AA}^{-1}$. Эксперименты проводились как в отсутствие, так и в присутствии магнитного поля ($B = 1,5$ Тл). В случае поляризованных нейтронов измерялись два вида рассеяния, соответствующие разной поляризации пучка: вдоль поля (I^-) и противоположно полю (I^+).

Результаты и их обсуждение

На основании результатов рентгенофазового анализа образцы *A-1*, *A-2* и *A-3* с различным содержанием кислорода и различным сверхструктурным упорядочением катионов Fe/Mo являются однофазными. Установлено, что при увеличении параметра P наблюдается рост значений намагниченности $M(T)$ в интервале температур 77–550 К, и при 77 К они составляют $M_{77K} = 26,41; 32,36; 42,66 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ для *A-1*, *A-2* и *A-3* соответственно. Обнаружено, что образцы имеют различные температуры перехода из парамагнитного в ферромагнитное состояние со значениями температуры Кюри $T_C \approx 422; 428; 437 \text{ K}$ для $P = 76; 86; 93$ % соответственно (рис. 1).

При изучении температурных зависимостей магнитного момента образцов SFMO, измеренных в ZFC и FC режимах, в них были обнаружены магнитно-неоднородные состояния. При включении слабого внешнего магнитного поля 0,01 Тл (меньше коэрцитивной силы $B_C = 0,012; 0,013; 0,014$ Тл для *A-1*, *A-2* и *A-3* соответственно) с последующим увеличением температуры в интервале 4,2–22 К наблюдается резкий рост магнитного момента образцов (рис. 2). Это обусловлено когерентным перемагничиванием суперпарамагнитных частиц. Все спины поворачиваются таким образом, что остаются ориентированными параллельно друг другу все время, в то время как величины магнитного поля недостаточно для перемагничивания не суперпарамагнитных зерен. С дальнейшим увеличением температуры намагниченность образцов уменьшается. Суперпарамагнитные свойства в ферромагнетике SFMO, согласно данным температурных зависимостей магнитного момента, наблюдались также и другими исследователями [10, 11].

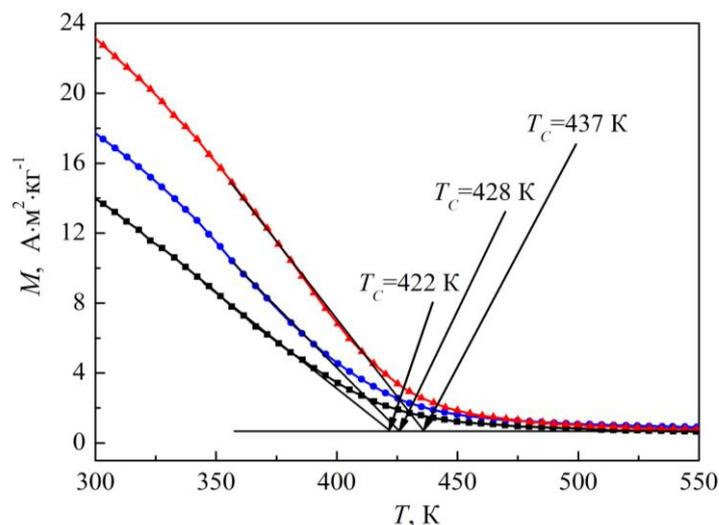


Рис. 1. Температурная зависимость намагниченности ферримагнетиков, измеренная в магнитном поле с индукцией $B = 0,86$ Тл

Fig. 1. Temperature dependence of the magnetization of ferrimagnetics, measured in a magnetic field with induction $B = 0.86$ T

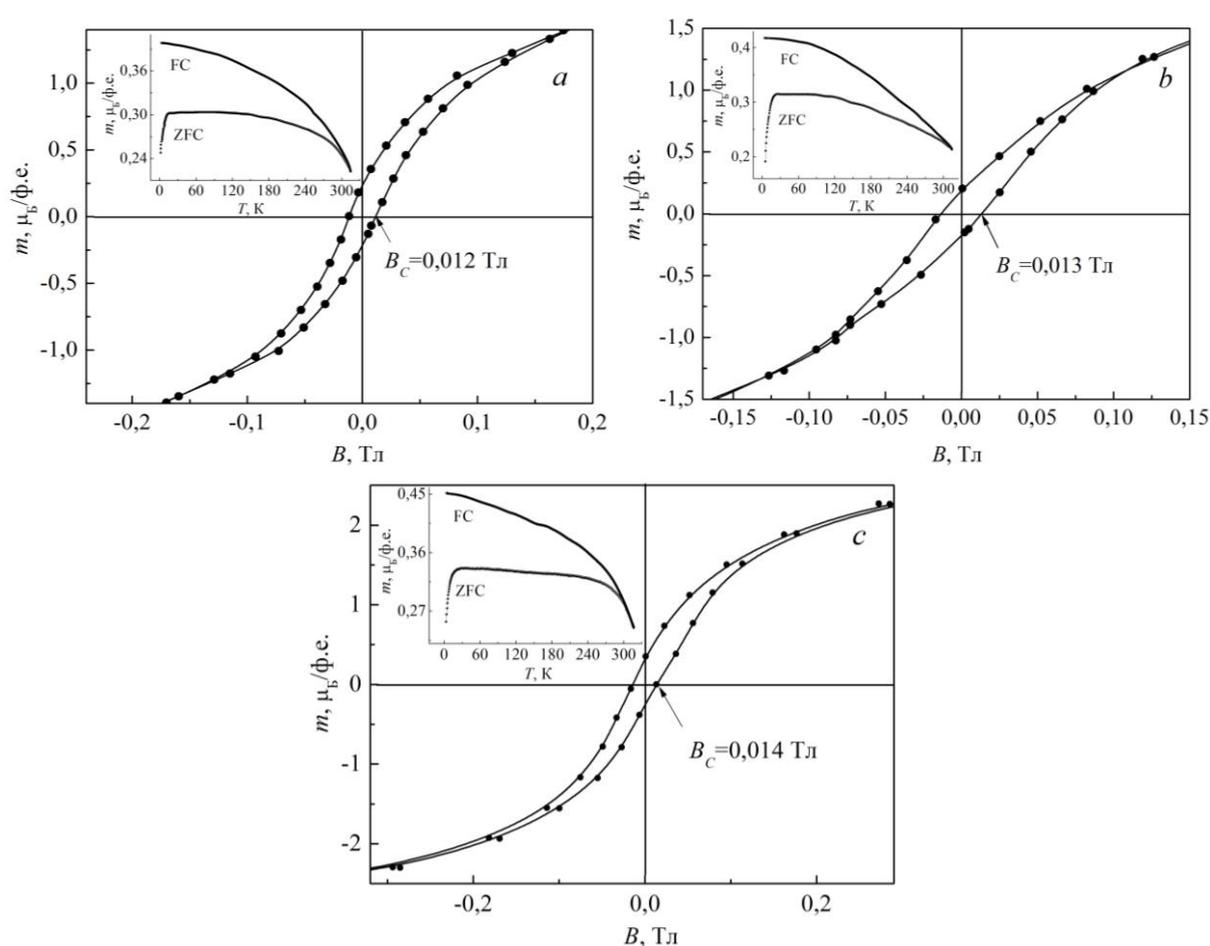


Рис. 2. Полевые зависимости магнитного момента образцов А-1 (а), А-2 (б), А-3 (с), измеренные в ZFC и FC режимах. На вставке представлены температурные зависимости магнитного момента образцов, измеренные в поле 0,01 Тл

Fig. 2. The field dependences of the magnetic moment of samples А-1 (а), А-2 (б), А-3 (с), measured in ZFC and FC modes. The inset shows the temperature dependences of the magnetic moment of the samples, measured in the field 0.01 T

Дальнейшее увеличение температуры влечет за собой плавное уменьшение M , что связано с вкладом тепловых флуктуаций с энергией $E_{\text{тепл}} = k_B T$ в размагничивание суперпарамагнитных зерен. В этом случае рост значений P также сказывается и на величинах магнитного момента, которые составляют $m_{A-1} = 1,33 \mu_B/\text{ф.е.}$, $m_{A-2} = 3,07 \mu_B/\text{ф.е.}$ и $m_{A-3} = 3,58 \mu_B/\text{ф.е.}$ при $T = 77 \text{ K}$, что хорошо коррелирует со значением параметра P образцов: $P_{A-1} = 76 \%$, $P_{A-2} = 86 \%$, $P_{A-3} = 93 \%$.

На наличие магнитно-неоднородного состояния в образцах с присутствием магнитных областей, имеющих другую магнитную природу, указывают данные малоуглового рассеяния нейтронов (рис. 3).

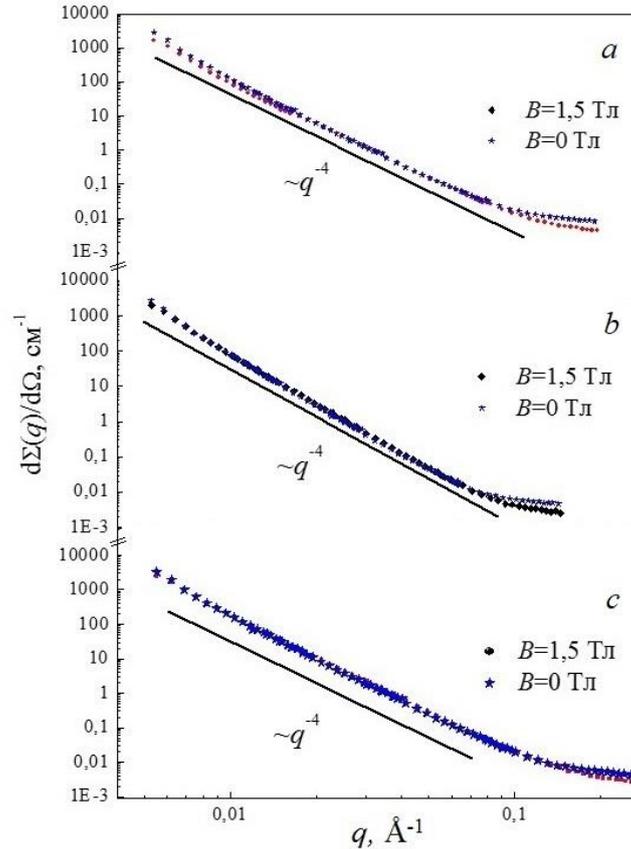


Рис. 3. Интенсивность малоуглового рассеяния неполяризованных ($B = 0 \text{ Тл}$) и поляризованных ($B = 1,5 \text{ Тл}$) нейтронов для образцов $A-1$ (a), $A-2$ (b), $A-3$ (c). Сплошные линии показывают изменения интенсивностей согласно закону Порода: $I \sim q^{-4}$

Fig. 3. The intensity of small-angle scattering of unpolarized ($B = 0 \text{ T}$) and polarized ($B = 1.5 \text{ T}$) neutrons for samples $A-1$ (a), $A-2$ (b), $A-3$ (c). The solid lines show the changes in intensity according to the Porod law: $I \sim q^{-4}$

Когда магнитные моменты в образце ориентированы вдоль направления приложенного магнитного поля, интенсивности рассеяния зависят от радиального угла φ между направлениями приложенного магнитного поля и вектора рассеяния q . При этом интенсивность рассеяния нейтронного пучка, поляризованного параллельно (–) и антипараллельно (+) направлению магнитного поля имеет вид:

$$I(q, \varphi, B) = F_{\text{я}}^2(q) + (F_{\text{M}}^2(q) + 2P\varepsilon F_{\text{я}}(q)F_{\text{M}}(q))\sin^2\varphi, \quad (1)$$

$$I^+(q, \varphi, B) = F_{\text{я}}^2(q) + (F_{\text{M}}^2(q) - 2PF_{\text{я}}(q)F_{\text{M}}(q))\sin^2\varphi, \quad (2)$$

где P – степень поляризации нейтронного пучка, ε – коэффициент спин-флиппера. Усреднение по φ дает:

$$I(q, B) = F_{\text{я}}^2(q) + (1/2) (F_{\text{M}}^2(q) + P\varepsilon F_{\text{я}}(q)F_{\text{M}}(q)), \quad (3)$$

$$I^+(q, B) = F_{\text{я}}^2(q) + (1/2) (F_{\text{M}}^2(q) - PF_{\text{я}}(q)F_{\text{M}}(q)). \quad (4)$$

Таким образом, интенсивности рассеяния нейтронного пучка содержат вклады ядерного ($F_{\text{я}}(q)$) и магнитного ($F_{\text{М}}(q)$) рассеяния, а также дополнительный перекрестный член $F_{\text{я}}(q)F_{\text{М}}(q)$. В общем случае Γ^+ и Γ^- различаются знаком скрещивающегося члена, обусловленного интерференцией между ядерным ($F_{\text{я}}(q)$) и магнитным рассеянием ($F_{\text{М}}(q)$) и содержащего произведения амплитуд ядерного и магнитного рассеяния, согласно аналитическим выражениям (3) и (4). Диаграммы интенсивности рассеяния нейтронного пучка, соответствующие противоположным состояниям поляризации нейтронов, являются идентичными. В рамках дальнейшего анализа, для повышения статистической точности, усредненная величина $(\Gamma^+ + \Gamma^-)/2$ рассматривается как компонента магнитного рассеяния. Для немагнитных образцов данное усреднение дает также компоненту магнитного рассеяния, которая сильно доминирует над ядерным рассеянием.

Для характеристики сформированных структур в качестве аппроксимации зависимостей (МУРН) был применен степенной закон [12]: $d\Sigma(q)/d\Omega = Aq^{-\alpha} + B$, где α является экспонентой степенного закона, $A = 2\pi\Delta\rho^2S$ – параметр, характеризующий полную площадь поверхности неоднородностей, S – удельная площадь поверхности между неоднородностью и матрицей, B – остаточный некогерентный фон, $\Delta\rho^2 = (\rho - \rho_s)^2$ – контраст. Величина α указывает на наличие видов структур, которые являются причиной рассеяния в различных интервалах величин вектора рассеяния q . Для образцов $A-1$, $A-2$ и $A-3$ при всех величинах B $\alpha \cong 4$ при значениях волнового вектора $0,1 > q > 0,002 \text{ \AA}^{-1}$ (рис. 3). Это указывает на то, что рассеяние на магнитных структурах с большим масштабом длины ($D > 6$ нм) подчиняется закону Порода ($\alpha \cong 4$) [12], что соответствует объекту с гладкой поверхностью и полидисперсной структурой зерен.

Важным результатом является обнаруженное различие между наклоном кривых МУРН образцов $A-1$, $A-2$ и $A-3$, что свидетельствует о разной микроструктуре неоднородностей. Основными неоднородностями, на которых происходит рассеяние, являются магнитные включения с характерными размерами, зависящими от сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo. Для больших $q > 0,1 \text{ \AA}^{-1}$ полученные кривые рассеяния от образцов $A-1$, $A-2$ и $A-3$ в магнитных полях до 1,5 Тл показывают, что воздействие магнитного поля приводит к анизотропии двумерного рассеяния. Это указывает на некоторый магнитный вклад от неоднородностей (примесей) малого масштаба с $D < 6$ нм, которые не разрушаются магнитным полем даже при $B = 1,5$ Тл. Данные малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов показывают динамику изменения магнитных неоднородностей размерами $D < 6$ нм в образцах $A-1$, $A-2$ и $A-3$. Установлено, что магнитное поле влияет на изменение рассеяния только в областях с большими значениями векторов рассеяния $q > 0,1 \text{ \AA}^{-1}$.

Заключение

На основании результатов измерения магнитных характеристик в образцах $A-1$, $A-2$ и $A-3$ установлено, что увеличение величин намагниченности ($26,41 \text{ A}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}$ $A-1$, $32,36 \text{ A}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}$ $A-2$ и $42,66 \text{ A}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}$ $A-3$), магнитного момента ($m(A-3) = 1,33 \text{ мБ/ф.е.}$, $m(A-2) = 3,07 \text{ мБ/ф.е.}$ и $m(A-3) = 3,58 \text{ мБ/ф.е.}$) и температур Кюри (422, 428 и 437 К) с ростом сверхструктурного упорядочения P (76, 86 и 93 %) можно объяснить присутствием антиструктурных дефектов, а также антиферромагнитных включений. На основании данных изучения температурных зависимостей магнитного момента образцов, измеренных в ZFC и FC режимах, в них обнаружено магнитно-неоднородное состояние. На наличие магнитно-неоднородного состояния в образцах с присутствием магнитных областей, имеющих другую магнитную природу, также указывают данные малоуглового рассеяния нейтронов. Для образцов $A-1$, $A-2$ и $A-3$ при всех величинах и направленности B величина α примерно равна 4 при значениях волнового вектора $0,1 > q > 0,002 \text{ \AA}^{-1}$. Это означает, что рассеяние на магнитных структурах с большим масштабом длины ($D > 6$ нм) подчиняется закону Порода, что соответствует объекту с гладкой поверхностью и полидисперсной структурой зерен. Отклонения в области $q > 0,1 \text{ \AA}^{-1}$ от закона Порода можно связать с магнитными неоднородностями размером менее 10 нм, которые не могут быть разрушены магнитным полем даже при $B = 1,5$ Тл. Обнаружено, что с увеличением сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo магнитная однородность ферромагнетика $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ повышается.

Список литературы / References

1. Serrate D., De Teresa J. M., Ibarra M. R. Double perovskites with ferromagnetism above room temperature. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2007;19:1-86. DOI: 10.1088/0953-8984/19/2/023201.
2. Kalanda N., Demyanov S., Masselink W., Mogilatenko A., Chashnikova M., Sobolev N., Fedosenko O. Interplay between phase formation mechanisms and magnetism in the Sr₂FeMoO₆ metal–oxide compound. *Crystal Research and Technology*. 2011;46(5):463–469. DOI: 10.1002/crat.201000213.
3. Kalanda N.A., Demyanov S.E., Petrov A.V., Karpinsky D.V., Yarmolich M.V., Oh S.K., Yu S.C., Kim D.H. Interrelation between the structural, magnetic and magnetoresistive properties of double-perovskite Sr₂FeMoO_{6-δ} thin films. *Journal of Electronic Materials*. 2016;45(7):3466-3472. DOI: 10.1007/s11664-016-4478-5.
4. Cibert J., Bobo J.F., Lüders U. Development of new materials for spintronics. *Comptes Rendus Physique*. 2005;6(9):977-996. DOI: 10.1016/j.crhy.2005.10.008.
5. Kalanda N., Kim, D.H., Demyanov S., Yu S.C., Yarmolich M., Petrov A., Oh S.K. Sr₂FeMoO₆ nanosized compound with dielectric sheaths for magnetically sensitive spintronic devices. *Current Applied Physics*. 2018;18(1):27–33. DOI: 10.1016/j.cap.2017.10.018.
6. Kovalev L.V., Yarmolich M.V., Petrova M.L., Ustarroz J., Terryn H.A., Kalanda N.A., Zheludkevich M.L. Double Perovskite Sr₂FeMoO₆ Films Prepared by Electrophoretic Deposition. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2014; 6(21):9201-19206. DOI: 10.1021/am5052125.
7. Hurski L.L., Kalanda N.A., Yarmolich M.V., Turchenko V.A., Karpinsky D.V., Chumak V.A., Petrov A.V., Zheludkevich A.L. Interrelation between oxygen non-stoichiometry and Fe/Mo superstructural ordering in Sr₂FeMoO_{6-d}. *Doklady BGUIR*. 2017;(8):54-59. (In Russ.).
8. Rager J., Zipperle M., Sharma A., MacManus-Driscoll J.L. Oxygen Stoichiometry in Sr₂FeMoO₆, the Determination of Fe and Mo Valence States, and the Chemical Phase Diagram of SrO – Fe₃O₄ – MoO₃. *Journal of the American Ceramic Society*. 2004;87:1330-1335. DOI: 10.1111/j.1151-2916.2004.tb07730.x.
9. Kanchana V., Vaitheeswaran G., Alouani M., Delin A. Electronic structure and x-ray magnetic circular dichroism of Sr₂FeMoO₆:Ab initio calculations. *Physical Review B*. 2007;75(22):220404(R). DOI: 10.1103/PhysRevB.75.220404.
10. Li X.H., Sun Y.P., Lu W.J., Ang R., Zhang S.B., Zhu X.B., Song W.H., Dai J.M. Size dependence of electronic and magnetic properties of double-perovskite Sr₂FeMoO₆. *Solid State Communications*. 2008;145(3):98-102. DOI: 10.1016/j.ssc.2007.10.021.
11. Suominen T., Raittila J., Salminen T., Schlesier K., Linden J., Paturi P. Magnetic properties of fine SFMO particles: Superparamagnetism. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007;309(2):278-284. DOI: 10.1016/j.jmmm.2006.07.016.
12. Sui Y., Wang X.J., Qian Z.N., Liu Z.G., Miao J.P., Cheng J.G., Huang X.Q., Lu Z., Su W.H., Ong C.K. Influence of doping Al on the magnetoresistance of polycrystalline Sr₂FeMoO₆. *Journal of magnetism and magnetic materials*. 2005;290:1089-1092. DOI: 10.1016/j.jmmm.2006.07.016.

Вклад авторов

Гурский Л.И. выполнил редактирование и окончательное утверждение рукописи для публикации, ее критический пересмотр в части значимого интеллектуального содержания.

Каланда Н.А. определил замысел и дизайн исследования, принял участие в анализе и интерпретации данных, подготовил статью к публикации.

Ярмолич М.В. осуществила синтез образцов Sr₂FeMoO_{6-δ} с различным содержанием кислорода твердофазным методом, сбор и обработку экспериментальных данных по фазовому составу и намагниченности, приняла участие в анализе и интерпретации данных.

Бобриков И.А. произвел анализ и интерпретацию полученных данных по малоугловому рассеянию неполяризованных и поляризованных нейтронов.

Желудкевич А.Л. выполнил измерение удельной намагниченности образцов Sr₂FeMoO_{6-δ}.

Киреев П.Н. осуществил обработку данных, редактирование и оформление статьи для публикации.

Кривченя Д.А. выполнил измерения структурных свойств образцов Sr₂FeMoO_{6-δ} методом рентгеновской дифракции.

Authors contribution

Hurski L.I. edited and delivered the final approval of the manuscript for publication, including its critical review in terms of significant intellectual content.

Kalanda N.A. defined the concept and design of research, took part in data analysis and interpretation and prepared the article for publication.

Yarmolich M.V. synthesized $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$ samples with different oxygen content by the solid-phase technique, collected and processed the experimental findings concerning phase composition and magnetization, and partook in the data analysis and interpretation.

Bobrikov I.A. analyzed and interpreted the obtained data on small-angle scattering of unpolarized and polarized neutrons.

Zhaludkevich A.L. measured specific magnetization of $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$ samples.

Kireev P.N. processed the obtained experimental results and prepared the article for publication.

Krivchenya D.A. measured the structural properties of $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$ samples by the X-ray diffraction technique.

Сведения об авторах

Гурский Л.И., член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Центра 9.1 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Каланда Н.А., к.ф.м.н., ведущий научный сотрудник отдела криогенных исследований ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению».

Ярмолич М.В., к.ф.м.н., старший научный сотрудник отдела криогенных исследований ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению».

Бобриков И.А., к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна, Россия).

Желудкевич А.Л., научный сотрудник лаборатории физики высоких давлений и синтеза сверхтвердых материалов ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению».

Киреев П.Н., к.т.н., зав. отделением машиностроительных материалов ГНУ «Институт порошковой металлургии НАН Беларуси».

Кривченя Д.А., младший научный сотрудник лаборатории физики магнитных материалов ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению».

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17- 293-85-17;
e-mail: lhur@bsuir.by
Гурский Леонид Ильич

Information about the authors

Hurski L.I., D.Sci., Corresponding Member of the NAS of Belarus, D.Sci., Professor, Main Research Fellow of the Centre 9.1 of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kalanda N.A., PhD, leading researcher of the Department of cryogenic research of the SSPA "Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus".

Yarmolich M.V., PhD, senior researcher of the Department of cryogenic research of the SSPA "Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus".

Bobrikov I.A., PhD, senior researcher of the Laboratory of neutron physics named after I.M. Frank of the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russia).

Zhaludkevich A.L., researcher of laboratory of high pressure physics and synthesis of superhard materials of the SSPA "Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus".

Kireev P.N., PhD, Head of the Department of engineering materials of the SSI "Powder Metallurgy Institute of the NAS of Belarus".

Krivchenya D.A., junior researcher of the laboratory of physics of magnetic materials of the SSPA "Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus".

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17- 293-85-17;
e-mail: lhur@bsuir.by
Hurski Leonid Ilyich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-14-22>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 537.86

ГИРОТРОНЫ С КОНУСООБРАЗНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ

КОЛОСОВ С.В., ЗАЙЦЕВА И.Е.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 25 февраля 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Произведено сравнение эффективности цилиндрического, конического и биконического типов резонаторов гиротронов. По результатам сравнения трех исследуемых вариантов профиля гиротрона были сделаны выводы, что наименее эффективным является профиль регулярного типа. Данный вид резонатора позволил достичь уровня коэффициента полезного действия лишь в 23 %. Повысить коэффициент полезного действия в гиротронах с регулярным волноводом можно только за счет наличия нескольких мод или с помощью рекуперации электронов на коллекторе. Средним вариантом по коэффициенту полезного действия является биконический профиль резонатора. Его коэффициент полезного действия получился равным 42 %. При проведении научного исследования было выявлено увеличение коэффициента полезного действия для гиротронов с коническими резонаторами с 23 до 50 % на волне TE_{01} . Стоит отметить, что для получения такого коэффициента полезного действия необходимо производить группировку электронов по фазе в нарастающем высокочастотном поле посредством электромагнитного поля с дальнейшим отбором энергии у электронного потока в сильном спадающем электромагнитном поле. Коэффициент полезного действия, достигающий 50 %, существенно выше коэффициента полезного действия гиротрона с регулярным профилем резонатора ~30 %. Коэффициент полезного действия гиротрона для профиля волновода с коническим резонатором и с рекуперацией на коллекторе может достигать уровня в 80 %. Для проведения расчетов использовался программный комплекс КЕДР, в частности, оптимизация параметров гиротронов проводилась с помощью программного продукта GYRO-K. Данный программный продукт имеет ряд преимуществ перед другими подобными программными продуктами, основанных на «PIC» коде. GYRO-K позволяет получить высокую скорость сходимости при решении краевых задач, а также решать задачу оптимизации профиля волновода гирорезонансных приборов за приемлемое время счета. Гиротроны на коническом резонаторе могут найти широкое применение в промышленности при создании эффективных гиротронов для спектроскопии, диагностики различных сред и для технологических нужд.

Ключевые слова: гиротрон, нерегулярные волноводы, возбуждение нерегулярных волноводов, самосогласованная задача.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Колосов С.В., Зайцева И.Е. Гиротроны с конусообразными резонаторами. Доклады БГУИР. 2020; 18(2): 14-22.

GYROTRONES WITH CONE-SHAPED RESONATORS

STANISLAV V. KOLOSOV, IRINA E. ZAITSEVA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 25 February 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. In this paper we compared the efficiency of the cylindrical, conical, and biconical types of gyrotron resonators. Based on the results of comparing the three studied variants of gyrotron profile, it was concluded that the regular-type profile is the least efficient. This type of a resonator made it possible to achieve the level of efficiency of only 23 %, which can be increased in the regular-waveguide gyrotrons only through several modes or by recovering the electrons on the collector. The medium efficiency option is the biconical profile of the resonator. Its efficiency accounted for 42 %. Through a scientific study we revealed an increase in the efficiency for gyrotrons with conical resonators from 23 to 50 % in the TE_{01} wave. It is worth mentioning that obtaining such efficiency requires phase grouping of the electrons in an increasing high-frequency field by means of an electromagnetic field with further selection of energy from the electron beam in a strong decaying electromagnetic field. The efficiency of 50 % exceeds significantly that of a gyrotron with a regular cavity profile of ~30 %. The gyrotron efficiency for a waveguide profile with a conical resonator and with recovery on the collector can reach 80 %. To carry out the calculations, the KEDR software package was used, and the optimization of the gyrotron parameters, in particular, was carried out using the GYRO-K software. This software has several advantages over other similar options based on the “PIC” code. GYRO-K makes it possible to obtain a high convergence rate when solving boundary value problems, as well as to solve the problem of optimizing the waveguide profile of gyroresonance devices with an acceptable computational burden. Conical cavity gyrotrons can be widely used in industry to create effective gyrotrons for spectroscopy, diagnostics of various media, and for technological needs.

Keywords: gyrotron, irregular waveguides, excitation of irregular waveguides, self-consistent problem.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Kolosov S.V., Zaitseva I.E. Gyrotrons with cone-shaped resonators. Doklady BGUIR. 2020; 18(2): 14-22.

Введение

Обзор современного состояния гиротронов для технологических нужд средней мощности порядка нескольких киловатт, приведенный в [1] (табл. 17), показывает, что средний КПД составляет 20–30 %. В обычных гиротронах без рекуперации электронов на коллекторе КПД не превышает 30 % (см. [2, 3]). С рекуперацией на коллекторе возможно достижение полного КПД до 70 % (см. [4]). В обычных гиротронах с регулярным волноводом продольное распределение высокочастотного (ВЧ) поля имеет синусоидальный характер, что не соответствует оптимальному распределению поля, а на модах с более высокими индексами нельзя уже управлять продольным распределением ВЧ поля в пределах одной вариации. Повысить КПД можно в гиротронах с регулярным волноводом только за счет наличия нескольких мод или рекуперацией электронов на коллекторе. КПД гиротрона существенно зависит от рабочей частоты, так как сильно возрастают омические потери в стенках волновода с увеличением частоты, и питч-фактора, так как в гиротронах происходит отбор только поперечной энергии вращения электронов. В работе [5] на волне TE_{01} на частоте 35 ГГц достигнут КПД 23,7 %, что почти соответствует расчетным данным, полученным авторами. На более высоких частотах КПД гиротрона понижается, например, в [6, 7] на частоте 94 ГГц КПД уже составляет 20 %. Чтобы добиться больших значений КПД гиротрона с цилиндрическим резонатором на волне H_{01} , на первой гармонике циклотронной частоты

необходимо достичь высокой плотности фазового сгустка электронов путем фазовой группировки спирализированного электронного пучка посредством постепенного увеличения уровня высокочастотного электромагнитного поля. Чтобы предотвратить разгруппировку электронного сгустка по фазе и по остаточной энергии, необходимо организовать отбор энергии у электронов на небольшой длине в сильном электромагнитном поле, так как некоторые электроны, если произойдет их попадание в ускоряющую фазу поля, могут забрать у электромагнитного поля энергию обратно.

Методика проведения эксперимента

Для расчетов и оптимизации гиротронов была использована компьютерная программа GYRO-K из программного комплекса КЕДР [8]. В ней уравнения возбуждения нерегулярного волновода электронным потоком построены на основе метода преобразования координат А. Г. Свешникова [9, 10]. Он состоит в замене задачи возбуждения нерегулярного волновода задачей возбуждения регулярного волновода с радиусом волновода равным единице. Была использована система криволинейных координат (ρ, φ, s) вместо обычных полярных координат (r, φ, z) . В данной криволинейной системе единичные направляющие вектора по этим координатам определены как:

$$a_\rho = b \times r_0, \quad a_\varphi = \rho \cdot b \cdot \varphi_0, \quad a_s = \rho \cdot \frac{\partial b}{\partial z} \cdot r_0 + z_0, \quad (1)$$

где b – внутренний радиус волновода.

Уравнения Максвелла в ковариантной форме для координат (ρ, φ, s) можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{rot} H' &= \varepsilon_0 \cdot \hat{g} \cdot \frac{\partial E'}{\partial t} + \hat{g} \cdot J', \\ \text{rot} E' &= -\mu_0 \cdot \hat{g} \cdot \frac{\partial H'}{\partial t}. \end{aligned} \quad (2)$$

Метрический тензор:

$$\hat{g} = \begin{pmatrix} 1 + \rho^2 \cdot \left(\frac{\partial \bar{b}}{\partial z} \right)^2 & 0 & -\rho \cdot \bar{b} \cdot \frac{\partial \bar{b}}{\partial z} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\rho \cdot \bar{b} \cdot \frac{\partial \bar{b}}{\partial z} & 0 & \bar{b}^2 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $\rho = r/b$, $\bar{b} = 2\pi b/\lambda_0$, $z = 2\pi Z/\lambda_0$.

Уравнение боковой поверхности рассматриваемого волновода в системе координат (ρ, φ, s) – $\rho = 1$. В работе был использован метод Галеркина для решения уравнений Максвелла. Он позволяет свести трехмерную задачу возбуждения нерегулярного волновода к одномерной. В программе применены релятивистские уравнения движения заряженных частиц в электромагнитном поле нерегулярного волновода и неоднородном магнитостатическом поле. В полученной математической модели учитываются омические потери в стенках волновода, исходя из граничных условий Щукина – Леонтовича. Был использован итерационный метод последовательной нижней релаксации для нахождения самосогласованного решения задачи возбуждения волновода, а также для получения уравнений движения электронов в заданных электромагнитных полях.

Исследование регулярного резонатора

Для регулярного волновода определены следующие исходные данные: нормированный радиус волновода $g = 2\pi R/\lambda_0 = 3,863$ для волны TE_{01} , длина профиля $l = 2\pi L/\lambda_0 = 65$.

Для повышения добротности резонатора в конце волновода используется короткий сужающийся участок профиля. Для определения собственной добротности резонатора была просчитана его частотная характеристика, и она показана на рис. 1.

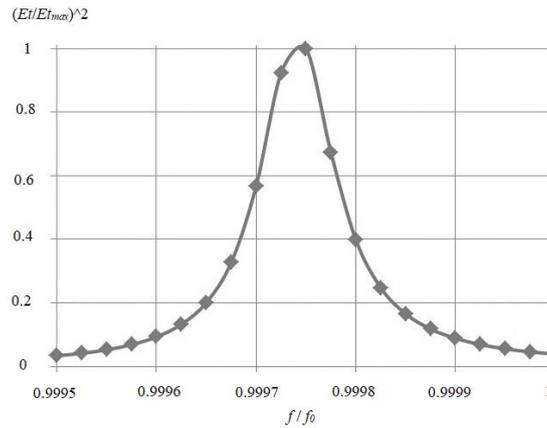


Рис. 1. Частотная характеристика регулярного резонатора
Fig. 1. Frequency response of a regular resonator

Собственная добротность такого резонатора составляет $Q = f_0 / \Delta f = 8333$, где $f_0 / \Delta f$ определяется по уровню 0,5.

Было принято, что нормированное значение магнитостатического поля равно $F(z) = \frac{\mu_0 \cdot e \cdot H_z^0(z)}{\omega_0} = \frac{1.748 \cdot 10^{11} \cdot B_0[T]}{2\pi \cdot f_0[H_z]} = 1,044$, нормированное значение тока –

$\sigma = \frac{\eta_0 \cdot \mu_0}{c} \cdot I_0 = 0,73723 \cdot 10^{-3} \cdot I_0[A] = 0,0000055$ ($I=7,4$ мА), питч-фактор равен $q = \frac{V_{\perp}}{V_z} = 1,5$,

нормированная начальная скорость электронного потока определена равной

$\beta_0 = \frac{v_0}{c} = \sqrt{1 - \frac{1}{(1,957 \cdot 10^{-6} \cdot V_0[v] + 1)^2}} = 0,319$ ($V = 28$ кВ), а рабочая частота равна $f = 30$ ГГц.

Получить КПД гиротрона $\eta = 23\%$ позволила оптимизация значений магнитостатического поля и тока электронного потока.

Взаимодействие электронного потока с ВЧ полем резонатора отображено на рис. 2.

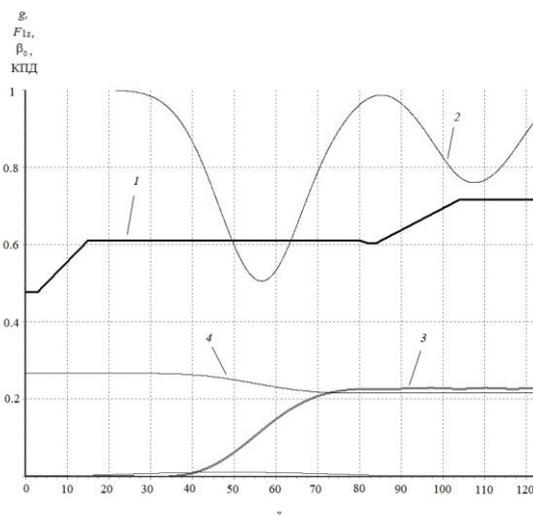


Рис. 2. Интегральные характеристики регулярного резонатора (1 – профиль резонатора $g/2\pi$, 2 – функция группировки электронов по первой гармонике, 3 – нормированная поперечная усредненная скорость электронов, 4 – КПД)

Fig. 2. Integral characteristics (1 – resonator profile $g/2\pi$, 2 – electron grouping function according to the first harmonic, 3 – normalized transverse averaged electron velocity, 4 – efficiency)

На рис. 3 изображено, как распределена электрическая составляющая ВЧ электромагнитного поля в продольном разрезе резонатора. Картина распределения ВЧ электрического поля по продольной координате близка к синусоидальной.

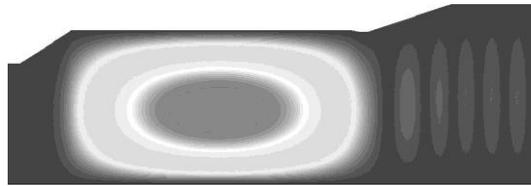


Рис. 3. Продольное распределение электрической составляющей ВЧ электромагнитного поля в волноводе
Fig. 3. The longitudinal distribution of the electrical component of the RF electromagnetic field in the waveguide

Исследование конического резонатора

Профиль конического резонатора имеет профиль с параметрами: $g = 3,81$ слева и $g = 3,85$ справа. Длина резонатора $l = 65$. Собственная добротность $Q = 2083$ (рис. 4).

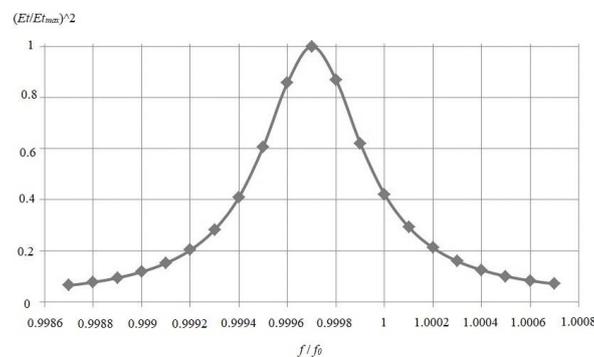


Рис. 4. График зависимости амплитуды от частоты резонатора конического типа
Fig. 4. Amplitude-frequency dependence of a conical resonator

На рис. 5 представлены интегральные характеристики конического резонатора.

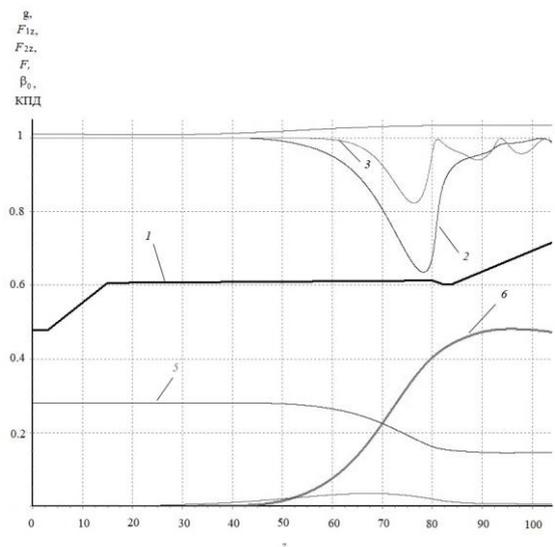


Рис. 5. Интегральные характеристики конического резонатора (1 – профиль резонатора $g/2\pi$, 2 – функция группировки электронов по первой гармонике, 3 – функция группировки по второй гармонике циклотронной частоты, 4 – значение нормированного магнитостатического поля, 5 – нормированная поперечная усредненная скорость электронов, 6 – КПД)

Fig. 5. The integral characteristics of the conical resonator (1 – resonator profile $g/2\pi$, 2 – electron grouping function by the first harmonic, 3 – grouping function by the second harmonic of the cyclotron frequency, 4 – value of the normalized magnetostatic field, 5 – normalized transverse averaged velocity electrons, 6 – efficiency)

Уровень КПД гиротрона данного типа достигает 50 %. Для создания условий получения такого КПД необходим ток $\sigma = 0,0001587$ ($I = 215$ мА).

На рис. 6 изображена картина продольного распределения электрической составляющей ВЧ поля в коническом резонаторе.

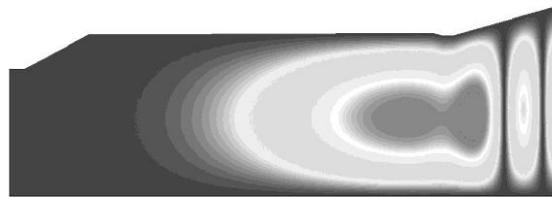


Рис. 6. Картина продольного распределения электрической составляющей ВЧ электромагнитного поля в коническом резонаторе

Fig. 6. A picture of the longitudinal distribution of the electrical component of the RF electromagnetic field in a conical resonator

Из рисунка видно, что максимум электромагнитного ВЧ поля сосредоточен в конце конического резонатора, что и позволяет добиться таких высоких показателей КПД данного типа гиротрона.

Исследование биконического резонатора

Проведено исследование вариации гиротрона с биконическим резонатором. Часть резонатора – расширяющийся конус, до этого расположен сужающийся участок профиля в виде конуса. На рис. 7 представлены интегральные характеристики биконического резонатора.

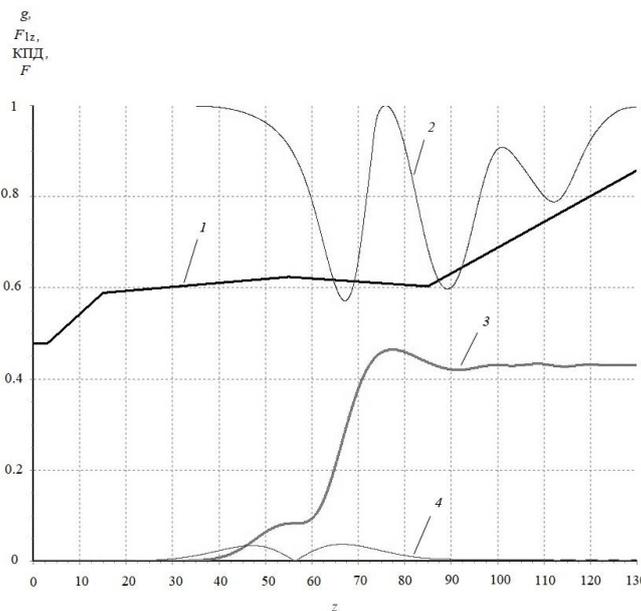


Рис. 7. Интегральные характеристики биконического резонатора (1 – профиль резонатора, 2 – функция группировки по первой гармонике циклотронной частоты, 3 – КПД, 4 – нормированная напряженность ВЧ электрического поля)

Fig. 7. Integral characteristics of a biconical resonator (1 – resonator profile, 2 – grouping function according to the first harmonic of the cyclotron frequency, 3 – efficiency, 4 – normalized RF electric field strength)

На рис. 8 изображена картина продольного распределения электрической составляющей ВЧ поля в биконическом резонаторе.

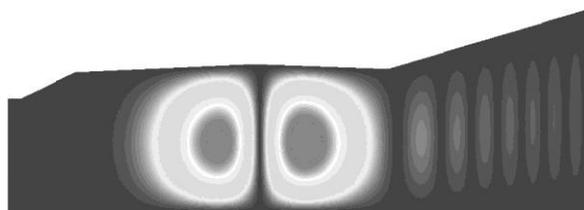


Рис. 8. Картина продольного распределения электрической составляющей ВЧ электромагнитного поля в резонаторе биконического типа

Fig. 8. Longitudinal distribution of the electrical component of the RF electromagnetic field in a biconical cavity

Уровень собственной добротности равен $Q = 4000$. Питч-фактор равен $q = 1,84$, а рабочий ток составляет $\sigma = 0,0000588$ ($I = 79$ мА). Как следует из рис. 8, в резонаторе биконического типа ведущая мода имеет двугорбый профиль, что дает возможность провести параллель с двухкаскадным гироклистроном. Коэффициент полезного действия исследуемого биконического резонатора составляет 42 %. Из этого можно сделать вывод, что биконический резонатор имеет более высокий КПД по сравнению с регулярным резонатором, но уступает по коэффициенту полезного действия гиротрону с коническим профилем.

Заключение

В данной работе проведено исследование влияния типа профиля резонатора гиротрона на его коэффициент полезного действия. Сделаны выводы, что можно добиться более высоких показателей КПД (50 %) с помощью резонатора конического типа. По результатам сравнения трех исследуемых вариантов профиля гиротрона видно, что наименее эффективным является профиль регулярного типа, так как он позволил достичь уровня КПД лишь в 23 %. Средним вариантом по КПД является биконический профиль резонатора. Его КПД получился равным 42 %. Использование гиротрона конического типа с рекуперацией на коллекторе поможет достичь КПД в 80 %. Результаты данной работы могут быть использованы при создании эффективных гиротронов для спектроскопии, диагностики различных сред и для технологических нужд.

Список литературы

1. Thumm M. State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers. *KIT Scientific Reports* 7717. 2015; 174. DOI: 10.5445/KSP/1000055471.
2. Savilov A.V., Glyavin M.Yu., Philippov V.N. The multi-mode gyrotron. *Physics of plasmas*. 2011;18(10): 104502-104502-4. DOI: 10.1063/1.3644490.
3. Zavol'skiy N.A., Zapevalov V.E., Moiseev M.A., Sedov A.S. Influence of axial misalignment of the electron beam and cavity on the gyrotron parameters. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2011;54:402-408. DOI: 10.1007/s11141-011-9300-x.
4. Zapevalov V.E., Evolution of the gyrotrons. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2012;54:8-9. DOI: 10.1007/s11141-012-9326-8.
5. Chen N.C., Yu C.F., Yuan C.P., Chang T.H. A mode-selective circuit for TE01 gyrotron backward-wave oscillator with wide-tuning range. *Applied Physics Letters*. 2009;94:101501. DOI: 10.1063/1.3097236.
6. Chang T.H., Yu C.F., Hung C.L., and etc. W-band TE01 gyrotron backward-wave oscillator with distributed loss. *Physics of Plasmas*. 2008;15(7):5073105 (1-6). DOI: 10.1063/1.2950305.
7. Du C-H, Qi X-B, Liu P-K. Theory and experiment of a W-band tunable gyrotron oscillator. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2014;61(6): 1781-1788. DOI: 10.1109/TED.2013.2294689.
8. Колосов С.В., Зайцева И.Е. Компьютерная программа GYRO-K для разработки и проектирования гирорезонансных приборов СВЧ. *СВЧ электроника*. 2017;2:46-48.
9. Свешников А.Г. К обоснованию метода расчета распространения электромагнитных колебаний в нерегулярных волноводах. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 1963;3(2):314-326. DOI: 10.1016/0041-5553(63)90027-2.
10. Колосов С.В., Кураев А.А., Сенько А.В. Уравнения возбуждения нерегулярных волноводов с конечной проводимостью стенок. *Техника и приборы СВЧ*. 2009;2:8. DOI: 10.15407/rej2015.02.068.

References

1. Thumm M. State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers. *KIT Scientific Reports* 7717. 2015; 174. DOI: 10.5445/KSP/1000055471.
2. Savilov A.V., Glyavin M.Yu., Philippov V.N. The multi-mode gyrotron. *Physics of plasmas*. 2011;18(10): 104502-104502-4. DOI: 10.1063/1.3644490.
3. Zavol'skiy N.A., Zapevalov V.E., Moiseev M.A., Sedov A.S. Influence of axial misalignment of the electron beam and cavity on the gyrotron parameters. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2011;54:402-408. DOI: 10.1007/s11141-011-9300-x.
4. Zapevalov V.E. Evolution of the gyrotrons. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2012;54:8-9. DOI: 10.1007/s11141-012-9326-8.
5. Chen N.C., Yu C.F., Yuan C.P., Chang T.H. A mode-selective circuit for TE₀₁gyrotron backward-wave oscillator with wide-tuning range. *Applied Physics Letters*. 2009;94:101501. DOI: 10.1063/1.3097236.
6. Chang T.H., Yu C.F., Hung C.L., and etc. W-band TE₀₁ gyrotron backward-wave oscillator with distributed loss. *Physics of Plasmas*. 2008;15(7):5073105(1-6). DOI: 10.1063/1.2950305.
7. Du C-H, Qi X-B, Liu P-K. Theory and experiment of a W-band tunable gyrotron oscillator. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2014;61(6):1781-1788. DOI: 10.1109/TED.2013.2294689.
8. Kolosov S.V., Zaitseva I.E. [GYRO-K computer program for the development and design of microwave gyroresonance devices]. *SVCH elektronika = Microwave electronics*. 2017;2:46-48. (In Russ.)
9. Sveshnikov A.G. [To the justification of the method for calculating the propagation of electromagnetic waves in irregular waveguides]. *Jurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki = Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1963;3(2):314-326. DOI: 10.1016/0041-5553(63)90027-2. (In Russ.)
10. Kolosov S.V., Kuraev A.A., Sen'ko AV. [Microwave equipment and devices]. *Technika i pribory SVCH = Microwave Equipment and Instruments*. 2009;2:8. DOI: 10.15407/rej2015.02.068. (In Russ.)

Вклад авторов

Колосов С.В. поставил задачу по повышению электронного КПД в гиротронах путем фазовой группировки электронного потока в слабом нарастающем ВЧ электромагнитном поле и отбора энергии у электронного потока в сильном резко спадающем поле при использовании конусообразных резонаторов.

Зайцева И.Е. произвела расчеты гиротронов с конусообразными резонаторами по программе GYRO-K и показала, что такие гиротроны позволяют повысить КПД с 23 до 50 %.

Authors contribution

Kolosov S.V. has set the task of increasing the electronic efficiency in gyrotrons by phase grouping the electron beam in a weak increasing RF electromagnetic field and taking energy from the electron beam in a strong sharply decaying field, which can be done using cone-shaped resonators.

Zaitseva I.E. performed calculations of gyrotrons with cone-shaped resonators using the GYRO-K program and showed that such gyrotrons can increase the efficiency from 23 to 50 %.

Сведения об авторах

Колосов С.В., д.ф.-м.н., профессор кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Зайцева И.Е., ассистент кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Kolosov S.V., D.Sci., Professor of Department of computational methods and programming of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Zaitseva I.E., assistant of Department of computational methods and programming of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
+375-17-293-89-56;
e-mail: kolosov@bsuir.by
Колосов Станислав Васильевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-89-56;
e-mail: kolosov@bsuir.by
Kolosov Stanislav Vasilyevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-23-29>

Оригинальная статья
Original paper

UDC 004.934.5

AN EFFICIENT SPEECH GENERATIVE MODEL BASED ON DETERMINISTIC/STOCHASTIC SEPARATION OF SPECTRAL ENVELOPES

MOSTAFA TAHA, ELIAS S. AZAROV, DENIS S. LIKHACHOV, ALEXANDER A. PETROVSKY

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 03 June 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The paper presents a speech generative model that provides an efficient way of generating speech waveform from its amplitude spectral envelopes. The model is based on hybrid speech representation that includes deterministic (harmonic) and stochastic (noise) components. The main idea behind the approach originates from the fact that speech signal has a determined spectral structure that is statistically bound with deterministic/stochastic energy distribution in the spectrum. The performance of the model is evaluated using an experimental low-bitrate wide-band speech coder. The quality of reconstructed speech is evaluated using objective and subjective methods. Two objective quality characteristics were calculated: Modified Bark Spectral Distortion (MBSD) and Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ). Narrow-band and wide-band versions of the proposed solution were compared with MELP (Mixed Excitation Linear Prediction) speech coder and AMR (Adaptive Multi-Rate) speech coder, respectively. The speech base of two female and two male speakers were used for testing. The performed tests show that overall performance of the proposed approach is speaker-dependent and it is better for male voices. Supposedly, this difference indicates the influence of pitch highness on separation accuracy. In that way, using the proposed approach in experimental speech compression system provides decent MBSD values and comparable PESQ values with AMR speech coder at 6,6 kbit/s. Additional subjective listening tests demonstrate that the implemented coding system retains phonetic content and speaker's identity. It proves consistency of the proposed approach.

Keywords: speech generative model, harmonic plus noise model, speech analysis, speech coding.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Taha M., Azarov E.S., Likhachov D.S., Petrovsky A.A. An efficient speech generative model based on deterministic/stochastic separation of spectral envelopes. Doklady BGUIR. 2020; 18(2): 23-29.

Introduction

Contemporary speech synthesis algorithms have made a great leap forward due to developing of artificial neural networks. Now it is possible to synthesize high-quality speech using WaveNet algorithm [1] or one of the wide range of similar solutions [2, 3]. One of the drawbacks, however, is high computational complexity of these algorithms that can reach tens of billions of floating-point operations per second (GFLOPS) which requires using high-end GPUs. A much more efficient solution LPCNet has been reported recently [4], however, it requires around 2.8 GFLOPS which is still very high compared to conventional parametric methods. The crucial part of the synthesis is the problem of transforming amplitude spectrum or amplitude spectral envelope into waveform. The classical solution to the problem was proposed by Griffin and Lim known as Griffin/Lim

algorithm [5]. The algorithm has less computational requirement, however, it is very sensitive to hop size, requires amplitude spectrum and does not work with amplitude spectral envelopes.

In the present paper an efficient algorithm is proposed for speech waveform generation from its amplitude spectral envelopes. The algorithm utilizes Harmonic plus Noise Model (HNM) and statistical deterministic/stochastic separation of the envelopes. The main idea behind the approach originates from the fact that speech signal has a determined spectral structure that is statistically bound with deterministic/stochastic energy distribution in the spectrum. The separation function is estimated through a training procedure that involves fitting of data obtained through instantaneous harmonic analysis and short time spectrum.

The flexible HNM synthesis where the deterministic part accounts for the periodic (harmonic) structure of the signal and the stochastic models its noise part was presented in [6, 7]. The model has been successfully applied to a number of different speech applications: speech coding, text to speech synthesis, voice conversion and other. The main benefits of the model can be shortly listed as follows:

- explicit control over prosodic features of the speech that is a benefit in text to speech synthesis and voice conversion;
- efficiency of the representation;
- high quality speech reconstruction.

However, harmonic parameters estimation is pitch-based. It means that the method is extremely sensitive to pitch estimation errors. Pitch estimation itself is a fundamental problem of speech analysis that does not have an ultimate solution yet. The estimation is prone to errors especially for transitional (partially voiced) speech sounds. Inaccuracy of harmonic parameters values causes audible artifacts in reconstructed speech. Majority of the mentioned speech processing applications require estimation of harmonic spectral envelopes rather than parameters of individual harmonics. This is also true for stochastic part of the signal that is usually estimated as difference between source and harmonic signals in time domain and then represented by spectral envelopes (e. g. using all-pole filter).

The performance of the proposed speech generation algorithm is evaluated using an experimental low bitrate wide-band speech coder. The quality of reconstructed speech is rated using objective and subjective methods.

Overview of the method

Deterministic/stochastic spectrum separation of a speech signal is carried out using separation function that is determined through a training procedure using a speech data corpus. The training process illustrated in Fig. 1 involves the following steps:

1. Speech data is analyzed using instantaneous harmonic analyzer [8] and separated into deterministic and stochastic parts.
2. Harmonic spectral envelopes are calculated using interpolation from instantaneous harmonic parameters; noise spectral envelopes are calculated from stochastic part using short-time Fourier transform (STFT).
3. Short-time spectra are calculated from the source signal and transformed into spectral envelopes.
4. The separation function is estimated that minimizes quadratic error of separated spectra.

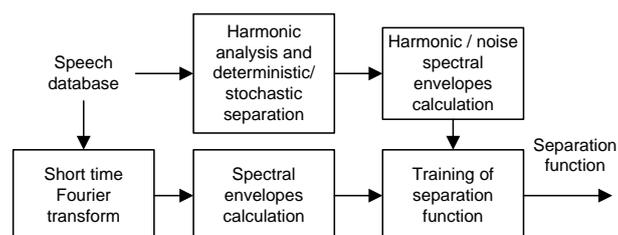


Fig. 1. Training of separation function

During harmonic analysis speech frames are classified either as voiced or unvoiced. Unvoiced frames are modeled as pure stochastic signals.

The spectrum separation process illustrated in Fig. 2 consists of the following steps:

1. Short-time Fourier transform of the frames are calculated.
2. Short-time spectrum envelopes are calculated from short-time spectra.
3. Spectrum envelopes are separated into harmonic and noise envelopes using separation function.

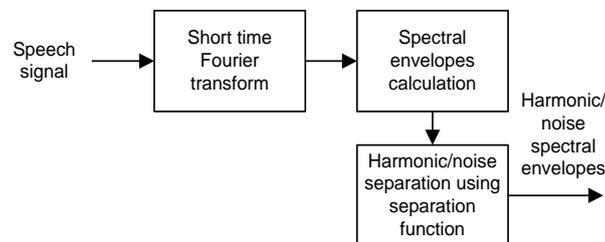


Fig. 2. Stochastic/deterministic separation of speech spectrum

The spectrum separation process is quite simple while the training process requires implementation of complex algorithms: pitch estimation, harmonic analysis and training.

Estimation of instantaneous harmonic parameters

The hybrid deterministic/stochastic model assumes that the signal $s(n)$ can be expressed as the sum of its periodic and noise parts:

$$s(n) = \sum_{k=1}^K MAG_k(n) \cos \varphi_k(n) + r(n),$$

where $MAG_k(n)$ – the instantaneous magnitude of the k -th sinusoidal component, K is the number of components, $\varphi_k(n)$ is the instantaneous phase of the k -th component and $r(n)$ is the stochastic part of the signal. Instantaneous phase $\varphi_k(n)$ and instantaneous frequency $f_k(n)$ are related as follows:

$$\varphi_k(n) = \sum_{i=0}^n \frac{2\pi \cdot f_k(i)}{F_s} + \varphi_k(0),$$

where F_s is sampling frequency and $\varphi_k(0)$ is the initial phase of the k -th component. The harmonic model states that frequencies $f_k(n)$ are integer multiples of the fundamental frequency $f_0(n)$ and can be calculated as: $f_k(n) = kf_0(n)$.

The harmonic model is often used in speech coding since the instantaneous harmonic parameters $MAG_k(n)$, $f_k(n)$ and $\varphi_k(0)$ represent voiced speech in a highly efficient way.

Instantaneous harmonic parameters are calculated using the technique based on analysis filters [3]. Filter bands are recalculated for each frame of the signal using estimated pitch values. Given a speech frame, multiplied by a window function $s(n)$, $0 \leq n \leq N-1$ and a filter passband specified by center frequency contour $F_c(n)$ and bandwidth $2F_\Delta$, instantaneous magnitude $MAG(n)$, phase $\varphi(n)$ and frequency $f(n)$ are calculated as:

$$MAG(n) = \sqrt{A^2(n) + B^2(n)},$$

$$\varphi(n) = \arctan\left(\frac{-B(n)}{A(n)}\right),$$

$$f(n) = \frac{\varphi(n+1) - \varphi(n)}{2\pi} F_s,$$

where

$$A(n) = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{s(i)F_s}{2\pi(n-i)F_\Delta} \sin\left(\frac{2\pi(n-i)}{F_s} F_\Delta\right) \cos\left(\frac{2\pi}{F_s} \varphi_c(n, i)\right),$$

$$B(n) = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{-s(i)F_s}{2\pi(n-i)F_\Delta} \sin\left(\frac{2\pi(n-i)}{F_s} F_\Delta\right) \sin\left(\frac{2\pi}{F_s} \varphi_c(n, i)\right),$$

$$\varphi_c(n, i) = \begin{cases} \sum_{j=n}^i F_c(j), & n < i \\ -\sum_{j=i}^n F_c(j), & n > i \\ 0, & n = i. \end{cases}$$

Central frequencies of the filter bands are calculated as instantaneous pitch multiplied by number of the respective harmonic $F_c^k(n) = kf_0(n)$:

$$f_0(n) = \sum_{i=0}^K \frac{f_i(n)MAG_i(n)}{(i+1)\sum_{j=0}^k MAG_j(n)}.$$

The procedure goes from the first harmonic to the last, adjusting fundamental frequency at every step. The fundamental frequency recalculation formula can be written as follows:

The fundamental frequency values become more precise while moving up the frequency range. It allows making proper analysis of high order harmonics with significant frequency modulations.

Harmonic envelopes are calculated from instantaneous harmonic parameters using linear interpolation. The deterministic part of the signal is synthesized using estimated harmonic parameters and subtracted from the source signal frame in order to obtain residual. The residual (stochastic) part of the signal $r(n)$ is parameterized as a bark-band noise. The noise envelopes are calculated as energies of the signal in bark subbands. After applying the parameterization technique, the speech signal is represented as a set of instantaneous harmonic envelopes, short-time noise envelopes and a pitch contour.

Estimation of energy separation function

Let us denote spectral envelope vector estimated through STFT as $E(e_1, e_2, \dots, e_m)$ and harmonic/noise envelopes estimated using harmonic analysis technique as $H(h_1, h_2, \dots, h_m)$ and $V(v_1, v_2, \dots, v_m)$, respectively. Assuming that the separation function can be expressed in terms of linear regression, it can be estimated by use of least-squares method minimizing the following functions:

$$Er_h = \sum_{l=1}^L (E_l^T \alpha - H_l)^2, \quad Er_n = \sum_{l=1}^L (E_l^T \beta - V_l)^2,$$

where Er_h and Er_n – harmonic and noise estimation errors, respectively, L – training sequence length, α and β – $m \times m$ matrices of regression coefficients for harmonic and noise parts, respectively; T stands for transposition. Evaluation of α and β matrices is carried out independently.

The envelopes E_l are estimated as decimal logarithm of the energy values. The length of the vector E corresponds to the number of spectrum bands where the energy of the signal is calculated. The experiments show that the best result is achieved when these bands are not uniform. A relatively good result was obtained for bark scale – the average squared error was 0.07 per harmonic/noise vector value for multi-speaker speech database. Fig. 3 illustrates an example of bark-band spectrum envelopes separation into deterministic and stochastic parts. The possibility of speech reconstruction from its bark-band energy envelopes and pitch contour can be especially useful in speech coding.

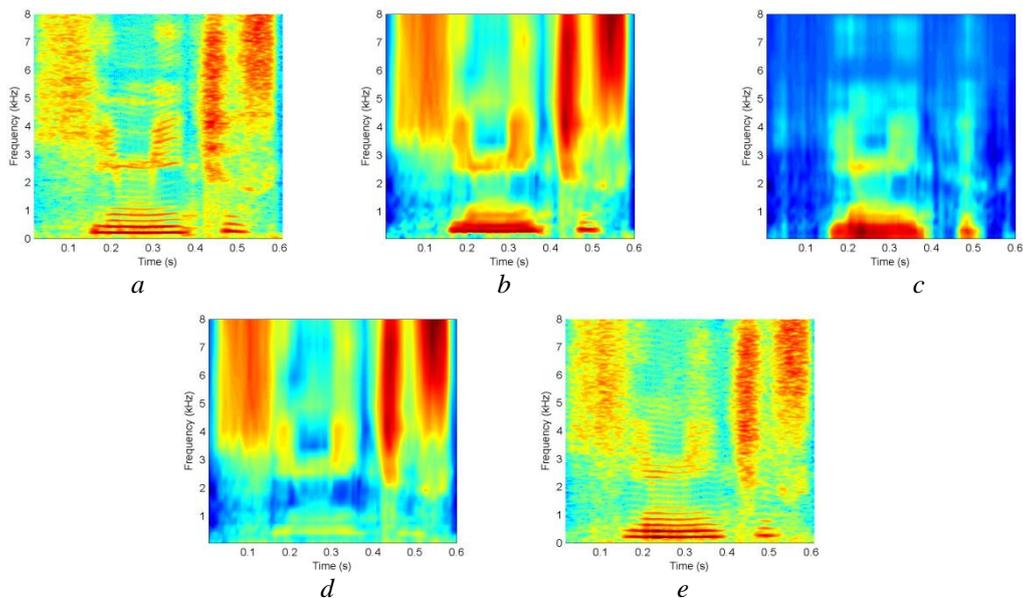


Fig. 3. An example of speech signal reconstruction from its bark-band energy envelopes using spectrum separation: source speech signal (a); bark-band energy envelopes (b); estimated harmonic envelopes (c); estimated noise envelopes (d); reconstructed signal (e)

Experimental results

In order to evaluate applicability of the method to speech compression experimental speech coding systems for narrow- and wide-band speech were implemented. The encoding/decoding processes are illustrated in Fig. 4. The distinguishing feature of the coding scheme is that harmonic/noise separation is done at the decoding phase. The input of the decoder consists of quantized bark-band energy values and pitch contour. The energy values are obtained using 1024-point short-time Fourier transform (512-point for narrow-band version) and combined in bark-band envelope vectors. The envelopes are calculated with 10ms time offset. Pitch values are estimated using analysis filters as was reported in [3].

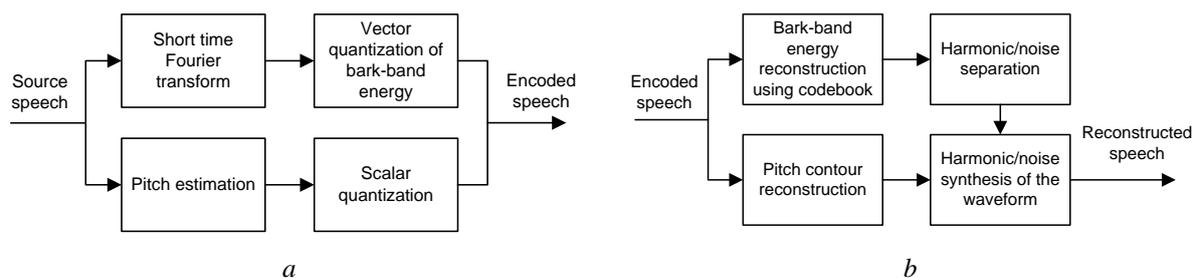


Fig. 4. Speech compressing scheme: encoding (a); decoding (b)

Quantization of energy values is made using common vector quantization technique. Each wide-band energy vector $E(e_1, e_2, \dots, e_{21})$ is split into three separate vectors $E_1(e_1, \dots, e_9)$, $E_2(e_{10}, \dots, e_{17})$ and $E_3(e_{18}, \dots, e_{21})$ that are quantized using different codebooks. The codebooks were trained on multi-speaker speech material (with duration about 10 minutes) through standard K -means algorithm. The sequence of energy envelopes is reconstructed in the decoder and their harmonic/noise separation is carried out using separation function. The function was trained using the same training speech material. The coding scheme is very efficient and can be implemented using a non-uniform filter bank [4].

Performance of the proposed speech coder was evaluated using objective measures of speech quality. The two following quality characteristics were calculated: Modified Bark Spectral Distortion (MBSD) and Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ). Proposed narrow-band solution was

compared with MELP (Mixed Excitation Linear Prediction) speech coder and wide-band version was compared with AMR (Adaptive Multi-Rate) speech codec. The speech base used for testing contained sentences pronounced by four different speakers (two male and two female speakers whose speech was not used during training). The average obtained values are presented in Tables 1, 2 (proposed speech coding system is labeled as ‘joint coding’).

Table 1. Objective quality of narrow-band speech coding, $F_s = 8$ kHz

Coder / bitrate (kbit/s)	MBSD		PESQ	
	Male	Female	Male	Female
MELP / 2.4	0.19	0.25	3.04	2.98
Joint coding / 2.4	0.81	0.93	2.40	2.31

Table 2. Objective quality of wide-band speech coding, $F_s = 16$ kHz

Coder / bitrate (kbit/s)	MBSD		PESQ	
	Male	Female	Male	Female
AMR / 6,6	0.51	0.58	3.42	3.47
Joint coding / 6.6	0.26	0.49	3.02	2.75
Joint coding / 4.4	0.32	0.59	2.93	2.69
Joint coding / 2.4	0.81	0.97	2.31	2.25

Considering that accuracy of deterministic/stochastic spectrum decomposition might be speaker-dependent average results are calculated for male and female voices separately.

The objective quality tests show that overall performance of the proposed approach is speaker-dependent. It can be seen from the presented results demonstrating that the quality of reconstructed speech is better for male voices. Supposedly, this difference indicates influence of pitch highness on separation accuracy. The experimental speech compression system provides decent MBSD values and comparable PESQ values with AMR codec at 6,6 kbit/s (it is the lowest bitrate possible for a free AMR encoder used in the experiments).

Additional subjective listening tests were carried out as well. The quality of signal reconstruction was compared in the following pairs: AMR 6.6 – joint coding 6.6 and MELP 2.4 – joint coding 2.4. Twenty different sentences were chosen and played back in random order. Five listeners were asked to rate which sentence from the pair sounded more natural. The proposed encoder was chosen in about 40 percent of cases for wide-band speech and in 35 percent of cases for narrow-band speech. All listeners approved that the implemented coding system retains phonetic content and speaker’s identity at every bitrate that proves consistency of the proposed approach.

Conclusion

A model for speech generation from its spectral amplitude envelopes has been proposed. The model involves deterministic/stochastic decomposition that is carried out using separation function without conventional harmonic analysis. The separation function is represented as a matrix of linear regression coefficients and evaluated using least-squares method. Training sequence contains harmonic and noise envelopes estimated via instantaneous harmonic analysis. The method has been experimentally applied to speech coding. The quality of reconstructed signal has been rated using objective and subjective methods. The obtained results show high potential of the presented approach.

Authors contribution

Taha M. realized the speech modeling.

Azarov E.S. designed the structure of the proposed approach.

Likhachov D.S. developed the experimental speech coding systems.

Petrovsky A.A. performed the statement of the problem and coordination.

References

1. A. van den Oord, Dieleman S., Zen H., Simonyan K., Vinyals O., Graves A., Kalchbrenner N., Senior A., Kavukcuoglu K. WaveNet: A generative model for raw audio, arXiv:1609.03499, 2016.
2. Shen J., Pang R., Weiss R. J., Schuster M., Jaitly N., Yang Z., Chen Z., Zhang Y., Wang Y., Skerrv-Ryan R. "Natural TTS synthesis by conditioning WaveNet on mel spectrogram predictions," in Proc. International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), 2018:4779-4783.
3. Arik S., Diamos G., Gibiansky A., Miller J., Peng K., Ping W., Raiman J., and Zhou Y. Deep voice 2: Multi-speaker neural text-to-speech. arXiv:1705.08947, 2017.
4. Valin J.-V., Skoglund J. LPCNet: Improving neural speech synthesis through linear prediction, arXiv:1810.11846
5. Griffin D., Lim J. A new model-based speech analysis/synthesis system. In Proc. International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), 1985;10:513-516.
6. Laroche J., Stylianou Y., Moulines E.. HNS: Speech modification based on a harmonic+noise model. Proceedings of the ICASSP-93 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1993;2:550-553.
7. Serra X. *Musical sound modeling with sinusoids plus noise. Musical Signal Processing* (C. Roads, S. Popea, A. Picialli, G. De Poli Eds.). Swets & Zeitlinger Publishers; 1997.
8. Azarov E., Petrovsky A. Instantaneous harmonic analysis for vocal processing. Proceedings of DAFx-09. Como, Italy, September 14; 2009.

Information about the authors

Taha M., Master of Sciences, PhD student of Computer Engineering Department of Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Azarov E.S., D.Sci., Professor of Computer Engineering Department of Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Likhachov D.S., PhD, Associate Professor of Computer Engineering Department of Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Petrioivsky A.A., D.Sci., Professor of Computer Engineering Department of Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics
tel. +375172938805;
e-mail: likhachov@bsuir.by
Likhachov Denis Sergeevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-30-36>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.9

УПРАВЛЕНИЕ ИНТЕРНЕТ-МАРКЕТИНГОМ В СИСТЕМЕ ОБРАЗОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГИЙ

ВИШНЯКОВ В.А., КАЧАН Д.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 20 апреля 2018

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Целью данной статьи является анализ методов, подходов, технологий, средств интернет-маркетинга (ИМ), использование как известных технологий, так и включение новых: интеллектуальных и блокчейн. Задачами статьи являются анализ проблем в ИМ и выявление тенденций его развития в цифровой экономике с использованием интеллектуальных и блокчейн-технологий, новых структурных решений, включая портал для поддержки образовательной деятельности в целом, планирования и поиска креативного персонала в частности. Проведен анализ применения технологий в маркетинговой деятельности (МД) с использованием облачных вычислений и определены ее особенности. Показаны отдельные ограничения МД в Интернете. Разработаны предложения по совершенствованию ИМ в интегрированной среде (традиционной сетевой и облачной) с применением интеллектуальных и блокчейн-технологий. Применение интеллектуальных технологий обработки маркетинговой информации и данных позволяет повысить качество и уровень отдачи маркетинговых информационных систем. Использование блокчейн-технологий уменьшит отрицательные субъективные вмешательства и повысит надежность хранения маркетинговой информации. Предложено развитие ИМ на базе семейства интеллектуальных агентов для развития интеллектуальных маркетинговых информационных систем (ИМИС). Показано использование технологии блокчейн в ИМ для контроля ресурсов, маркетинговых операций. Приведена новая концепция для развития ИМ и ИМИС, на базе которой предложена архитектура ИМИС в системе образования и представлена структура интеллектуального портала на базе многоагентной технологии, объединяющей подготовку выпускников вузов и колледжей и потребителей молодых специалистов по отраслям экономики.

Ключевые слова: интеллектуальные, блокчейн-технологии, маркетинговая деятельность, маркетинговая информационная система, инструментальная платформа, многоагентные технологии.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Вишняков В.А., Качан Д.А. Управление интернет-маркетингом в системе образования с использованием блокчейн-технологий. Доклады БГУИР. 2020; 18(2): 30-36.

MANAGEMENT OF INTERNET MARKETING IN EDUCATION SYSTEM WITH BLOCK CHAIN TECHNOLOGIES

ULADZIMIR A. VISHNIAKOU, DMITRY A. KACHAN

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 20 April 2018

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The purpose of this article is to analyze methods, approaches, technologies, and means of Internet marketing (IM), using both known and novel technologies: intelligent and blockchain ones. The objectives of the article are to analyze the problems in IM and identify the trends in ITS development in the digital economy using intelligent and block chain technologies, develop new structural solutions, including a portal to support educational activities in general, and plan and search for creative staff in particular. We have analyzed the application of technologies in marketing activities (MA) using cloud computing, determined features thereof and demonstrated some restrictions of MA on Internet. We have also developed the proposals for improving IM in an integrated environment (traditional network and cloud) using intelligent and block chain technologies. The use of intelligent technologies for processing marketing information allows improving the quality and level of return of marketing information systems. The use of block chain technologies will reduce negative subjective interventions and increase the reliability of storing marketing information. It is proposed to develop IM on the basis of a family of intelligent agents for the evolution of intelligent marketing information systems (IMIS). In the article one can see how block chain technology is applied in IM for controlling resources and marketing operations. A new concept for the development of IM and PMS has been presented whereby the IMIS architecture in the education system is proposed. In addition, we have presented the structure of an intellectual portal based on multi-agent technology that combines the training of university and college graduates and consumers of young professionals in economic sectors.

Keywords: intelligent, block chain technologies, marketing activities, integrated environment, marketing information system, tool platform, multi-agent technologies.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Vishniakou U.A., Kachan D.A. Management of Internet marketing in education system with blockchain technologies. Doklady BGUIR. 2020; 18(2): 30-36.

Введение

Идея необходимости создания маркетинговых информационных систем (МИС) зародилась в условиях рыночной экономики и впервые была озвучена в работе американских ученых [1], которая по праву считается отправной точкой формирования научного подхода применительно к расширению рынков сбыта. При разработке теории и практики МД сложилось противоречие: в одном – усиление внимания к использованию новых технологий, развитие международных стандартов, увеличение расходов на обеспечение средств маркетинга, в другом – недостаточная эффективность МД, о чем свидетельствуют публикуемые данные о проблемах и вызовах отечественной и мировой экономике [2].

Одним из решений этого противоречия является развитие методики и внедрение в МД интеллектуальных и блокчейн-технологий, включенных в приоритетные направления «Цифровой экономики» в Республике Беларусь. Анализ информации из интернет-ресурсов о состоянии, особенностях развития и качества услуг и иных экономических особенностей в мировой экономике и специфичных данных, отраженных в многочисленных источниках, позволяет получить новые знания. В результате можно спрогнозировать, смоделировать и предупредить развитие тех или иных отрицательных процессов. Применение интеллектуальных технологий при обработке маркетинговой информации и данных позволяет повысить качество и уровень отдачи МИС [3]. Использование блокчейн-технологий уменьшит

отрицательные субъективные вмешательства и повысит надежность хранения маркетинговой информации.

Проблемы интернет-маркетинга и их решения для МИС

Проблема применяемых инструментов. МИС осуществляют обработку разноплановых внутренних и внешних данных, определяя по ее результату изменения в текущую маркетинговую стратегию. Внутренние данные – это информация о самой компании, для которой осуществляется анализ. Внешние данные представляют собой информацию, получаемую из внешних источников на основе использования существующих методов и инструментов.

Одним из ценных источников внешних данных является веб-аналитика, предоставляющая информацию об активности пользователей в сети Интернет. Основными инструментами, применяемыми в веб-аналитике для оценки эффективности и анализа тенденций для электронных торговых площадок и интернет-ресурсов, являются Google Analytics и Яндекс.Метрика [3]. Эти инструменты предоставляют информацию о поведении потенциальных покупателей в сети Интернет, предоставляя отчеты об активности пользователей как на отдельных ресурсах, так и поисковую активность в целом.

В обществе растет обеспокоенность необходимостью предоставления персональных данных (ПД) для последующего их использования крупными корпорациями, такими как Google, Amazon, Yandex, Facebook, что выражается в постоянном ужесточении мер противодействия использованию ПД пользователей сети. Интернет-сообщество переживает изменение общественной парадигмы и, как следствие, нормативно-правового регулирования, определяющего внедрение новых моделей маркетинга, ориентированного на повышение доверия. Одной из таких моделей является использование блокчейн [4].

Проблема подтверждения достоверности источников данных в сети блокчейн. Она заключается в том, блокчейн представляет собой реестры транзакций, определяющих изменение балансов счетов аккаунтов. Использование ряда возможностей публичных сетей Bitcoin и Ethereum позволяет дополнительно «сохранить» некоторые текстовые данные в реестрах, однако адреса аккаунтов, которые осуществляют транзакции, не указывают на реального владельца.

Для цели введения универсального механизма подтверждения владения данным адресом авторами предлагается использование реестра Международного регистрационного органа, в качестве которого выступает совместный орган Международного союза электросвязи ИТУ-T и Международной организации по стандартизации ISO, ответственного за назначение идентификаторов объектов верхнего уровня с первичным целочисленным значением 2.

Интеллектуализация функций маркетинга в облачной среде. Интеллектуальная среда для распределенной МД будет основываться на агентных технологиях. Обычный программный агент имеет три особенности: автономность, реакцию и коммуникабельность [5]. Эти агенты могут общаться с различными источниками: пользователями и заказчиками, другими агентами или объектами. Добавим к этому формулирование цели, планирование, хранение знаний, действия (обработка) на их базе, оптимизацию в процессе функционирования (самообучение) и получим компоненты интеллектуального агента (ИА) для МД. Облачные ИА образуют распределенную МИС, которая будет собирать данные, для их обработки использовать бизнес-аналитику, решать сложные задачи и реагировать на возникающие события [6]. Для включения в состав разрабатываемой ИМИС предложено использовать следующие концепции и сервисы [6–8].

Сервис «B2B.FileCloud» передает информацию о товарах в среду социальных сетей (СС). Программа отслеживает любые изменения номенклатуры и вносит их в СС. Для получения подробной информации по ценам товаров используется сервис «Z-price». С помощью этого приложения можно сравнить цены конкурентов с ценами своей продукции. При использовании сервиса «Ahrefs» можно получить данные о количестве обратных ссылок на сайты конкурентов, количестве ссылающихся страниц, IP-адресов и т. д. Сервис «Rooke» позволяет выполнять SEO-анализ сайта конкурентов, он полезен для анализа основных фраз и контента в целом. Этот сервис позволяет: анализировать тексты, которые используются

конкурентами при продвижении продукции; понять, почему данный сайт находится вверху поисковых запросов; получать оценочные показатели трафика и контекстной рекламы. Сервис «Zipline» используется для анализа средств коммуникаций в СС Twitter и Instagram, он отслеживает ключевые слова через указанные СС в режиме реального времени. С помощью этого сервиса можно быстро реагировать на изменения запросов пользователей и рекламировать свои товары или услуги.

Для достижения лучшего эффекта отдельные сервисы из вышеперечисленных лучше использовать вместе. Так, сервис «Tweriod» позволяет определить оптимальный срок для отправки сообщений (большое количество пользователей находятся в сети), а сервис «Buffer», наоборот, помогает задержать отправку сообщений. Интегрируя их вместе, можно гарантировать, что сообщения получит большая аудитория потенциальных пользователей.

Построение интеллектуальной маркетинговой системы

Организация ИМ в облачной среде. Для развития ИМ в среде облачных вычислений (ОВ) с использованием блокчейн введем две инновации. Первая связана с маркетинговыми операциями, которые осуществляются в четырех связанных плоскостях: поставщики материалов и комплектации (прямые закупки), поставщики производственных ресурсов (непрямые закупки), партнеры, клиенты [9]. Применение блокчейн повысит достоверность маркетинговых исследований, основанных на обработке big data, полученных из реестров блокчейн (данные о рейтингах, рекламациях, исполнении/ненадлежащем исполнении/неисполнении умных контрактов и др.). Также может быть получена информация о наличии необходимых сертификатов на продукцию, периоде деятельности организации, ее компетенциях, наличии лицензий, экономической активности и пр.

Получение данных осуществляется путем парсинга – синтаксического анализа данных реестров с формированием базы данных по интересующим запросам. Данный подход позволяет формировать узкоспециализированные поисковые запросы в реестре транзакций. Преимуществом подхода является возможность получения данных без ограничений со стороны программного обеспечения, отвечающего за предотвращение DDOS-атак, принимающего многократные запросы с одного адреса за угрозу информационной безопасности. Обязательным условием возможности подобной реализации маркетинговых исследований является известный публичный адрес организации в сети блокчейн, что предложено выше решать посредством универсального OID-идентификатора.

Среди возможных механизмов реализации синтаксического многопоточного поиска для целей проведения маркетингового исследования можно определить инструменты самостоятельной разработки (оптимальное решение использования языка программирования Python и импорт библиотек BeautifulSoup и requests с последующим синтаксическим анализом содержания контрольной страницы) либо использовать облачные платформы, разработанные для парсинга данных. Среди них можно выделить Import.io, Webhose.io, Dexi.io, Scrapinghub, ParseHub [9].

Вторая инновация интернет-маркетинга связана с эффективностью рекламы и ее совершенствованием в реальном времени. Выделим два направления – оптимизация расходов на рекламные кампании и повышение эффективности и таргетирование рекламы. Блокчейн позволит определять наиболее эффективные рекламные стратегии на основании данных реестров, подтверждающих эффективность тех или иных методов, основанных на подтвержденных данных (посещаемость, цитируемость, эффективность так называемых «лидеров мнений»). Из преимуществ данного подхода можно выделить прозрачность ценообразования стоимости рекламной кампании, прогнозируемые результаты и, при использовании умных контрактов, отсутствие посредников. Второе направление использования блокчейн заключается в возможности соглашения рекламодателя и потенциального потребителя рекламы, при котором потребитель взамен на просмотренные рекламные интеграции получает некоторое количество криптовалютных токенов на свой счет. К примеру, подобная интеграция введена в web-браузер Brave и поддерживается для жителей Североамериканского региона. Дополнительно могут использоваться стимулирующие

действия со стороны рекламодателя по отношению к потребителям рекламы в виде оплаты за ряд действий: предоставление неявных данных (возможность обработки психофизических и поведенческих признаков потребителей); явных данных (персональные данные, бюджетное планирование); создание контента, выгодного рекламодателю; социологические опросы относительно планируемой к выпуску продукции на ранних стадиях для уточнения спроса.

В работе [10] выполнен анализ и предложены решения в области интеллектуального управления, рассмотрены тенденции его развития. Перенесем эти предложения на МД, в результате получим перечень критериев, которым должна удовлетворять проектируемая интеллектуальная МИС, работающая в интегрированной среде:

- многоуровневость наблюдения за средой, ИМИС должна собирать сведения о состоянии рынка из различных источников на разных уровнях наблюдения;
- адаптивность, ИМС способна обнаруживать известные и новые инновации рынка;
- проактивность, система обладает встроенными механизмами реакции на инновацию;
- открытость, ИМС добавляет модули либо агентов для функционального расширения;
- двухуровневость управления, система должна совмещать как централизованное, так и распределенное управление;
- защищенность, включает средства защиты пользователей и компонентов системы.

Решения по архитектуре ИМИС основываются на использовании многоагентной системы (МАС):

- состав МАС обнаружения инноваций включает агентов: товарных, ценовых, коммуникационных, исследователей рынка, позволяющих делать вывод о состоянии и тенденциях его развития;
- метод принятия агентами совместного решения, позволяющий сформировать его на основании анализа сведений, полученных из различных источников, оценить состояние рынка в целом и свести для контрактов заказчиков и потребителей;
- методика, позволяющая обучить МАС обнаружению инноваций и использовать ее для поддержки новых разработок (товаров, услуг).

Архитектура ИМИС включает ядро интеллектуализации (распределенную базу знаний на основе различных моделей их представления, интегрированные решатели, объединяющие различные политики вывода) и множество агентов: товарных, ценовых, маркетинговых исследований, коммуникационные, принятия решений. Применительно к задаче анализа рынка агенты исследований передают факты об изменениях внешней среды (цены, товары, конкуренты, потребители и т. д.) в базу знаний. В результате функционирования агентов-решателей формируется заключение об изменениях внешней среды, которое передается агенту-обработчику.

Структура ИМИС. Рассмотрим структуру распределенной ИМИС с использованием портала системы образования (ПСО) Республики Беларусь для удовлетворения в персонале для различных отраслей Республики Беларусь, которая работает с поддержкой интеллектуальных агентов и применением блокчейн-технологий (рис. 1).



Рис. 1. Структура распределенной системы итернет-маркетинга в образовании
Fig. 1. Structure of distributed intellectuale-marketing system in education

ПСО в своем составе имеет базу знаний, интеллектуальный решатель, подсистему объяснений, интерфейс $ИА_1...ИА_N$, редактор базы знаний, подсистему блокчейн. Интеллектуальные агенты $ИА_1...ИА_N$ сканируют сайты предприятий (для определения потребностей в специалистах) и сайты учреждений образования (данные о выпускниках) и формируют базу знаний портала для работодателей. Решатель находит совпадения и выдает предложения для требуемого персонала (даже с прогнозом), объединяя интересы предприятий и учебных заведений. В результате переговоров формируются умные контракты, которые поддерживаются технологией блокчейн. Эта же технология будет гарантировать и подлинность документов об образовании. Автоматизация проектирования этого портала может использовать семантическую технологию проекта ОСТИС, которая разработана в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники и эффективно используется на предприятиях Республики Беларусь [5, 11].

Заключение

Выявлены проблемы ИМ и предложены их решения с использованием блокчейн. Определены два направления интеллектуализации интернет-маркетинга в облачной среде. Первым направлением в построении ИМИС является разработка моделей, архитектур и программных средств для адаптации на цифровых рынках. Вторым направлением является проектирование облачной инструментальной платформы интеллектуальных систем на основе семантических технологий. Приведена структура ИМИС для интеграции экономики и образования.

Список литературы

1. Kohs D.F., Gud R.E. As to construct marketing information system. *Garvard business review*. 1987;45(3):145-154.
2. Давыдов В., Федоров М., Гавриков А. *Интернет маркетинг*. Москва: АСТ; 2018.
3. Вишняков В.А. *Информационное управление и безопасность: методы, модели, программно-аппаратные решения*. Минск: МИУ; 2014.
4. Свон М. Блокчейн. *Схема новой экономики*. Москва: Олимп-Бизнес; 2015.
5. Голенков, В.В., Елисеева О.Е., Ивашенко В.П. *Представление и обработка знаний в графодинамических ассоциативных машинах*. Минск: БГУИР; 2001.
6. Вишняков В.А. Развитие интеллектуального управления с использованием облачных технологий. *Информатика*. 2016;2:113-120.
7. Вишняков В.А., Казак Е.А. Модели бизнес-процессов поддержки деятельности интернет-маркетолога. *Экономика и управление*. 2016;3(47):3-7.
8. Вишняков В.А., Гондаг М.М., Моздурани М.Г. Концепция КИС с использованием облачных вычислений и их информационной безопасности. *Доклады БГУИР*. 2016;8:101-105.
9. Фингар П. *Облачные вычисления – бизнес-платформа XXI века*. Москва: Акварминовая книга; 2011.
10. Вишняков В.А. Использование интеллектуальных и блокчейн технологий в информационном управлении. *Системный анализ и прикладная информатика*. 2018;1:45-50.
11. Голенков В.В., Шункевич Д.В., Давыденко И.Т. Семантическая технология проектирования интеллектуальных решателей задач на основе агентно-ориентированного подхода. *Программные системы и вычислительные методы*. 2013;1:82-94.

References

1. Kohs D.F., Gud R.E. As to construct marketing information system. *Garvard business review*. 1987;45(3):145-154.
2. Davydov V., Fedorov M., Gavrikov A. [Internet marketing]. Moscow: AST; 2018:307. (In Russ.)
3. Vishnyakou U.A. [Information management and security: methods, models, software and hardware solutions]. Minsk: MIU; 2014. (In Russ.)
4. Swan M. [Blockchain. Scheme of the new economy]. Moscow: Olymp-Business; 2015.

5. Golenkov V.V., Eliseeva O.V., Ivashenko V.P. [*Knowledge representation and processing in graph dynamic associative computers*]. Minsk: BSUIR; 2001. (In Russ.)
6. Vishnyakou U.A. [Development of intelligent control by using cloud technologies]. *Informatics = Informatics*. 2016;2:113-120. (In Russ.)
7. Vishniakou U.A., Kazak E.A. [Support business processes of internet specialists activity]. *Economy and Control = Economy and Control*. 2016;3(47):3-7. (In Russ.)
8. Vishniakou U.A., Ghondschi M.M., Mosdurany M.G. [The concept of CIS using cloud computing and its information security]. *Doklady BGUIR=Doklady BSUIR*. 2016;8:101-105. (In Russ.)
9. Fingar P. [*Cloud computing – the business platform of the XXI century*]. Moscow: Aquamarine Book; 2011. (In Russ.)
10. Vishniakou U.A. [The use of intellectual and block chain technologies in the Information management]. *System analysis and applied Informatics = System analysis and applied Informatics*. 2018;1:45-50. (In Russ.)
11. Golenkov V.V., Shunkevich D.V., Davidenko I.T. [Design semantic technology of intelligent task calculators on the base of agent-oriented approach]. *Programming systems and computing methods = Programming systems and computing methods*. 2013;1:82-94. (In Russ.)

Вклад авторов

Вишняков В.А. предложил и детализировал два направления интеллектуализации интернет-маркетинга в облачной среде. Разработал структуру ИМИС для интеграции экономики и образования.

Качан Д.А. выявил проблемы ИМ и предложил их решения с использованием блокчейн, определил функции блокчейн в структуре ИМИС для интеграции экономики и образования.

Authors contribution

Vishniakou U.A. has proposed and detailed two directions of Internet marketing intellectualization in the cloud environment. He developed the IMIS framework for integrating the economy and education.

Kachan D.A. has identified IM problems and proposed solutions using block chain, defined the functions of block chain in the IMIS structure for integrating the economy and education.

Сведения об авторах

Вишняков В.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Качан Д.А., соискатель кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Vishniakou U.A., D.Sci., Professor, Professor of Infocommunication Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kachan D.A. PhD student of Infocommunication Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-85-19;
e-mail: vish2002@mail.ru
Вишняков Владимир Анатольевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-85-19;
e-mail: vish2002@mail.ru
Vishniakou Uladzimir Anatolievich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-37-44>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 54-31; 544.654

ФОРМИРОВАНИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСАЖДЕННОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ЛЕГИРОВАННОГО НИКЕЛЕМ ОКСИДА ЦИНКА

ЯНУШКЕВИЧ К.О., ЧУБЕНКО Е.Б., БОНДАРЕНКО В.П.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 1 октября 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Цель работы заключалась в исследовании закономерностей формирования электрохимическим методом пленок оксида цинка, легированных никелем, а также регистрации и исследовании спектров фотолюминесценции и рамановского рассеяния. Осаждение пленок оксида цинка, легированных никелем, проводилось методом электрохимического осаждения на подложки кремния марки ЭКЭС-0,01 (111). Осаждение проводилось из водных растворов нитратов цинка и никеля в гальваностатическом режиме в диапазоне плотностей тока от 5 до 20 мА/см² и времени осаждения от 5 до 30 мин. На лазерном Рамановском спектрометре SOL Instruments Confotec NR500 проведено исследование рамановского рассеяния на пленках легированного никелем оксида цинка. Анализ рамановских спектров показал, что увеличение катодной плотности тока осаждения приводит к возрастанию концентрации примеси в пленках. Регистрация спектров фотолюминесценции образцов проводилась на лазерном спектральном измерительном комплексе на основе монохроматора-спектрографа SOLAR ТП MS 7504i, где в качестве источника возбуждающего излучения использовалась монохроматическая линия с длиной волны 345 нм, выделенная из спектра ксеноновой лампы при помощи двойного монохроматора Solar ТП DM160. Исследование показало, что интенсивность излучения растет с увеличением толщины осажденной пленки, а положение максимумов полосы излучения, в видимом диапазоне длин волн, на спектрах фотолюминесценции, остается неизменным при заданной плотности тока, независимо от продолжительности процесса осаждения. Изменение величины плотности катодного тока приводит к сдвигу положения максимума спектра фотолюминесценции, что указывает на перестройку структуры дефектов и примесей в легированном полупроводнике, приводящую к изменению положения соответствующих уровней в запрещенной зоне материала.

Ключевые слова: оксид цинка, электрохимическое осаждение, тонкие пленки, фотолюминесценция, рамановская спектроскопия.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Данная работа выполнена в рамках задания 1.15 ГПНИ Республики Беларусь «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии».

Для цитирования. Янушкевич К.О., Чубенко Е.Б., Бондаренко В.П. Формирование и оптические свойства осажденного электрохимическим методом легированного никелем оксида цинка. Доклады БГУИР. 2020; 18(2): 37-44.

SYNTHESIS AND OPTICAL PROPERTIES OF Ni-DOPED ZnO GROWN BY ELECTROCHEMICAL DEPOSITION

KONSTANTIN O. YANUSHKEVICH, EUGENE B. CHUBENKO, VITALY P. BONDARENKO

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 1 Oktober 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. This paper is targeted at studying the patterns of deposition by electrochemical method of Ni-doped ZnO films, including registering and analyzing their photoluminescence and Raman scattering spectra. We have studied the electrochemical deposition of nickel-doped zinc oxide films on single-crystal silicon substrates from aqueous solutions of zinc and nickel nitrates. The deposition was conducted from aqua solutions of Zn and Ni nitrates in a standard double-electrode electrochemical cell in galvanostatic mode with the current density from 5 to 20 mA/cm² and deposition time from 5 to 30 min. The Raman scattering on nickel-doped zinc oxide films was examined via laser Raman spectrometer SOL Instruments Confotec NR500. The analysis of Raman spectra showed that an increase of cathodic current density deposition leads to an enhanced concentration of a doping agent in the films. Photoluminescence spectra of the samples were registered on a laser spectral measuring system based on monochromator-spectrograph SOLAR TII MS 7504i where a monochromatic line with the 345-nm wavelength, which was extracted from the spectrum of Xe-lamp by means of double monochromator Solar TII DM160, was used as the excitation source. The research demonstrates that the emission intensity increases with the thickness of the deposited film, and the position of maximums of the radiation line remains unchanged in a visible wavelength range and on photoluminescence spectra with fixed current density. The change in the density of the cathode current leads to a shift in the position of the photoluminescence spectra maximum, which indicates restructuring of defects and dopant atoms in the doped semiconductor, which in turn changes the position of the corresponding levels in the band gap of the material.

Keywords: zinc oxide, electrochemical deposition, thin films, photoluminescence, Raman scattering.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. This work was carried out in the scope of Assignment 1.15 of the State Program of Scientific Research of Republic of Belarus “Physical materials science, new materials and technologies”.

For citation. Yanushkevich K.O., Chubenko E.B., Bondarenko V.P. Synthesis and optical property of Ni-doped ZnO grow by electrochemical deposition. Doklady BGUIR. 2020; 18(2): 37-44.

Введение

Тонкопленочные покрытия из оксидов металлов являются обширной группой материалов современной микро- и наноэлектроники, наиболее востребованных в оптоэлектронных приборах, фотовольтаике и функциональной электронике. Оксид цинка представляет собой прямозонный полупроводник с большой шириной запрещенной зоны (3,37 эВ при 300 К) и высокой энергией связи экситонов (60 мэВ). Среди них оксид цинка (ZnO) и композитные материалы на его основе являются одними из наиболее перспективных и многофункциональных материалов благодаря уникальной совокупности электрических, оптических и химических свойств [1]. Будучи нетоксичным широкозонным полупроводником с высокой подвижностью электронов, ZnO является перспективным материалом для синтеза наноструктур и их последующего применения в солнечных элементах [2].

Значительно изменяются свойства и расширяется область применения ZnO при вводе в его объем атомов различных примесей. Легирование ZnO позволяет модифицировать и управлять его электрофизическими, оптическими и структурными свойствами. Установлено,

что исходное ферромагнитное состояние ZnO стабилизируется легированием переходными металлами железа, кобальта или никеля. С точки зрения практического применения имеется возможность реализации ферромагнетика с высокой температурой Кюри [3]. Наличие примесных атомов в структуре ZnO также существенно влияет на люминесцентные свойства полупроводника и позволяет управлять длиной волны излучаемого им света, уменьшать его удельное сопротивление, изменять спектры пропускания и поглощения.

Существует много различных способов получения тонких пленок ZnO, легированных примесями переходных металлов. Среди множества методов метод катодного электроосаждения из водных растворов отличается простотой, экономичностью и хорошим качеством получаемых пленок без использования более сложного вакуумного оборудования [4]. Кроме того, он позволяет проводить синтез и легирование пленок ZnO в едином процессе.

Основной задачей данной работы было исследование процесса электрохимического синтеза материалов на основе ZnO и никеля осаждением из водных растворов электролита, а также их оптических и структурных свойств для разработки технологии формирования функциональных покрытий для устройств опто- и магнитоэлектроники.

Методика проведения эксперимента

Формирование пленок ZnO проводилось методом электрохимического осаждения на подложках монокристаллического кремния марки ЭКЭС-0,01 с кристаллографической ориентацией (111). В качестве прекурсоров для осаждения ZnO и легирования его примесью никеля использовались водные растворы 0,1М нитрата цинка $Zn(NO_3)_2$ и 0,01М нитрата никеля $Ni(NO_3)_2$. Для очистки кремниевых подложек от органических загрязнений использовался насыщенный безводный раствор оксида хрома (VI) в концентрированной серной кислоте с последующей длительной промывкой в деионизованной воде. Далее подложки помещались на 5 мин в 4,5 % водный раствор плавиковой кислоты для удаления с их поверхности слоя оксида кремния.

Катодное осаждение ZnO проводилось в стандартной двухэлектродной электрохимической ячейке. В качестве рабочего электрода использовалась кремниевая подложка, в качестве вспомогательного – платиновая проволока. Процесс осаждения контролировался при помощи управляемого компьютером потенциогальваностата Metrohm Autolab PGSTAT 302N. Для осаждения использовался гальваностатический режим при плотностях тока 5–20 мА/см² и температуре электролита 80 °С.

Спектры фотолюминесценции регистрировались при комнатной температуре на лазерном спектральном измерительном комплексе на основе монохроматора-спектрографа SOLAR TII MS 7504i. Детектирование фотолюминесценции происходило цифровой камерой с кремниевой ПЗС матрицей. В качестве источника возбуждающего излучения использовалась ксеноновая лампа мощностью 1000 Вт, из спектра которой, при помощи двойного монохроматора Solar TII DM160, выделялась монохроматическая линия с длиной волны 345 нм.

Анализ химического состава и кристаллической структуры полученных пленок ZnO проводился методом рамановской спектроскопии на 3D-сканирующем лазерном Рамановском спектрометре SOL Instruments Confotec NR500, в котором в качестве источника возбуждающего излучения использовался лазер с длиной волны 473 нм.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены спектры рамановского рассеяния пленок легированного никелем ZnO, сформированных при различной плотности тока. Полученные зависимости показывают, что с увеличением плотности тока (j) и времени осаждения (t) толщина пленки увеличивается, о чем можно судить по увеличению интенсивности пиков ZnO и убыванию интенсивности пиков кремния.

Оксид цинка относится к материалам группы симметрии C_{6v}^4 и обладает шестью ветвями оптических фононов в точке Г (центре зоны Бриллюэна) $\Gamma = A_1 + E_1 + 2B_1 + 2E_2$. Фононные моды симметрии A_1 и E_1 полярны в точке Г и расщепляются на продольные (LO)

и поперечные (TO) оптические колебания. Неполлярные фононные моды симметрии E_2 имеют две частоты колебаний: $E_2(low)$, отвечающую колебаниям атомов кислорода и $E_2(high)$ – колебаниям атомов цинка. Моды B_1 – «немые моды» и не проявляются в оптических спектрах [5].

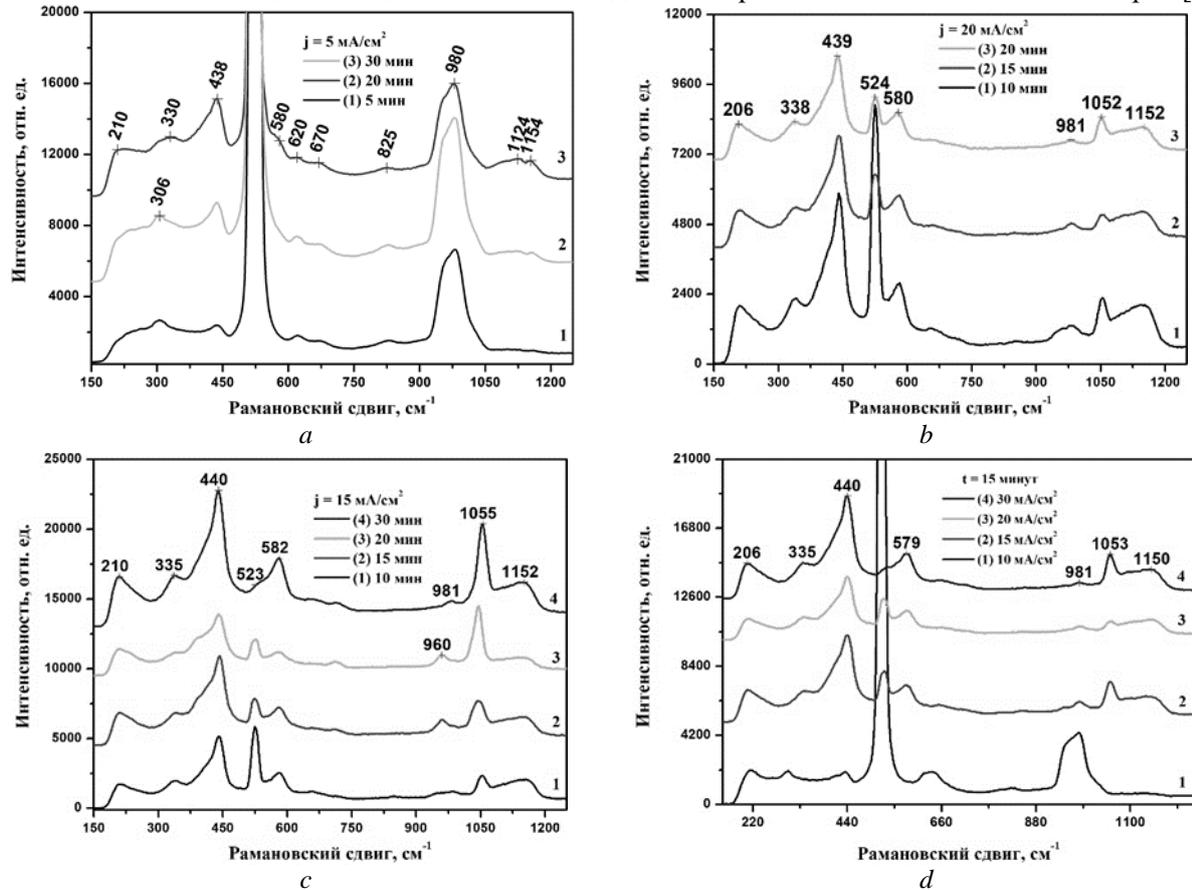


Рис. 1. Спектры рамановского рассеяния пленок легированного никелем ZnO, полученных электрохимическим методом: при постоянной плотности тока 5 (a), 15 (b), 20 (c) mA/cm^2 для различного времени осаждения; при постоянном времени осаждения 15 мин для различных плотностей тока (d)

Fig. 1. Raman spectra of Ni-doped ZnO films, grown by electrodeposition at constant current density of 5 (a), 15 (b), 20 (c) mA/cm^2 and constant depositing time of 15 minutes (d)

На всех полученных спектрах представлены полосы, соответствующие колебательным модам, характерным для кристаллических ZnO и кремния: $E_2(high)$ и $A_1(LO)$ ZnO, которые располагаются соответственно на частотах 440 и 580 cm^{-1} , моды с максимумами интенсивности при 206, 335 и 1040–1200 cm^{-1} , относящиеся к вибрациям второго порядка ZnO, и полосы с максимумами около 523, 620, 980 cm^{-1} , связанные с подложкой из монокристаллического кремния. Мода $E_1(LO)$ зависит от наличия и концентрации примесей и дефектов кристаллической решетки ZnO [6]. Интенсивный пик, расположенный около 440 cm^{-1} , соответствует неполярной моде $E_2(high)$ и указывает на то, что полученные пленки имеют гексагональную кристаллическую структуру типа вюрцита, наиболее характерную для ZnO. Увеличение интенсивности этого пика, по сравнению с пиками других колебательных мод, является показателем лучшего качества кристаллической структуры ZnO [7]. Доминирующее влияние на моду $E_2(high)$ оказывают колебания кислородных связей. Выраженная асимметрия обусловлена неупорядоченностью решетки, а также негармоническими фонон-фононными взаимодействиями [6]. Широкий пик, расположенный около 584 cm^{-1} , относится к колебательной моде $E_1(LO)$, которая характерна для объемного, тонкопленочного и нанокристаллического ZnO. В [8] сообщают, что положение максимума интенсивности пика полосы $E_1(LO)$ смещается с характерной для объемного материала частоты 591 cm^{-1} на 588 и 584 cm^{-1} для частиц размером 8,5 и 4 нм соответственно. Однако в [7] было отмечено, что сдвиг пика в сторону меньших частот не всегда соответствует именно такой размерности кристаллов, однако всегда связан с уменьшением размера кристаллитов ZnO. На всех

расположенных выше спектрах (рис. 1) наблюдается полоса $E_1(LO)$, максимум которой сдвинут на частоту 580 см^{-1} . Поэтому можно предположить, что осажденные пленки состоят из кристаллитов с размером около 10 нм.

Наличие колебательной моды с максимумом около 530 см^{-1} свидетельствует о наличии в составе пленки ZnO примеси никеля [9]. Однако использованный в качестве материала подложки монокристаллический кремний маскирует данную моду собственной модой (около 521 см^{-1}). Исключения составляют толстые пленки ZnO, в которых соответствующие кремнию колебательные моды уже не проявляются на спектрах рамановского рассеяния. С увеличением времени осаждения ZnO при постоянной плотности тока, а значит, и с увеличением количества сформированного осадка, интенсивность полосы с максимумом около 1050 см^{-1} возрастает, в то время как полоса с пиком 1150 см^{-1} постепенно сглаживается, что соответствует увеличению концентрации дефектов, создаваемых в кристаллической решетке ZnO ионами примеси (замещение атомов кислорода и/или цинка атомами никеля) с ростом толщины пленки [10]. Это указывает на увеличение относительной концентрации примеси никеля в составе пленки ZnO.

Спектры фотолюминесценции полученных тонких пленок ZnO:Ni представлены на рис. 2.

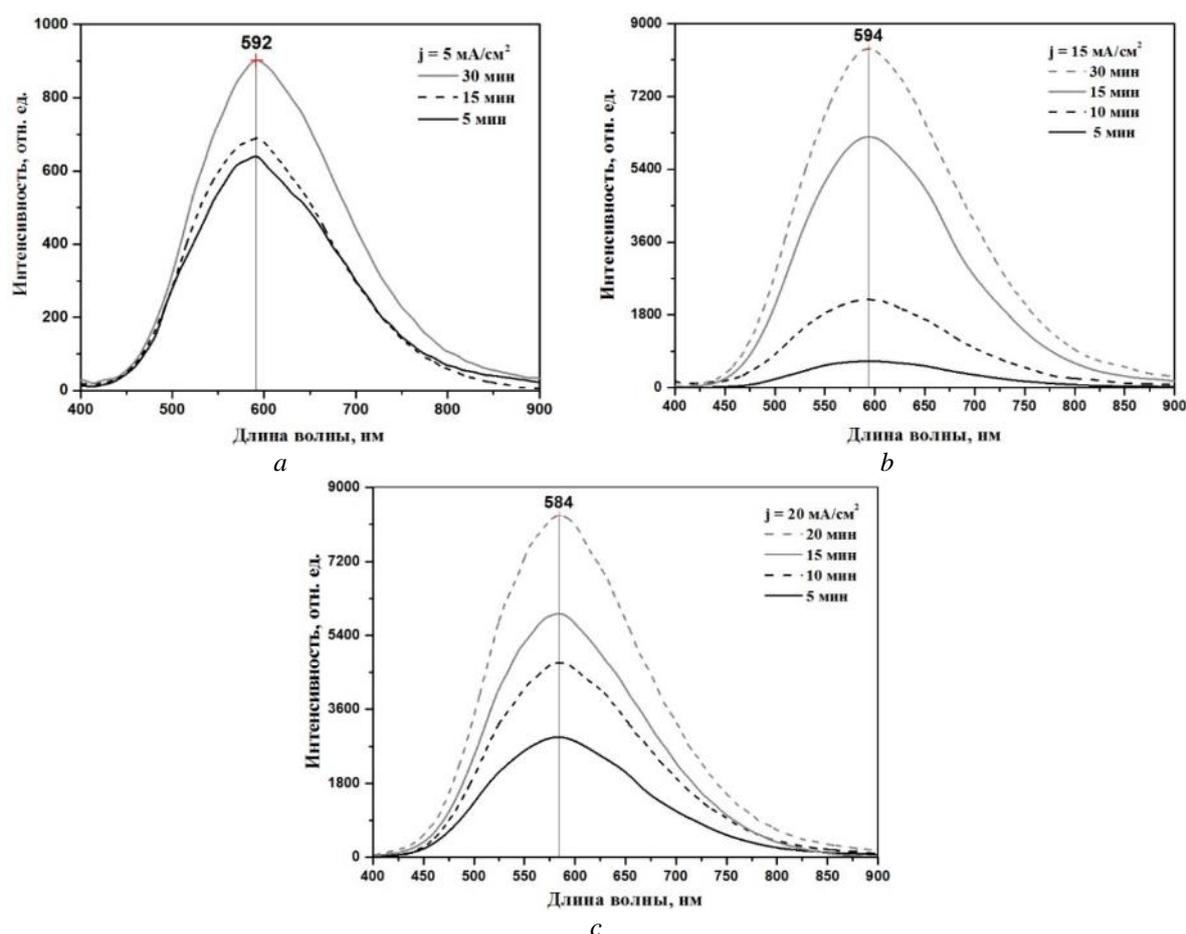


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции пленок легированного никелем ZnO, полученных электрохимическим методом при постоянной плотности тока осаждения: 5 (a), 15 (b), 20 (c) mA/cm^2
Fig. 2. Photoluminescence spectra of Ni-doped ZnO films grown by electrodeposition at a constant current density of 5 (a), 15 (b), 20 (c) mA/cm^2

На всех исследованных спектрах наблюдается единственная интенсивная интегральная полоса фотолюминесценции в видимом диапазоне длин волн, которая соответствует излучательным переходам через глубокие уровни в запрещенной зоне полупроводникового ZnO ($\sim 2,12 \text{ эВ}$). Это полоса должна состоять из нескольких отдельных более узких полос, соответствующих процессам излучательной рекомбинации, протекающим по различным путям. Обычно происхождение наблюдаемой желтой фотолюминесценции связывают

с вакансиями и междоузельными атомами кислорода в кристаллической решетке ZnO [11]. Положение максимума интегральной полосы фотолюминесценции имеет постоянное значение в пределах одной величины плотности тока осаждения. Из этого можно предположить, что при постоянной плотности тока количественные соотношения дефектов, через энергетические уровни которых проходят процессы излучательной рекомбинации, остаются постоянными.

При аппроксимации спектров фотолюминесценции набором функций симметричного распределения Гаусса были определены положения максимумов полос фотолюминесценции, соответствующих отдельным излучательным процессам в полупроводники и установлена их природа (рис. 3). Как видно из рис. 3, на всех спектрах фотолюминесценции присутствует три основные группы повторяющихся полос. Максимум интенсивности полос первой группы (1) располагается около 525 нм (что соответствует энергии излучения 2,36 эВ). Второй (2) – 570 нм (2,17 эВ). Третьей (3) – 625 нм (1,98 эВ). Полученные результаты для (1)–(3) групп хорошо согласуются с теоретически рассчитанными в работе [12] энергиями связанных с дефектами кристаллической решетки состояний в запрещенной зоне ZnO. Поэтому наблюдаемые полосы фотолюминесценции обусловлены излучательными переходами со дна зоны проводимости полупроводника на уровни, связанные с комплексами вакансий кислорода и междоузельных атомов цинка (1), атомами кислорода в междоузлиях цинка (2) и вакансиями кислорода в узлах кристаллической решетки (3). Данные полосы встречаются при аппроксимации всех полученных спектров, и указанные излучательные переходы являются основной причиной фотолюминесценции оксида цинка в видимом диапазоне.

В спектрах фотолюминесценции исследованных образцов также выделяются еще две группы полос: первая, с максимумом, расположенным около 700 нм (1,77 эВ) (4), и вторая – около 745 нм (1,66 эВ) (5). Наиболее вероятными источником полос могут быть излучательные переходы на уровни вакансий кислорода со дна зоны проводимости и с донорных уровней никеля соответственно. Из рисунка видно, что при достижении некоторой величины прошедшего через образец количества электричества, составившего 18 кКл, в спектрах фотолюминесценции появляется полоса излучения (5) и исчезает полоса (4), что подтверждает установленное по спектрам рамановского рассеяния увеличение относительной концентрации никеля при увеличении продолжительности процесса осаждения и, как показывают результаты фотолюминесцентной спектроскопии, плотности тока. Также при этом наблюдается сдвиг максимумов группы в красную сторону с 625 к 640 нм (от 1,98 к 1,93 эВ), что может быть следствием перестройки кристаллической структуры с увеличением толщины пленки, и, как следствие, изменение положения уровней вакансий кислорода.

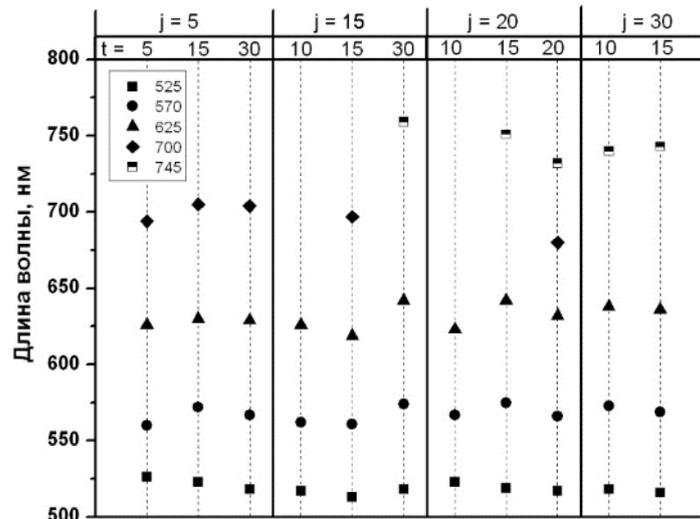


Рис. 3. Расположение максимумов функций симметричного распределения Гаусса, которым были аппроксимированы спектры фотолюминесценции для различной плотности тока и времени осаждения

Fig. 3. The position of the maximums of Gaussian functions to which photoluminescence spectra for different current density and deposition time were approximated

Заклучение

Методом электрохимического осаждения получены пленки легированного никелем ZnO на подложках из монокристаллического кремния. Исследованы закономерности формирования и легирования ZnO никелем. Проведено исследование пленок методом рамановской и фотолюминесцентной спектроскопии. Показано, что спектры рамановского рассеяния полученных пленок содержат набор пиков, соответствующих кристаллическому ZnO с гексагональной кристаллической решеткой типа вюрцита. Смещение максимума колебательной моды $E_1(LO)$ на 580 см^{-1} указывает на то, что полученные пленки могут состоять из кристаллитов с характерным размером около 10 нм. Интенсивная колебательная мода с максимумом около 440 см^{-1} , соответствующая неполярной моде $E_2(high)$, имеет заметную симметрию, из чего следует, что полученные пленки ZnO отличаются хорошим качеством кристаллической решетки.

Полученные пленки ZnO демонстрируют единственную широкую полосу фотолюминесценции в видимом диапазоне длин волн. Анализ полученных спектров показал, что переходы, связанные с процессами излучательной рекомбинации, преимущественно происходят из зоны проводимости на энергетические уровни дефектов в запрещенной зоне ZnO – вакансий и междоузельных атомов кислорода, а также комплексов вакансий кислорода и междоузлий цинка. Увеличение количества проходимого в ходе осаждения через образцы количества электричества приводит к изменению положения энергетических уровней дефектов кислорода в запрещенной зоне ZnO.

Наличие на рамановских спектрах моды колебаний около 530 см^{-1} , интенсивной моды около 1050 см^{-1} и слабой по сравнению с ней моды 1150 см^{-1} указывает на легирование ZnO никелем. Увеличение относительной разницы в интенсивностях последних двух режимов в пользу 1050 см^{-1} предполагает увеличение относительного количества примеси никеля в составе пленки ZnO.

Полученные результаты могут представлять интерес для разработки технологии изготовления оптоэлектронных и магнитоэлектронных приборов на основе ZnO, легированного переходными металлами.

Список литературы / References

1. Özgür Ü, Alivov Y, Liu C, Teke A, Reshchikov M, Dogan S, Avrutin V, Cho S, Morkoç H. A comprehensive review of ZnO materials and devices. *J. Appl. Phys.* 2005;98:041301. DOI: 10.1063/1.1992666.
2. Consonni V., Briscoe J., Kärber E., Li X., Cossuet T. ZnO nanowires for solar cells: a comprehensive review. *Nanotechnol.* 2019;30(36):362001. DOI: 10.1088/1361-6528/ab1f2e.
3. Sato K., Katayama-Yoshida H. Stabilization of ferromagnetic states by electron doping in Fe-, Co- or Ni-Doped ZnO. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2001;40:334-336. DOI: 10.1143/JJAP.40.L334.
4. Izaki M., Omi T. Electrolyte optimization for cathodic growth of zinc oxide films. *J. Electrochem. Soc.* 1996;143(3):53-55. DOI: 10.1002/chin.199633014.
5. Redka D., Mukhin N., Zakharov I. Variations in optical and structural properties of zinc oxide films after laser processing. *Technical Physics.* 2016;6:1744-1746. DOI: 10.1134/S1063784216110207.
6. Scepanovic M., Grujić-Brojčin M., Vojisavljevic K., Bernik S., Sreckovic T. Raman study of structural disorder in ZnO nanopowders. *J. Raman Spectrosc.* 2010;41(9):914-921. DOI: 10.1002/jrs.2546.
7. Singh N.K., Tripathi N., Rath S., Subramanian A. Structural, morphological, and optical characterization of ZnO nanostructures fabricated by electrochemical deposition. *J. Nanosci Nanotechnol.* 2009;9(9):5608-5613. DOI: 10.1166/jnn.2009.1149.
8. Rajalakshmi M., Arora A., Bendre B., Mahamuni S. Optical phonon confinement in zinc oxide nanoparticles. *J. Appl. Phys.* 2000;87(5):2445-2448. DOI: 10.1063/1.372199.
9. Vijayaprasath G., Murugan R., Subramanian P., Prabhu N., Mahalingam T., Hayakawa Y., Ravi G. Role of nickel doping on structural, optical, magnetic properties and antibacterial activity of ZnO nanoparticles. *Mater. Res. Bull.* 2016;76:48-61. DOI: 10.1016/j.materresbull.2015.11.053.
10. Tripathi N., Kalimuthu V., Rath S. Raman spectroscopic study of structural evolution of electrochemically deposited ZnO films with deposition time. *Mater. Chem. Phys.* 2011;126(3):568-572. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2011.01.026.

11. Lima SAM, Sigoli F, Miguel J, Davolos M. Luminescent properties and lattice defects correlation on zinc oxide. *Int. J. Inorg. Mater.* 2001;3:749-754. DOI: 10.1016/S1466-6049(01)00055-1.
12. Djurišić A., Leung Y.H. Optical Properties of ZnO Nanostructures. *Small.* 2006;2:944-961. DOI: 10.1002/smll.200600134.

Вклад авторов

Янушкевич К.О. выполнил изготовление образцов легированного никелем оксида цинка в соответствии с выбранной методикой, а также регистрацию и графическое оформление спектров рамановского рассеяния и спектров фотолюминисценции. Принимал участие в интерпритации полученных результатов.

Чубенко Е.Б. принимал участие в выборе методик формирования и исследования полученных образцов, а также в интерпритации полученных результатов.

Бондаренко В.П. определил задачи, которые необходимо было решить в ходе проведения исследований.

Authors contribution

Yanushkevich K.O. produced samples of Ni-doped ZnO in accordance with the chosen method and carried out registration and graphic design of Raman scattering and photoluminescence spectra. He also took part in the interpretation of the results.

Chubenko E.B. participated in the selection of methods to create and study the obtained samples, as well as in the interpretation of the results.

Bondarenko V.P. set the tasks to be solved during the research.

Сведения об авторах

Янушкевич К.О., инженер-электроник НИЛ 4.8 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, магистрант кафедры микро- и нанозлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Чубенко Е.Б., к.т.н., ведущий научный сотрудник НИЛ 4.3 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Бондаренко В.П., к.т.н., доцент, заведующий НИЛ 4.3 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Yanushkevich K.O., electronic engineer, R&D Laboratory 4.8 BSUIR, undergraduate of the Department of Micro and Nanoelectronics of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Chubenko E.B., PhD, Leading Researcher, R&D Laboratory 4.3 of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bondarenko V.P., PhD, Associate Professor, Head of R&D Laboratory 4.3 of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Беларусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-298-77-50;
e-mail: yanushkevichconstantine@gmail.com
Янушкевич Константин Олегович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. + 375-29-298-77-50;
e-mail: yanushkevichconstantine@gmail.com
Yanushkevich Konstantin Olegovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-45-52>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.932+004.258

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА LIFO-СТЕКА ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ОБЛАСТЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ

ЦВЕТКОВ В.Ю.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 26 января 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Рассматривается задача выделения памяти для организации LIFO-стека в алгоритме сегментации изображений на основе выращивания областей. Сегментация разделяет изображение на области с одинаковыми или схожими свойствами и является наиболее требовательным к емкости оперативной памяти процессом. Выращивание областей начинается с окрестностей предварительно выделенных начальных пикселей роста и использует стеки для хранения координат смежных пикселей, присоединяемых к выращиваемой области. Загрузка стеков максимальна, когда размер сегмента совпадает с размером YX изображения. При отсутствии выражения для точного определения размера стека гарантировать устойчивую работу алгоритма выращивания областей, исключающую переполнение выделенной для обработки памяти, можно, только если размер стека принять равным YX . Однако этот подход не учитывает то, что заполнение стеков координат сопровождается также выборкой из них, вследствие чего размер стека всегда меньше YX . В статье предлагается выражение, позволяющее повысить точность определения необходимого размера LIFO-стека для хранения координат смежных пикселей в зависимости от размера изображения. Выражение учитывает условия максимальной загрузки LIFO-стека, когда: а) осуществляется сегментация квадратной области с начальным пикселем роста в углу этой области; б) в окне сканирования смежные пиксели всегда выбираются по порядку с расположением первого выбираемого пикселя в углу окна сканирования. Использование предложенного выражения для расчета необходимой емкости LIFO-стека в условиях его максимальной загрузки в алгоритме сегментации изображений на основе выращивания областей обеспечивает уменьшение числа ячеек памяти LIFO-стека в 2 раза.

Ключевые слова: LIFO-стек, сегментация изображений, выращивание областей, размер стека, выделение памяти.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Цветков В.Ю. Определение размера LIFO-стека для выращивания областей изображений. Доклады БГУИР. 2020; 18(2): 45-52.

LIFO-STACK SIZE DETERMINATION FOR GROWING OF THE IMAGE REGIONS

VIKTAR YU. TSVIATKOU

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 26 Januar 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. This paper considers the problem of memory allocation for the organization of the LIFO-stack in the algorithm for image segmentation based on growing regions is considered. Segmentation divides the image into regions with identical or similar properties and is the most demanding process for the capacity of RAM. The cultivation of areas begins with the neighborhoods of pre-selected initial growth pixels and uses stacks to store the coordinates of adjacent pixels attached to the cultivated region. Stack loading is maximized when the segment size matches the size of the YX image. In the absence of an expression for the exact determination of the size of the stack, it is possible to guarantee the stable operation of the algorithm for growing regions, eliminating the overflow of the memory allocated for processing if the stack size is assumed equal to YX. However, this approach does not take into account the fact that filling the coordinate stacks is also accompanied by a selection of them, which makes the stack size always smaller than YX. The article proposes an expression that allows one to increase the accuracy of determining the required size of the LIFO-stack for storing the coordinates of adjacent pixels depending on the image size. The expression takes into account the conditions of the maximum load of the LIFO-stack when: a) the segmentation of the square region with the initial growth pixel in the corner of this region is carried out; b) in the scan window, adjacent pixels are always selected in order with the first selectable pixel located in the corner of the scan window. Using the proposed expression to calculate the required capacity of the LIFO-stack under conditions of its maximum load in the image segmentation algorithm based on growing regions provides a 2-fold reduction in the number of LIFO-stack memory cells.

Keywords: LIFO-stack, image segmentation, region growing, stack size, memory allocation.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Tsviatkou V.Yu. LIFO-stack size determination for growing of the image regions. Doklady BGUIR. 2020; 18(2): 45-52.

Введение

Одна из важных задач, решаемых в процессе разработки программного обеспечения системы обработки изображений, связана с планированием расхода оперативной памяти. Особенно требовательны к емкости оперативной памяти алгоритмы сегментации. Сегментация разделяет изображение на области с одинаковыми или схожими свойствами [1–4]. Ее результатом является матрица сегментации, совпадающая по размеру с исходным изображением, значение каждого элемента которой указывает на номер сегмента, которому принадлежит соответствующий пиксель исходного изображения. Простейшие алгоритмы сегментации основаны на выращивании областей в окрестности предварительно выделенных начальных пикселей роста и используют стеки для хранения координат смежных пикселей, присоединяемых к выращиваемой области [2, 5–7]. Стеки могут быть организованы по принципу FIFO (первым зашел – первым вышел) или LIFO (последним зашел – первым вышел) [8–10]. Они отличаются порядком выборки данных и, соответственно, емкостью, необходимой для хранения координат пикселей при максимальной загрузке. Несмотря на отсутствие универсального подхода к определению необходимой емкости стека для различных алгоритмов, достаточно точные ее значения могут быть получены для конкретного алгоритма в предельных условиях.

Целью работы является определение размера LIFO-стека координат смежных пикселей в зависимости от размера изображения для алгоритма сегментации на основе выращивания областей.

Особенности сегментации изображений на основе выращивания областей

В результате сегментации изображения $I = \|i(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ размером $Y \times X$ пикселей формируется матрица $S = \|s(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ сегментации такого же размера, значения элементов которой указывают на номера $n_s \in [0, N_s]$ сегментов, которым они принадлежат, где N_s – число сегментов и номер последнего сегмента. На рис. 1 приведены фрагмент полутонового изображения, соответствующие ему матрица значений пикселей и матрица сегментации, содержащая 6 сегментов.

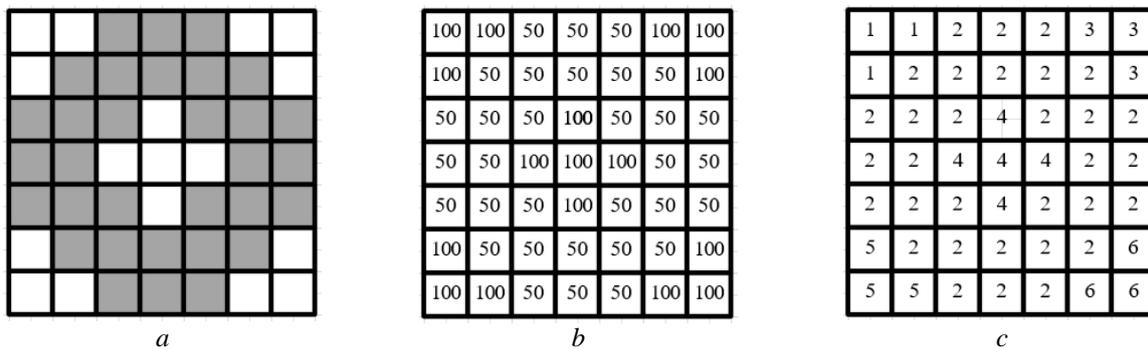


Рис. 1. Фрагменты: *a* – полутоновое изображение; *b* – матрица пикселей; *c* – матрица сегментации
Fig. 1. Fragments: *a* – grayscale image; *b* – matrix of pixels; *c* – segmentation matrix

Алгоритм выращивания областей описывает следующую последовательность операций по сегментации изображения (предполагается, что начальные пиксели роста на изображении уже выделены) [1–4]:

1) координаты очередного начального пикселя роста помещаются в стеки $Y_F = \|y_F(p_F)\|_{(p_F=0, \overline{P_F-1})}$ и $X_F = \|x_F(p_F)\|_{(p_F=0, \overline{P_F-1})}$ координат смежных пикселей, где p_F – указатель стеков; P_F – максимально возможное число координат в стеках Y_F и X_F ;

2) определяется текущее значение n_s номера сегмента;

3) реализуется цикл обработки стеков Y_F и X_F , в котором из них извлекаются координаты (y, x) очередного обрабатываемого пикселя; соответствующему элементу матрицы сегментации $s(y, x)$ присваивается значение n_s номера сегмента; проверяется выполнение условия присоединения к текущему пикселю (y, x) смежных пикселей с координатами $(y + y', x + x')$ при $(y' = -1, 1) \wedge (x' = -1, 1) \wedge ((y' \neq 0) \vee (x' \neq 0))$; если для какого-либо смежного пикселя условие выполняется, то его координаты $(y + y', x + x')$ заносятся в стеки Y_F и X_F ;

4) шаги 1 – 3 повторяются до тех пор, пока все начальные пиксели роста не будут обработаны.

Постановка задачи

Предположим, что стеки Y_F и X_F координат смежных пикселей в алгоритме выращивания областей относятся к типу LIFO. Их загрузка максимальна, когда размер

сегмента совпадает с размером изображения. В этом случае $N_s = 1, \forall y \forall x (s(y, x) = N_s)$, размер $R_s(n_s)$ n_s -го сегмента, определяемый с помощью выражения $R_s(n_s) = \frac{1}{n_s} \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} s(y, x)$, составляет YX ($R_s(1) = YX$) при исключении повторного попадания координат в стеки (за счет проверки значений в матрице сегментации). При отсутствии выражения для точного определения размера стека (значения P_F числа ячеек сетка) гарантировать устойчивую работу алгоритма выращивания областей, исключающую переполнение стеков Y_F и X_F координат, можно, только если

$$P_F = YX. \quad (1)$$

Это выражение не учитывает то, что заполнение стеков координат сопровождается выборкой из них данных, вследствие чего всегда выполняется неравенство $P_F < YX$. Таким образом, для повышения эффективности использования оперативной памяти необходимо точно определить размер P_F LIFO-стеков Y_F и X_F координат смежных пикселей при максимальной загрузке – при размере изображения $Y \times X$ пикселей, наличии на нем одного сегмента ($N_s = 1$), размер которого $R_s(1)$ совпадает с размером изображения ($R_s(1) = YX$).

Вывод выражений для уточнения размера LIFO-стека координат смежных пикселей при максимальной загрузке

Пусть квадратное изображение размером Y^2 пикселей содержит единственный сегмент такого же размера. Число координат, загружаемых в LIFO-стек при обработке окрестности текущего пикселя, зависит от порядка выборки смежных пикселей и положения текущего обрабатываемого пикселя относительно границ сегмента.

Текущий и смежные с ним пиксели покрываются квадратным окном сканирования размером 3×3 пикселя. Возможны два базовых варианта выборки 8 смежных пикселей в окне сканирования, когда координаты последнего загружаемого в стек пикселя указывают на сторону (например, верхнюю, рис. 2, а) или угол (например, верхний правый, рис. 2, е) квадрата, определяющего окно сканирования. Всего существуют 16 вариантов последовательной выборки смежных пикселей с учетом движения по и против часовой стрелки. Если окно сканирования не находится на границах сегмента, выборка смежных пикселей при расположении в углу окна сканирования первого выбираемого пикселя приводит к вертикальному или горизонтальному перемещению окна сканирования (например, вверх для окна сканирования с расположением первого выбираемого пикселя в правом верхнем углу, рис. 2, б), а при расположении в углу окна сканирования последнего выбираемого пикселя – диагональному перемещению окна сканирования (например, вверх и вправо для окна сканирования с расположением последнего выбираемого пикселя в правом верхнем углу, рис. 2, ф).

Для каждого из 16 вариантов последовательной выборки смежных пикселей существуют Y^2 вариантов траекторий перемещения окна сканирования в пределах границ квадратного сегмента размером Y^2 пикселей в зависимости от положения начального пикселя роста сегмента (начального положения окна сканирования). На рис. 2 приведены примеры траекторий перемещения окна сканирования в пределах границ квадратного сегмента для двух вариантов выборки смежных пикселей в окне сканирования, приведенных на рис. 2, а, е, когда положение начального пикселя роста соответствует нижнему левому углу (рис. 2, с, г) и центру (рис. 2, д, h) сегмента.

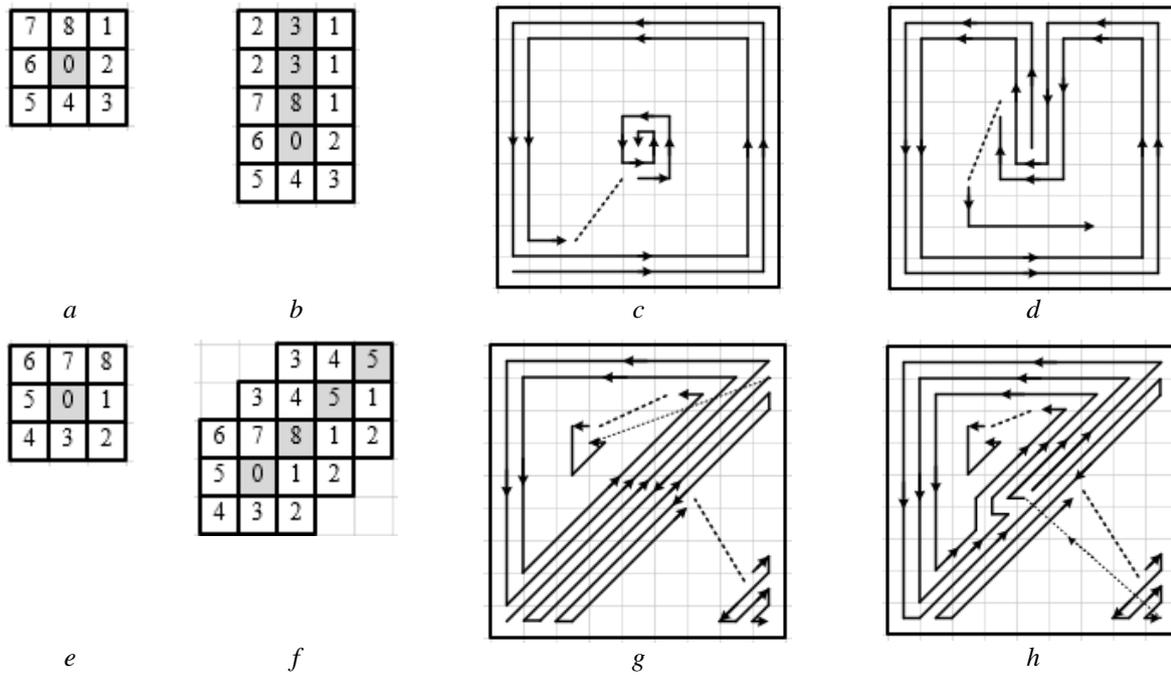


Рис. 2. Фрагменты: *a* – окно сканирования с расположением первого выбираемого пикселя в правом верхнем углу; *b* – перемещение окна сканирования вверх; *c* – перемещение окна сканирования в пределах сегмента при расположении первого выбираемого пикселя в правом верхнем углу окна сканирования и начального пикселя роста в нижнем левом углу сегмента; *d* – перемещение окна сканирования в пределах сегмента при расположении первого выбираемого пикселя в правом верхнем углу окна сканирования и начального пикселя роста в центре сегмента; *e* – окно сканирования с расположением последнего выбираемого пикселя в правом верхнем углу; *f* – перемещение окна сканирования вверх и вправо; *g* – перемещение окна сканирования в пределах сегмента при расположении последнего выбираемого пикселя в правом верхнем углу окна сканирования и начального пикселя роста в нижнем левом углу сегмента; *h* – перемещение окна сканирования в пределах сегмента при расположении последнего выбираемого пикселя в правом верхнем углу окна сканирования и начального пикселя роста в центре сегмента

Fig. 2. Fragments: *a* – scanning window with the location of the first selectable pixel in the upper right corner; *b* – move the scan window up; *c* – moving the scan window within the segment when the first selectable pixel is located in the upper right corner of the scan window and the initial growth pixel in the lower left corner of the segment; *d* – moving the scan window within the segment when the first selectable pixel is located in the upper right corner of the scan window and the initial growth pixel in the center of the segment; *e* – scanning window with the location of the last selectable pixel in the upper right corner; *f* – move the scan window up and right; *g* – moving the scanning window within the segment when the last selected pixel is located in the upper right corner of the scanning window and the initial growth pixel in the lower left corner of the segment; *h* – moving the scan window within the segment when the last selectable pixel is located in the upper right corner of the scan window and the initial growth pixel in the center of the segment

Для траектории перемещения окна сканирования, приведенной на рис. 2, *c*, необходимо $\lfloor Y/4 \rfloor$ циклов, в каждом из которых обрабатываются $4(Y-4k)$ пикселей, где $\lfloor \cdot \rfloor$ – операция округления с недостатком; $k=1, \lfloor Y/4 \rfloor$ – номер цикла. При каждом перемещении окна сканирования из стека извлекаются координаты текущего пикселя и помещаются в стек координаты двух смежных пикселей, в результате чего число координат в стеке увеличивается на единицу. При обработке первого пикселя в левом нижнем углу сегмента в стек помещаются координаты еще одного пикселя. Таким образом, размер P_F LIFO-стека координат смежных пикселей для варианта траектории окна сканирования, приведенной на рис. 2, *c*, определяется с помощью выражения

$$P_F = 1 + 4 \sum_{k=1}^{\lfloor Y/4 \rfloor} (Y - 4k). \quad (2)$$

Для траектории перемещения окна сканирования, приведенной на рис. 2, *d*, необходимо $\lfloor Y/8 \rfloor$ циклов, в каждом из которых обрабатываются $5(Y-8k)$ пикселей ($4(Y-8k)$ по периметру сегмента и $(Y-8k)$ в центральной части сегмента), где $k=1, \lfloor Y/8 \rfloor$. При каждом перемещении окна сканирования из стека извлекаются координаты текущего пикселя и помещаются в стек координаты двух смежных пикселей, в результате чего число координат в стеке увеличивается на единицу. При обработке первого пикселя в центре сегмента в стек помещаются координаты семи пикселей, а затем, при каждом перемещении окна сканирования вверх, в стек добавляются координаты двух пикселей (всего Y пикселей). При обработке пикселей в центральной части сегмента в каждом цикле в стек помещаются координаты еще 10 пикселей. Таким образом, размер P_F LIFO-стека координат смежных пикселей для варианта траектории окна сканирования, приведенной на рис. 2, *d*, определяется с помощью выражения

$$P_F = 7 + Y + 5 \sum_{k=1}^{\lfloor Y/8 \rfloor} (Y - 8k) + 10 \left\lfloor \frac{Y}{8} \right\rfloor. \quad (3)$$

Траектория перемещения окна сканирования, приведенная на рис. 2, *g*, состоит из двух фрагментов. При переходе от обработки первого фрагмента ко второму большая часть координат смежных пикселей из стека выгружается.

Для первого фрагмента необходимо $\lfloor Y/5 \rfloor$ циклов. При каждом перемещении окна сканирования вверх из стека извлекаются координаты текущего пикселя и помещаются в стек координаты 5 смежных пикселей в первом цикле (число координат в стеке увеличивается на 4) и 3-х пикселей в последующих циклах (число координат в стеке увеличивается на 2). При каждом перемещении окна сканирования влево и вниз из стека извлекаются координаты текущего пикселя и помещаются в стек координаты двух смежных пикселей, в результате чего число координат в стеке увеличивается на единицу. При этом число координат смежных пикселей в LIFO-стеке определяется выражением

$$P_F = 4Y + 2 \sum_{k=1}^{\lfloor Y/5 \rfloor} (Y - 5k) + 2 \sum_{k=1}^{\lfloor Y/5 \rfloor} (Y - 4k). \quad (4)$$

Для второго фрагмента необходимо $\lfloor Y/3 \rfloor$ циклов. При каждом перемещении окна сканирования из стека извлекаются координаты текущего пикселя и помещаются в стек координаты 3-х смежных пикселей, в результате чего число координат в стеке увеличивается на 2. С учетом того, что после обработки первого фрагмента в LIFO-стеке остаются координаты $4Y$ смежных пикселей размер LIFO-стека для второго фрагмента определяется выражением

$$P_F = 4Y + 2 \sum_{k=1}^{\lfloor Y/3 \rfloor} (Y - 3k). \quad (5)$$

Траектория перемещения окна сканирования, приведенная на рис. 2, *h*, состоит из двух фрагментов. При переходе от обработки первого фрагмента ко второму большая часть координат смежных пикселей из стека выгружается.

Первый фрагмент включает перемещение окна сканирования относительно центра сегмента вверх (при каждом перемещении число координат в стеке увеличивается на 4), влево (число координат в стеке увеличивается на единицу), вниз (число координат в стеке увеличивается на единицу) и еще $\lfloor Y/3 \rfloor$ циклов перемещения вверх и вниз (число координат в стеке увеличивается на 2). Размер LIFO-стека для первого фрагмента определяется выражением

$$P_F = 6Y + 2 \sum_{k=1}^{\lfloor Y/3 \rfloor} (Y - 3k). \quad (6)$$

Для второго фрагмента необходимо $\lfloor Y/5 \rfloor$ циклов. При каждом перемещении окна сканирования вверх из стека извлекаются координаты текущего пикселя и помещаются в стек координаты 3-х пикселей (число координат в стеке увеличивается на 2). При каждом перемещении окна сканирования влево и вниз из стека извлекаются координаты текущего пикселя и помещаются в стек координаты двух смежных пикселей, в результате чего число координат в стеке увеличивается на единицу. С учетом того, что после обработки первого фрагмента в LIFO-стеке остаются координаты $6Y$ смежных пикселей, размер LIFO-стека для второго фрагмента определяется выражением

$$P_F = 6Y + 2 \sum_{k=1}^{\lfloor Y/5 \rfloor} (Y - 5k) + 2 \sum_{k=1}^{\lfloor Y/5 \rfloor} (Y - 4k). \quad (7)$$

Оценка экономии памяти при уточненном расчете размера LIFO-стека

На рис. 3 приведены зависимости размера $P_F^{(E)}$ (число ячеек памяти) LIFO-стека, определяемого с помощью выражений (1) – (7), от размера Y^2 (число пикселей) квадратного изображения, где E – номер выражения. Уточненный размер P_F LIFO-стека координат смежных пикселей определяется одним из выражений (2) – (7), обеспечивающим наибольшие значения, что соответствует максимальной загрузке стека. Из рис. 1 следует, что наибольшие значения дает выражение (2), что соответствует перемещению окна сканирования в пределах сегмента по траектории, приведенной на рис. 2, с. Таким образом, максимальная загрузка стека обеспечивается при расположении первого выбираемого пикселя в углу окна сканирования и начального пикселя роста в углу области сканирования. Траектория перемещения окна сканирования по сегментируемой области в этом случае представляет собой спираль.

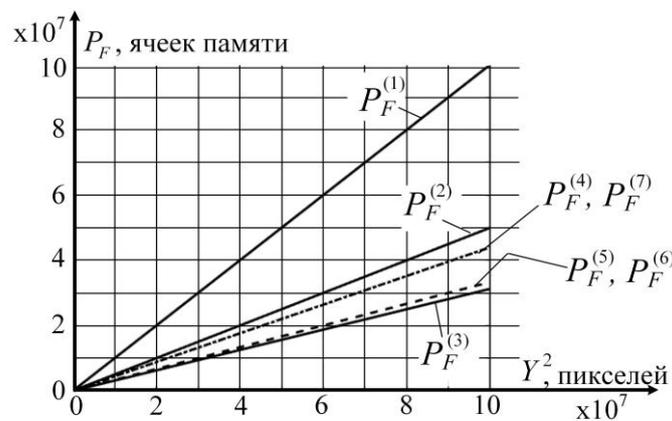


Рис. 3. Зависимости размера LIFO-стека от размера изображения
Fig. 3. Dependencies of the size of the LIFO stack on the size of the image

Экономия M_E памяти при уточненном расчете необходимой емкости LIFO-стека по выражению (2) в сравнении с приближительным расчетом по выражению (1) для квадратного изображения размером Y^2 пикселей определяется с помощью выражения

$$M_E = \frac{Y^2}{P_F^{(2)}}. \quad (8)$$

Из рис. 3 и выражения (8) следует, что экономия памяти при уточненном расчете необходимой емкости LIFO-стека составляет 2 раза.

В случае сегментации прямоугольного изображения размером $Y \times X$ пикселей для определения необходимой емкости LIFO-стека по выражению (2) и экономии памяти по выражению (8) предлагается использовать эквивалентный размер квадратного изображения Y^2 пикселей такой, что $Y^2 \geq Y \times X$.

Заключение

Получено выражение, позволяющее повысить точность определения необходимого размера LIFO-стека для хранения координат смежных пикселей в зависимости от размера изображения для алгоритма сегментации на основе выращивания областей. При получении данного выражения приняты условия максимальной загрузки LIFO-стека, когда: а) осуществляется сегментация квадратной области с начальным пикселем роста в углу этой области; б) в окне сканирования смежные пиксели всегда выбираются по порядку с расположением первого выбираемого пикселя в углу окна сканирования. Траектория перемещения окна сканирования по сегментируемой области в этом случае представляет собой спираль. Использование предложенного выражения для расчета необходимой емкости LIFO-стека в условиях его максимальной загрузки в алгоритме сегментации изображений на основе выращивания областей обеспечивает уменьшение числа ячеек памяти в 2 раза.

Список литературы / References

1. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*. 1979;9:62-66. DOI:10.1109/TSMC.1979.4310076.
2. Haralick R.M., Shapiro L.G. Image segmentation techniques. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. 1985;29(1):100-132. DOI:10.1016/S0734-189X(85)90153-7.
3. Horowitz S.L., Pavlidis T. Picture segmentation by a tree traversal algorithm. *Journal of the ACM*. 1976;23(2):368-388. DOI:10.1145/321941.321956.
4. Meyer F. Topographic distance and watershed lines. *Signal Processing*. 1994;38(1):113-125. DOI:10.1016/0165-1684(94)90060-4.
5. Moigne J.Le., Tilton J.C. Refining image segmentation by integration of edge and region data. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. 1995;33(3):605-614. DOI:10.1109/36.387576.
6. Hojjatoleslami S.A., Kittler J. Region Growing: A New Approach. *IEEE Transactions on Image Processing*. 1998;7(7):1079-1084. DOI:10.1109/83.701170.
7. Cui W., Guan Z., Zhang Z. An Improved Region Growing Algorithm for Image Segmentation. International Conference on Computer Science and Software Engineering. 2008;6:93-96. DOI:10.1109/CSSE.2008.891.
8. Wirth N. *Algorithms and Data Structures*. Upper Saddle River: Prentice Hall. 1985.
9. Lipschutz S. *Schaum's Outline of Theory and Problems of Data Structures*. New York City: McGraw-Hill Book Company; 1986.
10. Kruse R.L., Ryba A.J. *Data Structures and Program Design in C++*. Upper Saddle River: Prentice Hall; 2000.

Сведения об авторах

Цветков В.Ю., д.т.н., доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Tsviatkou V.Yu., PhD, Associate Professor, Head of Infocommunication Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
+375-017-293-84-08;
e-mail: vtsvet@bsuir.by
Цветков Виктор Юрьевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
+375-017-293-84-08;
e-mail: vtsvet@bsuir.by
Tsviatkou Viktor Yur'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-53-61>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.384.3

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СЪЕМКИ ОБЪЕКТОВ С БЕСПИЛОТНЫХ АВИАНОСИТЕЛЕЙ

КАТКОВСКИЙ Л.В.

*Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко»
Белорусского государственного университета (г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 27 января 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Целью работы является исследование влияния всего комплекса параметров на характеристики получаемых тепловых изображений при съемке поверхности Земли с беспилотных летательных аппаратов. Рассчитаны значения минимальной детектируемой и минимальной разрешаемой разности температур в зависимости от параметров тепловизора, съемки и размеров объекта (пространственной частоты) для трех серийных малогабаритных тепловизоров, используемых при авиационной съемке объектов земной поверхности с беспилотных авианосителей. Аналитические формулы для оценки минимальной разрешаемой разности температур получены на основе математической модели тепловизора как линейной системы отдельных компонентов системы на основе методики, отличающейся от общепринятой. Оценки выполнены для двух случаев: наблюдения теплового изображения оператором на экране дисплея и для случая отсутствия оператора, когда электронное изображение анализируется пороговым алгоритмом. Впервые учтено влияние скорости движения носителя на общую модуляционную передаточную функцию системы и, соответственно, температурное и пространственное разрешения тепловизоров. Основными компонентами, которые необходимо учитывать при расчетах полной модуляционной передаточной функции съемочной системы, являются: объектив тепловизора, приемник излучения, движение носителя и зрительная система наблюдателя. При этом наибольшее влияние на разрешаемые системой температуры оказывают параметры фотоприемника и скорость движения носителя.

Ключевые слова: тепловизионная съемка, беспилотные авианосители, минимальная детектируемая и разрешаемая температуры, модуляционная передаточная функция.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Катковский Л.В. Расчет параметров тепловизионной съемки объектов с беспилотных авианосителей. Доклады БГУИР. 2020; 18(2): 53-61.

CALCULATION OF OBJECTS THERMAL IMAGING PARAMETERS FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES

LEONID V. KATKOVSKY

*Scientific research institution «Institute of Applied Physics Problems named after A. N. Sevchenko»
of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 27 January 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. This article is aimed at studying the influence of the entire complex parameters on the characteristics of the obtained thermal images when shooting the Earth's surface from unmanned aerial vehicles. The values of the minimum detectable and minimum resolvable temperature differences are calculated depending on the parameters of the thermal imager, the survey and the size of the object (spatial frequency) for three serial miniature thermal cameras used in aerial surveys of the Earth's surface from unmanned aerial vehicles. Analytical formulas for estimating the minimum resolvable temperature difference are obtained on the basis of a mathematical model of the thermal imager as a linear system of individual components based on the technique that differs from the generally accepted one. Estimates were made for two cases: observation of a thermal image by an operator on a display screen and for the case when an electronic image is analyzed by a threshold algorithm with no operator engaged. For the first time, the influence of the carrier velocity on the overall modulation transfer function of the system and, accordingly, the temperature and spatial resolution of thermal imagers was taken into account. The main components that must be considered when calculating the full modulation transfer function of the system are: a thermal imager lens, a radiation detector, carrier movement and the observer's visual system. Moreover, the parameters of the detector and the speed of the carrier have the greatest influence on the temperatures resolvable by the system.

Keywords: thermal imaging, unmanned aerial vehicles, minimum detectable and resolved temperature, modulation transfer function.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Katkovsky L.V. Calculation of objects thermal imaging parameters from unmanned aerial vehicles. Doklady BGUIR. 2020; 18(2): 53-61.

Введение

Авиационная тепловизионная съемка земной поверхности – одна из широко используемых технологий дистанционного зондирования, обладающая известными преимуществами в сравнении с космической съемкой. Она позволяет обнаруживать тепловые аномалии с высоким температурным и пространственным разрешением, что важно для диагностики природных и технических объектов. Тепловизионная аэросъемка, обладая высокой оперативностью и производительностью, низкой стоимостью получаемых данных на единицу площади, высокой точностью выявления аварийных мест актуальна для мониторинга трубопроводов, объектов энергетической, промышленной и городской инфраструктуры.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) все чаще используются в качестве носителей аппаратуры при авиасъемке [1, 2], что связано с появлением коммерчески доступных малогабаритных камер для разных диапазонов спектра, относительно невысокой стоимостью БПЛА, простотой их обслуживания и малой высотой полета при высоком пространственном и временном разрешениях. Однако качество получаемых данных зависит как от параметров полета БПЛА (высоты, скорости, стабильности траектории), так и параметров аппаратуры (постоянной времени приемника излучения, частоты кадров). Поэтому для съемки с БПЛА необходим выбор параметров, которые обеспечивали бы

максимально возможное качество данных. Основная задача тепловизора состоит в визуализации теплового поля с некоторым пространственным периодом с требуемым температурным разрешением.

В работе проводятся расчеты пространственного и температурного разрешений тепловых изображений серийных тепловизоров при съемке с БПЛА. При этом впервые учитывается влияние на них скорости носителя. Расчеты проведены для двух случаев: наблюдение изображений на дисплее оператором [3–5] и в случае отсутствия наблюдателя и дисплея, когда анализ изображения проводится на борту беспилотного носителя [6].

Уравнения и расчеты температурного разрешения тепловизоров

Важнейшие характеристики тепловизионной съемочной системы – пространственное и температурное разрешения определяются как фотоприемником, так и характеристиками оптического, электронного тракта тепловизора и параметрами съемки. Основные характеристики исследуемых в работе камер, в качестве приемника излучения в которых используются микроболометрические матрицы, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики исследуемых тепловизоров
Table 1. Characteristics of the studied thermal cameras

Параметры камеры Camera options	1	2	3
	ICI 8640 P	FLIR Vue Pro R	thermoMap
Спектральный диапазон, мкм	7–14	7,5–13,5	7,5–13,5
Частота кадров, Гц	30	30	7,5
Погрешность, °С	1	(+/-) 5	(+/-) 5
Количество пикселей	640×512	640×512	640×512
Радиометрическое разрешение, бит	14	14	14
Шаг пикселя, мкм	17	17	17
Эквивалентная шуму разность температур, °С	0,02	0,05	0,1
Фокусное расстояние, мм	13	13	9
Диафрагменное число	1,0	1,25	1,4

При относительно длительном времени наблюдения объекта (неподвижная система) используют обычно две характеристики: минимальную обнаруживаемую разность температур ΔT_D (Detectable) и минимальную разрешаемую разность температур ΔT_R (Resolvable) [4]. Первая – как мера обнаружения объекта определенных размеров, вторая – как мера распознавания объекта на шумовом фоне. Часто ограничиваются расчетами минимальной разрешаемой разности температур [5, 6], которая является более информативной и фактически устанавливает связь между пространственным и температурным разрешениями. Указанные разности температур, в свою очередь, зависят от размеров объекта (пространственной частоты) и эквивалентной шуму разности температур ΔT_{NETD} (Noise Equivalent Temperature Difference), которая характеризует температурную чувствительность тепловизора и является, как правило, паспортным параметром, определяемым производителем. Как известно, ΔT_{NETD} может быть рассчитана по следующей формуле [4]:

$$\Delta T_{NETD} = \frac{\pi R^2 \sqrt{A_D \Delta f}}{A_f \tau_{ob} A_{ob} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} = \frac{4\sqrt{\Delta f}}{(D_{ob}/F_{ob})^2 \tau_{ob} \sqrt{A_D} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda}, \quad (1)$$

где A_{ob}, D_{ob}, F_{ob} – площадь, диаметр и фокусное расстояние входного объектива соответственно, R – расстояние до объекта, A_D – площадь чувствительной площадки приемника (пикселя), если пиксель квадратный со стороной a_D , то $A_D = a_D^2$. Вторая часть формулы (1) получается из первой более общей, если изображение протяженного объекта полностью заполняет пиксель, т. е. необходимо положить: площадь наблюдаемого объекта $A_f = A_D (R/F_{ob})^2$ и площадь входного объектива $A_{ob} = \pi D_{ob}^2/4$. Δf – эквивалентная

шумовая полоса частот, $D^*(\lambda)$ – удельная обнаружительная способность фотоприемника, τ_{ob} – пропускание объектива, λ – длина волны излучения, T – абсолютная температура. Обычно считают, что объект излучает по закону Ламберта с коэффициентом излучения ε . В этом случае спектральная функция светимости $M_\lambda(\lambda, T)$ определяется формулой Планка.

Заданные величины ΔT_{NETD} позволяют рассчитать по формуле (1) величины D^* исследуемых камер и сравнить чувствительности их фотоприемников. Обычно ΔT_{NETD} рассчитывается в предположении, что $\tau_{ob}=1$, и для эффективной ширины полосы электронного тракта используется соотношение [4] (t_0 – время экспозиции одного элемента матрицы, f_f – частота кадров):

$$\Delta f = 1/2t_0 = f_f/2. \quad (2)$$

С учетом данных табл. 1 для значений соответствующих величин D^* получаем $D_{ICI\ 8640\ P}^* = 1,5 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$, $D_{FLIR\ Vue\ Pro\ R}^* = 1,0 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$, $D_{thermoMap}^* = 3,2 \cdot 10^8 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$.

Оценим минимальную обнаруживаемую разность температур ΔT_D для этих камер и неподвижного относительно камеры объекта. Для этого воспользуемся следующей формулой [4] для случая наблюдения изображения оператором на экране дисплея:

$$\Delta T_D(\xi) = (2\nu \cdot \Delta T_{NETD} \cdot SNR_D) (\alpha_D \beta_D / f_f t_E)^{0,5} / \bar{L}_S(\xi/r). \quad (3)$$

Выражение (3) получено в предположении, что тест-объект в пространстве изображений представляет собой квадрат с угловым размером ξ на однородном фоне. В этом выражении $\nu = 1/2\xi$ – угловая пространственная частота (мрад⁻¹), соответствующая угловому размеру объекта $\xi = l/H$ (l – линейный размер объекта, H – расстояние до объекта – высота съемки), отношение сигнал/шум для обнаружения объекта, SNR_D , зависит от задаваемой вероятности обнаружения. Для вероятности 0,9 принято полагать $SNR_D = 4,5$. α_D, β_D – угловые размеры пикселя фотоприемника в пространстве изображений, $\alpha_D = \beta_D = a_D / F_{ob}$, $t_E = 0,2 \text{ с}$ – временная постоянная (временное разрешение) глаза человека, осуществляющего интегрирование кадров (величина $\sqrt{f_f t_E}$ – количество кадров, интегрируемых зрительной системой), $\bar{L}_S(\xi/r)$ – среднее нормированное значение яркости изображения объекта на экране дисплея в зависимости от нормированного углового размера тест-объекта, его находят обычно на основе заранее рассчитанных таблиц значений, r – угловой размер радиуса кружка рассеяния камеры (оптической системы и приемника) – параметр функции рассеяния точки. Обычно модуляционная передаточная функция (МПФ) всей оптико-электронной системы $h(\nu)$ хорошо аппроксимируется гауссовой функцией (по одной из пространственных координат) $h(\nu) = \exp(-2\pi^2 r^2 \nu^2)$, параметр этой функции r , при условии согласования МПФ оптики и приемника, определяется размером пикселя приемника и равен [4] $r = 0,282 \cdot \alpha_D$.

Результаты расчетов по формуле (3) минимальной обнаруживаемой разности температур ΔT_D для трех рассматриваемых камер и 4-х размеров объекта ($l=5, 10, 20, 50 \text{ см}$) с высоты съемки $H=100 \text{ м}$ приведены в табл. 2 (во второй колонке приведены соответствующие размерам объекта l пространственные частоты ν).

Таблица 2. Минимальные обнаруживаемые разности температур ΔT_D для трех камер с высоты $H=100 \text{ м}$
Table 2. Minimum detectable temperature differences ΔT_D for three cameras from the height of $H = 100 \text{ m}$

Параметр Parameter	Частота, $\nu=H/2l$, мрад ⁻¹ Frequency, $\nu=H/2l$, mrad ⁻¹	1 ICI 8640 P ΔT_D	2 FLIR Vue Pro R ΔT_D	3 thermoMap ΔT_D
ΔT_{NETD} , К		0,02	0,05	0,1
$l = 5 \text{ см}$	1	0,83	2,1	18,3
$l = 10 \text{ см}$	0,5	0,21	0,52	4,23
$l = 20 \text{ см}$	0,25	0,059	0,15	1,12
$l = 50 \text{ см}$	0,1	0,015	0,037	0,25

Понятно, что формула (3) не может применяться для любых размеров объекта, поскольку по своему физическому смыслу ΔT_D не может быть меньше ΔT_{NETD} . Ограничение применения (3) обусловлено выполнением предположений, при которых она была получена [4]. Убывание ΔT_D в (3) определяется как убыванием v с увеличением размера объекта, так и ростом безразмерной функции $\bar{L}_s(\xi/r)$ с ростом $\xi = 1/2v$. Из условия $\Delta T_D > \Delta T_{NETD}$ можно установить, что формула (3) применима для угловых размеров объекта $\xi = l/H < 3,1\alpha_D$. Заметим также, что выражение для минимальной обнаруживаемой разности температур не содержит МПФ, поскольку тест-объектом при ее получении является квадрат, а не мира, и отношение сигнал/шум вычисляется через величину яркости объекта в пространственной области (v здесь введена как параметр объекта для единообразия).

Перейдем к расчетам минимальной разрешаемой разности температур ΔT_R , которая представляет собой минимальную разницу температур между штрихами мира определенной пространственной частоты и фоном, при которой возможно различие глазом на экране штрихов мира. Эта функция частоты устанавливает связь между пространственным и температурным разрешениями. При вычислении здесь отношения сигнал/шум используется МПФ, и в качестве объекта рассматривается тепловая тест-мира (мира Фуко), состоящая из 4-х прямоугольных полос, высота которых в семь раз превышает их ширину [4].

Для ΔT_R при указанных условиях в [3, 4] получено выражение (периодичная структура мира выбирается вдоль оси x и частота v относится к этой же оси)

$$\Delta T_R(v) = \frac{\pi^2 \cdot \Delta T_{NETD} \cdot SNR_R \Gamma_s v}{8 \cdot h(v)} \left(\frac{2\alpha_D \beta_D}{7\Delta f \cdot t_0 \cdot f_f \cdot t_E} \right)^{0,5} = 0,66 \frac{\Delta T_{NETD} \cdot SNR_R \Gamma_s v}{h(v)} \left(\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f \cdot t_0 \cdot f_f \cdot t_E} \right)^{0,5}. \quad (4)$$

В этом выражении в дополнение к определенным ранее величинам: $h(v)$ – МПФ всей системы на частоте v , равная произведению МПФ отдельных звеньев тепловизионной системы наблюдения, Γ_s – угловое увеличение системы камера – дисплей. Для матричного приемника $\Delta f \cdot t_0 = 0,5$. Примем также, что $\Gamma_s = 1$ (оно обычно невелико), $\alpha_D = \beta_D$, тогда (4) переписется так (выделен множитель C , независящий от частоты):

$$\Delta T_R(v) = C v / h(v), \quad C = (0,93 \cdot \Delta T_{NETD} \cdot SNR_R \cdot \alpha_D) / (f_f \cdot t_E)^{0,5}. \quad (5)$$

В большинстве практических случаев электронный блок и дисплей не искажают изображения, которое создает тепловизор [5]. Поэтому считают, что МПФ электронного блока и дисплея равняются единице в пределах рабочей полосы частот. Таким образом, для МПФ тепловизора $h(v)$ достаточно учесть МПФ оптической системы (объектива) $h_o(v)$, пространственную $h_D(v)$ и временную $h_{Dt}(v)$, МПФ матричного приемника излучения, а также МПФ глаза наблюдателя $h_E(v)$. Кроме этих компонентов МПФ, при движении объекта относительно камеры необходимо ввести в МПФ еще множитель, связанный с движением объекта (motion) $h_m(v)$, который не рассматривался ранее, в том числе при аэрокосмической съемке [6], но который оказывает существенное влияние (как будет видно ниже) на МПФ и разрешаемую температуру системы. Таким образом, для полной МПФ имеем выражение

$$h(v) = h_o(v) h_D(v) h_{Dt}(v) h_E(v) h_m(v). \quad (6)$$

Вычислим последовательно все компоненты МПФ. Для МПФ объектива воспользуемся приближением линейной зависимости от частоты [4]:

$$h_o(v) = 1 - (1 - h_1)(v/v_1), \quad (7)$$

где v_1 – пространственная частота, при которой значение МПФ уменьшается до значения h_1 .

Пространственная часть МПФ матричного приемника $h_D(v)$ определяется в основном его чувствительным элементом – угловым размером пикселя α_D , т. е.

$$h_D(v) = \sin c(\alpha_D v) \equiv \sin(\pi \alpha_D v) / (\pi \alpha_D v). \quad (8)$$

Эта МПФ зависит, таким образом, от соотношения угловой пространственной частоты наблюдаемой картины (мира) и углового мгновенного поля зрения прибора. Параметры

h_1 и v_1 функции (7) можно найти из условия согласования пространственной МПФ объектива и приемника по принципу равнозначности, считая что они одинаково ухудшают качество изображения, так что на частоте разрешения v_{res} контраст каждой подсистемы равен 0,5:

$$1 - (1 - h_1)(v_{res}/v_1) = \sin(\pi\alpha_D v_{res}) / (\pi\alpha_D v_{res}) = 0,5. \quad (9)$$

Решение второго из уравнений (9) есть $\alpha_D v_{res} = 0,6$, тогда получаем

$$h_o(v) = 1 - (\alpha_D/1,2)v. \quad (10)$$

Для МПФ глаза наблюдателя $h_E(v)$ используем аппроксимацию Шульца [7], которая, как считается [5], наилучшим образом аппроксимирует экспериментальную МПФ глаза:

$$h_E(v) = 2,63 \cdot [\exp(-1,92v) - \exp(-5,67v)]. \quad (11)$$

Временная МПФ $h_{Dt}(v)$ приемника излучения, учитывающая его инерционность [6]

$$h_{Dt}(v) = (1 + 4\pi^2 t_D^2 f^2)^{-0,5} = (1 + 4\pi^2 t_D^2 \alpha_D^2 f_f^2 v^2)^{-0,5}, \quad (12)$$

где t_D – постоянная времени приемника излучения (для микроболометра обычно $t_D = 10$ мс), и подставлена связь между пространственной угловой частотой v и временной частотой f в соответствии с формулой $f = (\alpha_D/t_0)v = \alpha_D f_f v$; время формирования одного элемента изображения t_0 для микроболометрической матрицы определяется частотой кадров $t_0 = 1/f_f$.

Очевидно, что для МПФ, учитывающей движение объекта (носителя), $h_m(v)$, можно применить аналогичную (12) передаточную функцию эталонного фильтра, в которую войдут скорость движения носителя V и период мира l :

$$h_m(v) = [1 + 4\pi^2 t_D^2 (V/l)^2]^{-0,5} = [1 + 4\pi^2 t_D^2 (2vV/H)^2]^{-0,5}. \quad (13)$$

Отметим, что обычно при расчетах $\Delta T_R(v)$ используется методика [5, 6], когда для учета МПФ электронного тракта и глаза вводится коэффициент ширины полосы, показывающий отличие реальной полосы пропускания от эффективной шумовой полосы эталонного фильтра Δf в (4). В данной работе используется иной подход, при котором МПФ всех звеньев системы учитываются непосредственно в общей МПФ (6), а эффективная ширина полосы соответствует эталонному фильтру (формула (2)).

Наконец, перейдем к случаю оценки ΔT_R , когда в системе отсутствует оператор и анализируется электронное изображение мира Фуко с помощью порогового устройства. При этом исключается не только МПФ глаза из формулы (6), но и из (4) исключаются факторы, учитывающие временное и пространственное интегрирование изображений глазом оператора. В результате вместо (5), (6) получаем следующее выражение для минимальной разрешаемой разности температур [6]:

$$\Delta T_R^*(v) = (\pi \cdot \Delta T_{NETD} \cdot SNR_R) / (4 \cdot h^*(v)), \quad h^*(v) = h_o(v)h_D(v)h_{Dt}(v)h_m(v) \quad (14)$$

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 изображены МПФ отдельных звеньев тепловизора ICI 8640 P с наименьшей эквивалентной шуму разницей температур 0,02 К и общая МПФ для трех камер в зависимости от угловой пространственной частоты наблюдаемой мира Δv (мрад⁻¹). Расчеты проведены, как и в табл. 2, для высоты съемки $H=100$ м и скорости движения БПЛА $V=5$ м/с. Заметим, что типичный диапазон скоростей БПЛА составляет 0–15 м/с и диапазон высот 0–500 м. Общие МПФ для камер 1 и 2 совпадают ввиду одинаковых параметров, от которых зависит МПФ.

Для того чтобы оценить влияние МПФ глаза оператора и МПФ движения БПЛА на общую МПФ системы, на рис. 2 показаны также МПФ камеры ICI 8640 P без учета МПФ глаза и МПФ движения. Как видим, влияние МПФ глаза существенно только при малых частотах ($< 0,2$ мрад⁻¹), тогда как влияние движения носителя значительно во всем диапазоне частот.

Расчет минимальных разрешаемых температур для ИК камер выполняется по формулам (5), (6). На рис. 3 показаны зависимости детектируемых и разрешаемых камерами

разностей температур в зависимости от частоты, причем для камеры 1 приведены еще кривые: без учета МПФ глаза наблюдателя и без МПФ движения носителя. Включение в схему глаза наблюдателя несущественно меняет разрешаемый температурный контраст, тогда как движение носителя, даже с относительно небольшой скоростью (5 м/с), существенно снижает разрешаемую разность температур. Заметим, что на графиках для малых частот, если ΔT_R становилось меньше ΔT_{NETD} (что физически неверно), полагалось $\Delta T_R = \Delta T_{NETD}$. Детектируемые разности температур в основном меньше, чем разрешаемые, хотя для малых частот они могут быть и больше, что, возможно, связано с улучшением разрешения при сближении угловых размеров пикселя и объекта (пересечение кривых ΔT_R и ΔT_D наблюдается при частоте, соответствующей угловому размеру пикселя). На рис. 4 показаны для сравнения разрешаемые разности температур камер для случая наблюдения оператором (5) и для случая машинной обработки (14). При наблюдении на экране разрешаемые температуры ниже, что объясняется временным и пространственным интегрированием изображений глазом (сравните выражения (4) и (14) без учета $h(v)$ и $h^*(v)$) и что для рассматриваемых параметров заметно улучшает отношение сигнал/шум.

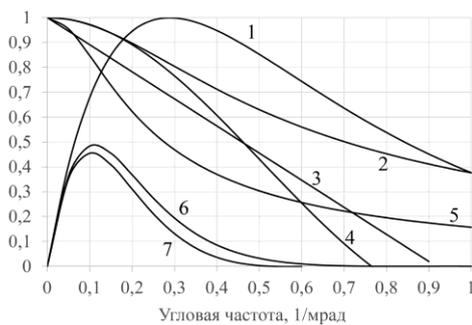


Рис. 1. МПФ отдельных звеньев для камеры ICI 8640 P и общие МПФ для трех камер: 1 – МПФ глаза; 2 – временная МПФ пикселя; 3 – МПФ объектива; 4 – пространственная МПФ пикселя; 5 – МПФ движения носителя; 6 – общая МПФ камер 1 и 2 (табл. 1); 7 – общая МПФ камеры 3
Fig. 1. MTF of individual components for the ICI 8640 P camera and the entire MTF for all three cameras: 1 – MTF of eye; 2 – temporary MTF of pixel; 3 – MTF of lens; 4 – spatial MTF of pixel; 5 – MTF of carrier motion; 6 – total MTF of cameras 1 and 2 (Table 1); 7 – total MTF of camera 3

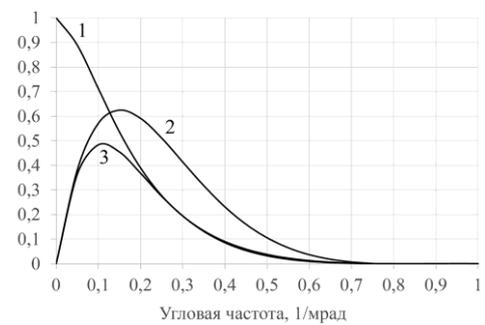


Рис. 2. МПФ камеры ICI 8640 P: 1 – общая без учета МПФ глаза; 2 – общая без учета МПФ движения БПЛА; 3 – общая с учетом всех звеньев системы
Fig. 2. MTF of the ICI 8640 P camera: 1 – MTF without taking into account the MTF of the eye; 2 – MTF without taking into account the MTF of UAV movement; 3 – total MTF taking into account all parts of the system

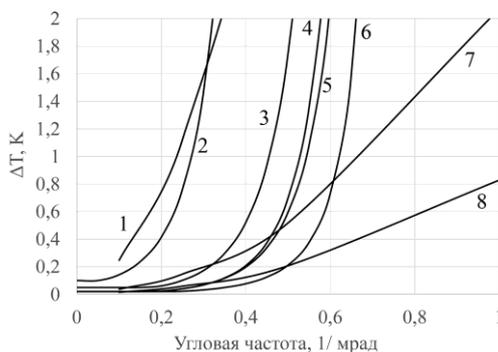


Рис. 3. Разрешаемые ΔT_R и детектируемые ΔT_D разности температур для камер 1, 2, 3 (из табл. 1): 1 – ΔT_D камеры 3; 2 – ΔT_R камеры 3; 3 – ΔT_R камеры 2; 4 – ΔT_R камеры 1; 5 – ΔT_R камеры 1 без учета МПФ глаза; 6 – ΔT_R камеры 1 без учета МПФ движения; 7 – ΔT_D камеры 2; 8 – ΔT_D камеры 1
Fig. 3. Resolvable ΔT_R and detectable ΔT_D temperature differences for cameras 1, 2, 3 (from Table 1): 1 – ΔT_D of camera 3; 2 – ΔT_R of camera 3; 3 – ΔT_R of camera 2; 4 – ΔT_R of camera 1; 5 – ΔT_R of camera 1 excluding eye MTF; 6 – ΔT_R of camera 1 excluding motion MTF; 7 – ΔT_D of camera 2; 8 – ΔT_D of camera 1

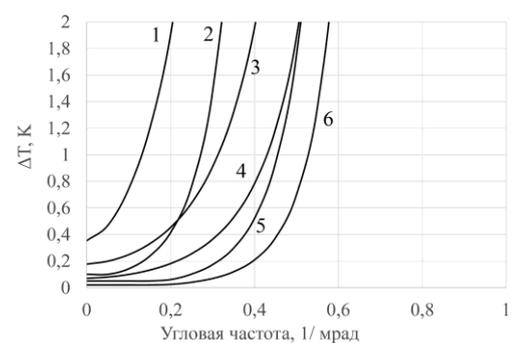


Рис. 4. ΔT_R для камер 1, 2, 3: при компьютерном анализе – кривые 1, 3, 4 для камер 3, 2, 1 соответственно; при наблюдении оператором на экране дисплея – кривые 2, 5, 6 для камер 3, 2, 1
Fig. 4. ΔT_R for cameras 1, 2, 3: by computer analysis – curves 1, 3, 4 for cameras 3, 2, 1, respectively; observed by the operator on the display screen – curves 2, 5, 6 for cameras 3, 2, 1 respectively

Заклучение

Получены формулы и рассчитаны минимальные детектируемые и минимальные разрешаемые разности температур для трех серийных миниатюрных тепловизоров при съемке с беспилотных авианосителей. Предложен альтернативный подход к расчету минимальной разрешаемой разности температур, отличающийся расчетом полной МПФ системы наблюдения с учетом всех звенев без введения, как это обычно принято, коэффициента отличия реальной ширины шумовой полосы системы от ширины полосы эталонного фильтра.

Расчеты проведены как для случая наблюдения изображения оператором на дисплее, так и для случая отсутствия дисплея и наблюдателя (машинная обработка). Показано, что сама по себе МПФ глаза незначительно влияет на разрешаемую температуру, тогда как влияние пространственной и временной интегрирующей способности глаза может значительно уменьшить разрешаемые температуры. Впервые учтено влияние на разрешаемые температуры скорости движения носителя и показано, что оно значительно даже при небольшой скорости движения (5 м/с при высоте съемки 100 м), и эту компоненту МПФ необходимо учитывать при тепловизионной съемке с движущихся платформ.

Список литературы

- 1 Uto K., Seki H., Saito G., Kosugi Y. Characterization of Rice Paddies by a UAV-Mounted Miniature Hyperspectral Sensor System. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2013;6(2):851-860. DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2250921.
- 2 Cen H. Y., Wan L., Zhu J. P. Dynamic monitoring of biomass of rice under different nitrogen treatments using a lightweight UAV with dual image-frame snapshot cameras. *Plant Methods*. 2019;5(1). DOI: 10.1186/s13007-019-0418-8.
- 3 Ллойд Дж. *Системы тепловидения*. Москва: Мир; 1978.
- 4 Колобродов В.Г., Лихоліт М.І. *Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження*. Київ: НТУУ «КПІ»; 2007.
- 5 Аль-Мзирави А., Колобродов В.Г., Микитенко В.І. Расчет минимальной разрешаемой разности температур тепловизионных приборов. *Приборы и методы измерений*. 2015;6(1):64-69.
- 6 Колобродов В.Г., Лихоліт М.І., Тягур В.М.. Мінімальна розділювана різниця температур тепловізора аерокосмічного базування. *Космічна наука і технологія*. 2014;20(1):23-27. DOI: 10.15407/knit2014.01.023.
- 7 Карасик В.Е., Орлов В.М. *Лазерные системы видения*. Москва: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2001.

References

- 1 Uto K., Seki H., Saito G., Kosugi Y. Characterization of Rice Paddies by a UAV-Mounted Miniature Hyperspectral Sensor System. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2013;6(2):851-860. DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2250921.
- 2 Cen H. Y., Wan L., Zhu J. P. Dynamic monitoring of biomass of rice under different nitrogen treatments using a lightweight UAV with dual image-frame snapshot cameras. *Plant Methods*. 2019;5(1). DOI: 10.1186/s13007-019-0418-8.
- 3 Lloyd J. [*Thermal imaging systems*]. Moscow: Mir; 1978. (In Russ.)
- 4 Колобродов В.Г., Лихоліт М.І. [*Design of thermal and television surveillance systems*]. Київ: НТУУ «КПІ»; 2007. (In Ukrainian)
- 5 Al-Mziravi A., Kolobrodov V.G., Mikitenko V.I. [Calculation of the minimum resolved temperature difference of thermal imaging devices]. *Pribory i metody izmereniy=Devices and methods of measurements*. 2015;6(1):64-69. (In Russ.)
- 6 Колобродов В.Г., Лихоліт М.І., Тягур В.М. [Minimum resolvable temperature difference for thermal imager of space basing]. *Kosmichna nauka tehnologii =Space science and technology*. 2014;20(1):23-27. DOI: 10.15407/knit2014.01.023. (In Ukrainian)
- 7 Karasik V.E., Orlov V.M. [*Laser vision systems*]. Moscow: Publishing house MGTU im. N.E. Bauman; 2001. (In Russ.)

Сведения об авторах

Катковский Л.В., д.ф.-м.н., доцент, заведующий лабораторией дистанционной фотометрии НИИПФП им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета.

Адрес для корреспонденции

220045, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Курчатова, д. 7,
Научно-исследовательское учреждение
«Институт прикладных физических проблем
им. А. Н. Севченко» Белорусского
государственного университета
тел. +375-17-396-44-09;
katkovskyl@bsu.by, katkovskyl@gmail.com
Катковский Леонид Владимирович

Information about the authors

Katkovsky L.V., D.Sci., Associate Professor, Head of the Laboratory of Remote Photometry NIIPFP named by A. N. Sevchenko of Belarusian State University.

Address for correspondence

220045, Republic of Belarus,
Minsk, Kurchatova str., 7,
Research Institution “Institute of Applied
Physical Problems named by A. N. Sevchenko”
of Belarusian State University
tel. + 375-17-396-44-09;
katkovskyl@bsu.by, katkovskyl@gmail.com
Katkovsky Leonid Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-62-70>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.85

ПОДХОД К АНАЛИЗУ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

ИСКРА Н.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 31 января 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В данной работе предлагается подход к семантическому анализу изображений, который можно использовать в системах технического зрения. Целью работы является разработка метода автоматического построения семантической модели, формализующей пространственные связи между объектами на изображении, а также ее исследование. Отличительной особенностью данной модели является определение значимых объектов, благодаря чему алгоритм построения анализирует на порядок меньше отношений между объектами, что позволяет существенно сократить время обработки изображения и объем используемых ресурсов. Уделено внимание выбору нейросетевого алгоритма детекции объектов на изображении как предварительного этапа построения модели. Проведены эксперименты на тестовых наборах их базы Visual Genome, разработанной исследователями из Стэнфордского университета для оценки алгоритмов детекции объектов, аннотирования регионов и других актуальных задач анализа изображений. При оценке работы модели оценивалась точность определения пространственных отношений. Также были проведены эксперименты по интерпретации полученной модели, а именно аннотированию, т. е. получению текстового описания содержания изображения. Результаты экспериментов сравнивались с аналогичными результатами нейросетевой генерации аннотаций изображений, полученными на той же базе другими исследователями, а также автором данной работы ранее. Показано улучшение качества аннотирования изображений до 60 % (в соответствии с метрикой METEOR) по сравнению с нейросетевыми методами. Кроме того, использование данной модели позволяет частично очистить и нормализовать данные для обучения, в том числе нейросетевых архитектур, широко применяющихся в анализе изображений. Рассматриваются перспективы использования данной методики в ситуационном мониторинге. В качестве недостатков данного подхода можно отметить некоторые упрощения при построении модели, которые будут учтены в дальнейшем развитии модели.

Ключевые слова: детекция объектов, семантическая модель, нейронные сети, обработка изображений, обработка языка, R-CNN, WordNet, ситуационный мониторинг, видеонаблюдение.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Искра Н.А. Подход к анализу изображений для систем технического зрения. Доклады БГУИР. 2020; 18(2): 62-70.

APPROACH TO IMAGE ANALYSIS FOR COMPUTER VISION SYSTEMS

NATALIA A. ISKRA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 31 January 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. This paper suggests an approach to the semantic image analysis for application in computer vision systems. The aim of the work is to develop a method for automatically construction of a semantic model, that formalizes the spatial relationships between objects in the image and research thereof. A distinctive feature of this model is the detection of salient objects, due to which the construction algorithm analyzes significantly less relations between objects, which can greatly reduce the image processing time and the amount of resources spent for processing. Attention is paid to the selection of a neural network algorithm for object detection in an image, as a preliminary stage of model construction. Experiments were conducted on test datasets provided by Visual Genome database, developed by researchers from Stanford University to evaluate object detection algorithms, image captioning models, and other relevant image analysis tasks. When assessing the performance of the model, the accuracy of spatial relations recognition was evaluated. Further, the experiments on resulting model interpretation were conducted, namely image annotation, i.e. generating a textual description of the image content. The experimental results were compared with similar results obtained by means of the algorithm based on neural networks algorithm on the same dataset by other researchers, as well as by the author of this paper earlier. Up to 60 % improvement in image captioning quality (according to the METEOR metric) compared with neural network methods has been shown. In addition, the use of this model allows partial cleansing and normalization of data for training neural network architectures, which are widely used in image analysis among others. The prospects of using this technique in situational monitoring are considered. The disadvantages of this approach are some simplifications in the construction of the model, which will be taken into account in the further development of the model.

Keywords: object detection, semantic model, neural networks, image processing, natural language processing, R-CNN, WordNet, situational monitoring, video surveillance.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Iskra N.A. Approach to image analysis for computer vision systems. Doklady BGUIR. 2020; 18 (2): 62-70.

Введение

Задача анализа изображений в системах технического зрения стоит сегодня достаточно остро. Автоматическая интерпретация изображения при мониторинге – задача нетривиальная. Например, для системы видеонаблюдения было бы актуальным не просто записывать и сохранять видео, но и анализировать происходящее, а также сигнализировать о любых подозрительных ситуациях – нарушениях, происшествиях, действиях, требующих реагирования.

Рассматриваемый в данной работе подход к анализу изображений системой технического зрения проходит по следующему сценарию:

Шаг 1. Выделение отдельных объектов на изображении. Это могут быть только значимые в контексте данной системы объекты (например, участники движения, дорожная разметка и знаки в системах наблюдения за трафиком), области, очерчивающие объекты, или более точное выделение объекта попиксельно.

Шаг 2. Построение семантической модели. На данном этапе формализуются связи между объектами и/или атрибуты отдельных объектов.

Шаг 3. Интерпретация модели. По построенной модели может быть получено текстовое описание происходящего (аннотация изображения, например, для ведения журнала наблюдения) или определены конкретные ситуации на изображении, представляющие интерес (например, случаи нарушения правил дорожного движения, дорожно-транспортные происшествия и т. п.) Во втором случае интерпретация модели будет состоять в выделении только тех связей и атрибутов, которые могут сигнализировать об аномальной ситуации.

Наиболее важной частью в реализации анализа ситуации является построение интерпретируемой модели изображения. В данной статье основное внимание будет уделено методике построения этой модели, а также выбору алгоритма детекции объектов на изображении как предварительного этапа построения модели.

Теоретический анализ

А. Детекция объектов на изображении

Первым этапом анализа является обработка исходного изображения и автоматическое распознавание объектов на нем. При этом решается одна из следующих подзадач [1]:

- семантическая сегментация изображения (англ. Semantic Segmentation) – для каждого пикселя во входном изображении определить его категорию или класс;
- классификация и локализация (англ. Classification and Localization) – определить класс одиночного объекта на изображении и его точное месторасположение;
- детекция объектов (англ. Object Detection) – определить класс и прямоугольную область, ограничивающую каждый из объектов на изображении;
- сегментация образов (англ. Instance Segmentation) – на изображении с множеством объектов определить контуры (все видимые пиксели) и класс каждого из объектов.

Для построения семантической модели изображения наиболее интересны решения двух последних подзадач.

Среди современных алгоритмов детекции объектов актуальны методы, в том числе основанные на использовании глубоких нейронных сетей:

- метод скользящего окна (англ. Sliding Window) [2];
- метод предложения регионов (англ. Region Proposals) [3];
- метод детекции за один проход (англ. Single Shot Detection) [4].

Каждый из подходов имеет свои достоинства и недостатки, важные с точки зрения применения их в системах, требующих анализа изображения¹.

Для построения модели, описанной в данной статье, наиболее подходят методы, основанные на классе нейросетевых моделей с предложением регионов, так называемые R-CNN, и их развитие:

- R-CNN [3] – представляет собой модель последовательной обработки изображения: генерацию набора предложений регионов, применение предобученной свёрточной нейронной сети с завершающим слоем опорных векторов и линейную регрессию для более точного определения регионов;
- Fast R-CNN [5] – модель, в которой для ускорения работы предыдущей последовательности обработки добавляется подборка регионов и объединение всех нейросетевых моделей в одну;
- Faster R-CNN [6] – для еще большего ускорения в модели используется селективный поиск регионов;
- Mask R-CNN [7] – в отличие от предыдущих моделей, данная использует бинарную маску для определения не просто прямоугольного региона – кандидата в объекты, а конкретных пикселей, принадлежащих объекту, что, по сути, и является решением задачи сегментации образов, описанной выше.

¹ Хурсов П.С., Искра Н.А. Алгоритмы детекции объектов для анализа изображений. Информационные технологии и системы: материалы международной научной конференции. Минск, 2019:128-129.

Б. Модель изображения

За основу модели изображения принимается так называемый сцен-граф (англ. Scene Graph) [8]. Сцен-граф – это структура данных, описывающая содержание сцены, которая, в свою очередь, может быть задана изображением или его текстовым описанием. В сцен-графе закодированы экземпляры объектов, их атрибуты и отношения между объектами.

Формально, сцен-граф определяется следующим образом: пусть C – множество классов объектов, A – множество типов их атрибутов, R – множество типов отношений. Сцен-граф задается как $G = (O, E)$, где $O = \{o_1, \dots, o_n\}$ – множество объектов – вершины графа, $E \subseteq O \times R \times O$ – множество ребер графа. Каждый объект представлен как $o_i = \{c_i, A_i\}$, где $c_i \in C$ – класс объекта, а $A_i \subseteq A$ – его атрибуты.

Сцен-граф может быть привязан к изображению. Пусть B – множество прямоугольных областей, каждая из которых ограничивает определенный объект на изображении (назовем их области объектов, англ. Bounding Boxes), тогда привязка сцен-графа $G = (O, E)$ к изображению, это функция $\gamma: O \rightarrow B$, или γ_o .

Для экспериментальной части используется набор данных Visual Genome¹, который представляет собой набор из размеченных 108 077 изображений, для которых путем привлечения большого количества людей, вручную были определены 5,4 млн описаний регионов в виде текста и сцен-графов.

Пример привязки сцен-графа к регионам на изображении из Visual Genome приведен на рис. 1.



Рис. 1. Пример изображения из Visual Genome с привязкой [9]
Fig. 1. An example of an image from Visual Genome with grounding [9]

Текстовые привязки сцен-графов (каждый объект, атрибут и отношение) в Visual Genome соответствуют синсетам из WordNet [10]. WordNet – сетевое представление слов, структурированное по смысловым отношениям между ними. В WordNet каждое слово представлено множеством своих синонимичных значений, которое называется синсетом (англ. synset). Каждый синсет представлен тройкой $\langle \text{word} \rangle. \langle \text{pos} \rangle. \langle \text{number} \rangle$, где word – слово, pos – часть речи (n – существительное, v – глагол, a – прилагательное, r – наречие), number – индекс значения. Например, понятие «человек» в WordNet представлено тремя значениями person.n.01 , person.n.02 и person.n.03 . Текстовая привязка объекта «person» из Visual Genome соответствует синсету person.n.01 . В WordNet между синсетами установлены связи синонимии, антонимии, «часть – целое» (мероним – холоним), «общее – частное» (гипероним – гипоним).

Методика построения модели изображения

Для построения модели изображения в виде сцен-графа нужно сначала определить объекты на изображении, а затем для каждой пары объектов принять решение, могут ли они иметь связи и какие именно [11]. Подбор связей может быть значительно упрощен за счет

¹ Visual Genome. URL: <https://visualgenome.org>.

использования внешних баз знаний (общих или узкоспециализированных для конкретной предметной области)¹. В обоих случаях для изображения, на котором найдено n объектов, необходимо рассмотреть $(n^2 - n)$ отношений. В данной работе предлагается упростить решение за счет определения так называемых «значимых» (англ. salient) объектов [12] и в дальнейшем рассматривать $(n - 1)$ отношений. Такой подход соответствует сценарию наблюдения за определенными объектами в системах мониторинга.

Частотный анализ данных Visual Genome показывает, что самые частые отношения между объектами на изображениях – это пространственные отношения: отношение «на» («on») встречается 642 150 раз, «в» («in») – 218 166, «сзади» («behind») – 39 833. Кроме того, благодаря иерархической структуре привязок WordNet, пространственные отношения могут быть описаны более подробно: например, «car in a parking lot» («машина на стоянке») или «car is parked in a parking lot» («машина припаркована на стоянке»). Действительно, при взгляде на изображение человек прежде всего отмечает, как объекты расположены друг относительно друга в пространстве. При автоматической обработке также возможно определить смысловые пространственные отношения между объектами².

На рис. 2 показана методика автоматического построения модели для пространственных отношений.

На рис. 2, а визуализирована система всех возможных пространственных отношений: область значимого объекта (субъекта) закрашена, остальные области – варианты расположения объекта интереса (объекта), для которого при помощи дерева принятия решений на рис. 2, б будет определяться вид пространственного отношения вида «субъект – отношение – объект».

Следует отметить, что для наименований видов отношений в данной модели используются предлоги, которые не представлены в WordNet, т. е. на данном этапе привязка к WordNet невозможна, однако на следующем шаге (для интерпретации) будут применяться синсеты, содержащие данные предлоги и их смыслы (be.v.01, along.r.01 и др.).

В дереве прямоугольниками показаны блоки, соответствующие определенному виду отношения, при этом выделены более общие отношения, требующие уточнения (как гиперонимы из WordNet). При построении дерева для ускорения процесса принятия окончательного решения правила (на рисунке показаны ромбами) формулировались в соответствии со статистическими данными анализа Visual Genome таким образом, что более частый случай будет находиться в дереве левее. Так, в исходном наборе данных отношение «рядом» (near) встречается чаще других пространственных отношений (26 316 раз), «сверху» (above) – существенно чаще, чем «снизу» (below) – 13 767 раз и 3 349 раз соответственно и т. д.

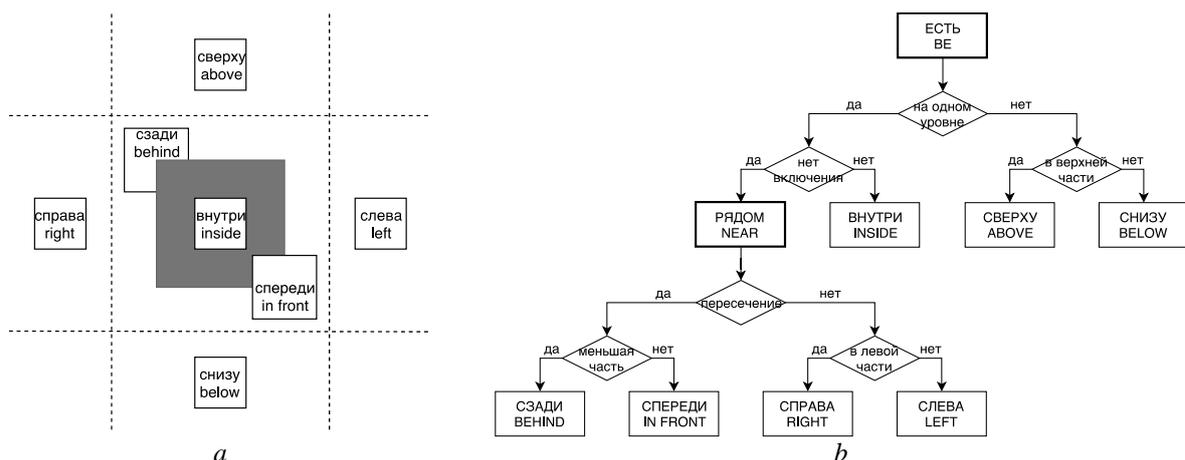


Рис. 2. Методика автоматического построения модели для пространственных отношений
Fig. 2. The technique of automatic model construction for spatial relations

¹ Iskra N., Iskra V., Lukashevich M. Neural network based image understanding with ontological approach. Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2019): материалы международной научно-технической конференции. Минск, 2019: 113-122.

² Искра Н.А., Межень А.Л., Шункевич Д.В. Онтология предметной области пространственных сущностей для системы семантического анализа изображений. Информационные технологии и системы: материалы международной научной конференции. Минск, 2019: 112-113.

Реализация метода, применяемая для постановки экспериментов, описанных далее, сначала производит детекцию объектов методом на основе Faster R-CNN, определяя классы объектов и их области. За значимый принимается объект с наибольшей площадью области.

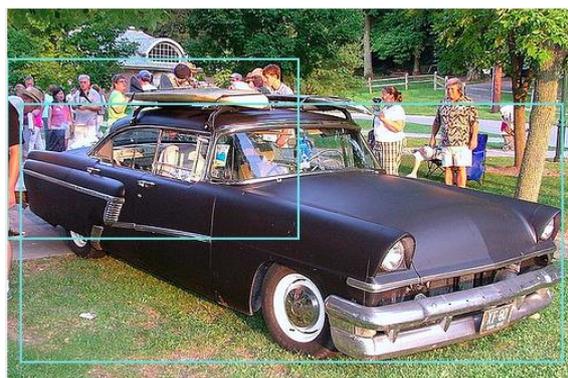
На реальных естественных изображениях границы областей объектов, как правило, пересекаются. Если пересечение областей значимого объекта и объекта интереса менее 50 % площади области объекта интереса, выбираются соответствующие правилу решения отношения из множества {«сверху», «снизу», «слева», «справа»} (т. е. считается, что пересечения нет). При пересечении более 50 % выбор отношения осуществляется на основании сравнения пиксельных масок объектов, полученных при применении Mask R-CNN к областям объектов: если в зоне пересечения больше пикселей значимого объекта, выбирается отношение «сзади», и отношение «спереди» – в противоположном случае.

Экспериментальная часть

А. Экспериментальная оценка построения модели

Для экспериментальной оценки методики построения модели изображения из базы Visual Genome были выбраны два набора изображений.

Первый набор представляет собой выборку из изображений, в которой на каждое из рассматриваемых отношений приходится по 50 регионов с привязкой (т. е. 50 регионов с отношением «above», 50 регионов – с «below» и т. д. – всего 350 регионов). Примеры таких изображений приведены на рис. 3.



a – crowd behind car



b – car below trees

Рис. 3. Примеры регионов из экспериментальной выборки с соответствующими аннотациями регионов
Fig. 3. Examples of regions from the experimental sample with corresponding captions

Второй набор выбирался автоматически по результатам детекции объектов и определению отношений между объектами в соответствии с методикой. Его размер также 350 регионов (по 50 регионов на каждое отношение).

Размер экспериментальных выборок относительно небольшой, поскольку верификацию результатов определения отношений планировалось проводить вручную для того, чтобы оценить не только точность построения модели, но и «натуральность» (англ. *gameability*) полученных результатов, т. е. исключить ситуации, когда высокий показатель метрики оценки качества (правильный результат) может соответствовать выражению, которое человек посчитает «ненатуральным» (например, «the sky is blue in color» вместо «the sky is blue»)¹.

В первом эксперименте автоматически определяются отношения в выбранных регионах и для обоих наборов результаты сравниваются с эталонными (приведенными в базе) и оцененными экспертами (см. табл. 1).

Б. Экспериментальная оценка интерпретации модели

Для экспериментальной оценки интерпретации построенной модели для первого набора регионов изображений генерируются текстовые описания путем замены отношений

¹ Shunkevich D., Iskra N. Ontological approach to image captioning evaluation. Pattern Recognition and Information Processing: Proceedings of the 14th international conference. Minsk: Bestprint, 2019: 219-223.

соответствующими наиболее часто встречающимся синонимами из WordNet (например, «*car below tree*» превращается в «*car parked under tree*»), и полученные аннотации сравниваются с эталонными при помощи метрики METEOR [13], которую в данном контексте можно рассматривать как оценку качества аннотирования. В табл. 3 приводятся значения METEOR, полученные при применении комбинированного нейросетевого [14] и чисто сверточного нейросетевого [15] подходов.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приводятся результаты оценки построения модели. Результаты детекции объектов в эксперименте принимаются за верные, если совпадает метка класса, различия в выделении областей принимаются за несущественные в данном контексте.

Таблица 1. Оценка результатов построения модели
Table 1. The evaluation of model construction results

Наименование параметра	Набор 1		Набор 2	
	кол-во	%	кол-во	%
Размер набора (отношений/объектов)	350/700	100	350/700	100
Детекция объектов (при помощи RCNN)	687	98,1	694	99,1
Отношения (совпадение с представленными в базе)	335	95,7	344	98,2
Отношения (совпадение при визуальном анализе)	340	97,1	346	98,8

Ошибки в детекции (в первом наборе их 13, во втором – 6) «отбраковывают» регионы, в которые входят данные объекты. Соответственно, для первого набора, если считать, что при определении отношений в эксперименте участвуют уже не 350, а 343 региона, точность определения отношений будет не 95, а 99 %. Более высокий процент правильности определения отношений при визуальной оценке объясняется тем, что в Visual Genome некоторые исходные данные содержат неточности.

В табл. 2 приведены результаты совпадения отдельных видов отношений с представленными в базе для набора 1, и видно, что в исходном наборе присутствует 5 неточностей, т. е., например, в базе записано отношение «*below*», а эксперт видит, что объекты находятся рядом (отношение «*near*»). Таким образом, можно использовать методику автоматического определения пространственных отношений и для частичной очистки данных. Так, перезапустив процесс построения модели для набора 1, удалось «исправить» 4 из 5 неточностей, определенных путем визуального анализа.

Таблица 2. Анализ точности определения отношений по видам
Table 2. The analysis of relations estimation precision by types

Пространственное отношение	Визуальная оценка (из 50)	Предлагаемая методика (из 50)
BEHIND	49	44
IN FRONT	48	45
RIGHT	50	50
LEFT	50	50
INSIDE	50	50
ABOVE	49	48
BELOW	49	48

В табл. 3 приведены результаты оценки качества аннотирования регионов для первого «исправленного» набора.

Таблица 3. Оценка качества аннотирования регионов
Table 3. The evaluation of region captioning quality

Модель кодера	METEOR
CNN + RNN [14]	0,305
TCN [15]	0,290
Семантическая модель	0,515

Как видно в таблице, использование семантической модели для кодирования информации из изображения существенно превосходит нейросетевые модели при построении осмысленных фраз, описывающих регионы. По метрике METEOR, учитывающей не только структуру аннотации, но и ее семантические вариации, предлагаемая методика показывает результаты более чем на 60 % лучше, чем нейросетевые подходы.

Заключение

Таким образом, предлагаемая в данной работе методика построения модели изображения, отличительной особенностью которой является определение значимых объектов, анализирует на порядок меньше отношений между объектами, что позволяет существенно сократить время обработки изображения на тестовых наборах из базы Visual Genome и улучшить качество аннотирования.

Необходимо отметить, что данный подход содержит упрощения: за значимый объект принимается самый большой, рассматриваются только отношения между двумя объектами (т. е. только фрагменты сцен-графа), не принимаются во внимание атрибуты объектов. В дальнейшем планируется использовать более сложные подходы к определению значимого объекта (в том числе на основе конкретной предметной области), полное построение и анализ сцен-графа.

При проведении ситуационного мониторинга для более точной интерпретации модели нужно выбирать изображения со специальными ситуациями, использовать базы изображений и экспертные знания из конкретных предметных областей (мониторинг трафика, мониторинг техногенных объектов и т. д.).

Список литературы / References

1. Liu L., Ouyang W., Wang X., Fieguth P., Chen J., Liu X., Pietikäinen M. Deep learning for generic object detection: A survey. *International journal of computer vision*. 2019. DOI: 10.1007/s11263-019-01247-4.
2. Müller J., Fregin A., Dietmayer K. Disparity sliding window: object proposals from disparity images. *IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems*. New York: IEEE, 2018: 5777-5784. ISBN 978-1-5386-8094-0.
3. Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2014: 580-587. DOI: 10.1109/CVPR.2014.81.
4. Liu W., Anguelov D., Erhan D., Szegedy C., Reed S., Fu C.Y., Berg A.C. Ssd: Single shot multibox detector. *European conference on computer vision*. Springer, Cham, 2016: 21-37. DOI: 10.1007/978-3-319-46448-0_2.
5. Girshick R. Fast r-cnn. *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*. 2015: 1440-1448. DOI: 10.1109/ICCV.2015.169.
6. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks. *Advances in neural information processing systems*. 2015: 91-99. DOI: 10.5555/2969239.2969250.
7. He K., Gkioxari G., Dollár P., Girshick R. Mask r-cnn. *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*. 2017: 2961-2969. DOI: 10.1109/ICCV.2017.322.
8. Xu D., Zhu Y., Choy C.B., Fei-Fei L. Scene graph generation by iterative message passing. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2017: 5410-5419. DOI: 10.1109/CVPR.2017.330.
9. Krishna R., Zhu Y., Groth O., Johnson J., Hata K., Kravitz J., Chen S., Kalantidis Y., Li L.J., Shamma D.A., Bernstein M.S. Visual genome: Connecting language and vision using crowdsourced dense image annotations. *International journal of computer vision*. 2017;123(1):32-73. DOI: 10.1007/s11263-016-0981-7.
10. Miller G.A. *WordNet: An electronic lexical database. First edition*. Cambridge: MIT Press; 1998. ISBN 9780262061971.
11. Yang J., Lu J., Lee S., Batra D., Parikh D. Graph r-cnn for scene graph generation. *Proceedings of the european conference on computer vision*. 2018: 690-706. DOI: 10.1007/978-3-030-01246-5_41.
12. Borji A., Cheng M.M., Hou Q., Jiang H., Li J. Salient object detection: A survey. *Computational visual media*. 2019;5(2):117-150. DOI: 10.1007/s41095-019-0149-9.

13. Banerjee S., Lavie A. METEOR: An automatic metric for MT evaluation with improved correlation with human judgments. Proceedings of the ACL workshop on intrinsic and extrinsic evaluation measures for machine translation and/or summarization. Michigan: Association for computational linguistics. 2005: 65-72. Anthology ID: W05-0909.
14. Johnson J., Karpathy A., Fei-Fei L. Densecap: Fully convolutional localization networks for dense captioning. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016: 4565- 4574. DOI: 10.1109/CVPR.2016.494.
15. Iskra N., Iskra V. Temporal Convolutional and Recurrent Networks for Image Captioning. Communications in Computer and Information Science. 2019; 1055. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-35430-5_21.

Сведения об авторе

Искра Н.А., магистр технических наук, старший преподаватель кафедры электронных вычислительных машин Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the author

Iskra N.A., M. Sci, senior lecturer at electronic computing machines Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-586-93-52;
e-mail: niskra@bsuir.by
Искра Наталья Александровна

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarussian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-586-93-52;
e-mail: niskra@bsuir.by
Iskra Natalia Alexandrovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-71-79>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.372.5

МЕТОДИКА СИНТЕЗА КВАЗИДВУХПОЛОСОВЫХ СОГЛАСУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

ЯНЦЕВИЧ М.А., ФИЛИППОВИЧ Г.А.

Военная академия Республики Беларусь (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 5 февраля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В статье представлены результаты исследования потенциальных возможностей аналитических методов синтеза широкополосных согласующих устройств для решения некоторых нестандартных схемотехнических задач. Нестандартность проявляется в способе задания частотной характеристики при синтезе цепи согласования в таких системах, как сотовая связь, когда необходимо обеспечить работу антенны в двух диапазонах. Способ задания частотной характеристики заключается в использовании частотного преобразования, которое дает возможность на начальном этапе синтеза задавать полосы пропускания диапазонов. Существенными особенностями является возможность независимого управления полосами пропускания диапазонов в процессе синтеза и величиной их изоляции. Такой способ задания частотной характеристики позволяет в большей степени использовать потенциальные характеристики метода согласования, всегда ограниченные сопротивлением нагрузки. Частотная характеристика в этих условиях становится квазидвухполосовой и имеет асимметрию, обусловленную конечной изоляцией диапазонов. Выработана и представлена общая концепция подхода к синтезу, которая включает разработку как модифицированного частотного преобразования, так и новой методики синтеза согласующей цепи. Полученное в результате исследований модифицированное частотное преобразование можно применять для всех видов классических аппроксимирующих функций произвольного порядка, используемых в задачах синтеза широкополосных частотно-избирательных согласующих устройств. Особенность методики заключается в использовании обобщенного метода Дарлингтона для задач широкополосного согласования сопротивлений в сосредоточенном элементном базисе с применением частотных характеристик, полученных при помощи модифицированного преобразования частоты. Также произведена оценка эффективности разработанной методики путем сравнения с известными результатами.

Ключевые слова: модифицированное частотное преобразование, обобщенный метод Дарлингтона, квазидвухполосовая частотная характеристика.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Янцевич М.А., Филиппович Г.А. Методика синтеза квазидвухполосовых согласующих устройств. Доклады БГУИР. 2020; 18(2): 71-79.

THE METOD OF SYNTHESIS OF QUASI-DUAL-BAND MATCHING DEVICE

MIKHAIL A. YANTSEVICH, HENADZY A. FILIPOVICH

Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 5 February 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The article presents some findings on the potential of analytical methods for the synthesis of broadband matching circuits for solving nontrivial circuit engineering problems. Nontriviality shows itself in the technique for the assignment of the frequency response model (approximation) for the broadband synthesis in cellular communication, when double-band antennas are essential. The frequency response model appears as the result of frequency transformation, which yields in the assignment of both bands at the very first stage of the synthesis. The bands' width and isolation between them may be controlled independently, which is the essential part of the frequency transformation. Such way offfrequency response assignment allows the potential of the method, which is always restricted by a load, to find broader application. In these conditions the frequency response turns to a quasi-double and asymmetrical one due to finite isolation between bands. We also present the general approach to the synthesis, which incorporates both the frequency transformation and novel synthesis technique. The modified frequency transformation can be applied to all types of traditional approximations of arbitrary orders in synthesizing broadband frequency-selective matching devices. The distinctive feature of this technique is in the use of generalized Darlington's synthesis for solving the problems of broadband matching of resistances in a lumped element basis with the application of frequency responses obtained through modified frequency transformation. We have also estimated the efficiency of the developed technique by comparison with the known results.

Keywords: modified frequency transform, generalized Darlington method, quasi-dual-band frequency response.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Yantsevich M.A., Filipovich H.A. The metod of synthesis of quasi-dual-band matching device. Doklady BGUIR. 2020; 18(2): 71-79.

Введение

При проектировании современных радиотехнических систем предъявляются требования, выполнение которых побуждает исследователей на поиск новых, более эффективных технических решений. Одним из таких требований является обеспечение многополосной частотной характеристики в тракте приема и обработки радиотехнических систем [1]. К таким, например, относятся современные системы радиосвязи: WLAN, работающая одновременно в частотных диапазонах 2400–2700, 3400–3800, 5150–5875 МГц, сотовая связь 890–960, 1710–1880 МГц, глобальные спутниковые системы позиционирования ГЛОНАСС, GPS, Galileo, работающие в двух диапазонах. Необходимость применения многополосных согласующих устройств (СУ) в современных радиотехнических системах вызывает интерес к существующим методам их реализации, а также разработке новых подходов к синтезу, основанному на физических принципах.

Различные подходы к решению задач синтеза многополосных СУ основаны на классических направлениях широкополосного согласования. Особое внимание обращают на себя аналитические подходы, которые относятся к точным методам синтеза, так как имеют строгое решение, а также возможность получать СУ, формирующие исходно заданные частотные характеристики передачи мощности.

Использование одной антенны для работы в двух диапазонах возможно либо согласованием антенны во всех диапазонах, либо согласованием в поддиапазонах. Последний вариант предпочтителен, поскольку обеспечивает более высокое качество согласования

в каждом поддиапазоне. Этот вывод следует из теоретических ограничений на пределы широкополосного согласования Боде¹. Пример частотной характеристики коэффициента отражения антенны для сотовой связи показан на рис. 1.

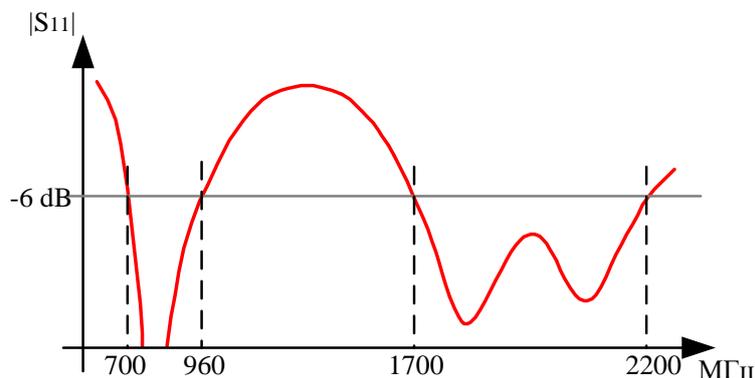


Рис. 1. Пример частотной характеристики двухполосной антенны
Fig. 1. The desired frequency response of dual-band antenna

Частотная характеристика на рис. 1, в отличие от характеристики двухполосного фильтра, не обеспечивает высокую изоляцию поддиапазонов, что также обусловлено ограничениями Боде. Такую характеристику принято считать квазидвухполосовой, и она отражает особенности задачи согласования. Среди обстоятельных работ, использующих аналитические методы синтеза двухполосных согласующих цепей, наибольший интерес представляет диссертация Девяткова². В работе использованы два подхода к синтезу:

- с использованием реактансного преобразования [2] в коэффициенте отражения;
- с применением обычного полосового преобразования к специальному виду низкочастотной характеристики заданной цепи [3].

Последний подход формирует так называемые квазидвухполосовые согласующие цепи, отличающиеся простой структурой цепи лестничного типа. Такие цепи используются в большинстве практических задач синтеза двухполосных СУ. Необходимо отметить, что представленный в работе Девяткова² аналитический метод синтеза ограничен использованием нагрузок простейшего типа и отсутствием независимой регулировки ширины полос пропускания поддиапазонов квазидвухполосовых частотных характеристик. Накладываемые ограничения лишают возможности:

- согласования моделей сопротивлений, отличных от параллельной RC и последовательной RL нагрузок;
- формирования квазидвухполосовых частотных характеристик в радиотехнических трактах с произвольно заданными частотными поддиапазонами.

Для выполнения вышеперечисленных пунктов требуется разработка принципиально нового аналитического подхода к синтезу квазидвухполосовых СУ.

Постановка задач

Основные направления исследований для решения обозначенных задач были сконцентрированы на:

- установлении возможностей формирования квазидвухполосовых классических аппроксимирующих частотных характеристик произвольного порядка, обеспечивающих независимую регулировку полос пропускания поддиапазонов;
- разработке методики синтеза квазидвухполосовых СУ для более широкого класса нагрузок, имеющих практическое значение.

¹ Боде Г. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью. Москва: Иностран. литер.; 1948.

² Девятков Г.Н. Автоматизированный синтез широкополосных согласующих устройств: дис. ... д-ра техн. наук: 05.12.07. Новосибирск; 2006:424.

Разработка модифицированного частотного преобразования

Необходимость образования сложной аппроксимирующей функции в задаче синтеза квазидвухполосной согласующей цепи возможно устранить при помощи универсального частотного преобразования. Разработка последнего возможна путем модификации известных реактансных преобразований. Отсюда последовательность исследования заключалась в установлении ряда закономерностей.

1. Исключение нуля передачи из известного реактансного преобразования, представленного в [2], как показано ниже, позволяет формировать квазидвухполосовую частотную характеристику с равной шириной поддиапазонов:

$$\omega \rightarrow \frac{(\omega_1^2 - \omega^2) \cdot (\omega_2^2 - \omega^2)}{\omega \cdot B \cdot (\omega_\infty^2 - \omega^2)} \Rightarrow \omega \rightarrow \frac{(\omega_1^2 - \omega^2) \cdot (\omega_2^2 - \omega^2)}{\omega \cdot B} \quad (1)$$

2. Изменение степени частотной переменной ω в знаменателе выражения (1) позволяет формировать квазидвухполосовую частотную характеристику с определенным пропорциональным соотношением поддиапазонов.

3. Формирование частотной характеристики с произвольно заданной шириной поддиапазонов возможно, когда модифицированное частотное преобразование принимает следующий вид:

$$\left(\frac{(\omega_1^2 - \omega^2) \cdot (\omega_2^2 - \omega^2) \cdot (y + x \cdot \omega^\alpha)}{\omega^\beta \cdot B} \right), \quad (2)$$

где $\omega_1, \omega_2, y, x, B$ – коэффициенты, определяемые в результате решения системы нелинейных уравнений;

α, β – параметры, выбираемые в зависимости от соотношения поддиапазонов.

Рекомендации по выбору параметров α и β представлены ниже в таблице.

Таблица. Рекомендации по выбору степеней α, β в зависимости от соотношения ширины диапазонов

Table. Recommendations for choosing α, β degrees depending on the ratio of the width of the ranges

$B_1 = B_2$		$\alpha = 0, \beta = 1$
$B_1 > B_2$	$K_p(\omega) _{\omega=0} = 0$	$\alpha = 2 \cdot t; \beta = 1$
	$K_p(\omega) _{\omega=0} > 0$	$\alpha = 2 \cdot t; \beta = 0$
$B_1 < B_2$		$\alpha = 2; \beta = 2 \cdot t$

В таблице: $K_p(\omega)$ – требуемая по условию задачи функция передачи по мощности; B_1, B_2 – ширина 1-го и 2-го поддиапазона соответственно; $t = 1, 2, \dots$ – последовательно увеличиваемый коэффициент для решения системы уравнений (3).

Для того чтобы произвести нормировку заданной частотной характеристики относительно выбранных граничных частот, необходимо определить $\omega_1, \omega_2, y, x, B$ путем решения системы нелинейных уравнений, состоящей из 4-х выражений для каждой граничной частоты:

$$\left(\frac{(\omega_1^2 - \omega_{\text{гpi}}^2) \cdot (\omega_2^2 - \omega_{\text{гpi}}^2) \cdot (y + x \cdot \omega_{\text{гpi}}^\alpha)}{\omega_{\text{гpi}}^\beta \cdot B} \right)^2 = 1, \quad (3)$$

где $i = 1, 2, 3, 4$.

Полученное модифицированное частотное преобразования (2) с соответствующими параметрами, найденными при помощи системы уравнений (3), можно применять для всех

видов классических аппроксимирующих функций, используемых в задачах синтеза широкополосных частотно-избирательных и согласующих устройств.

Методика синтеза квазидвухполосовых согласующих устройств

Важным обстоятельством для синтеза СУ является выбор метода реализации. В качестве инструмента для исследований был выбран обобщенный метод Дарлингтона [4]. Данный аналитический метод развит и позволяет решать задачи широкополосного согласования для произвольных комплексных нагрузок с использованием как классических, так и модифицированных аппроксимирующих функций. Применение разработанного модифицированного частотного преобразования (2), в обобщенном методе Дарлингтона [4], позволило разработать методику синтеза квазидвухполосовых СУ. Ниже представлен алгоритм решения задач широкополосного согласования нагрузок, обусловленных квазидвухполосовой передаточной функцией в общем виде:

1. Анализ нагрузки с целью определения нулей передачи.
2. Аналитическая запись функции коэффициента отражения.
3. Выделение функции входного сопротивления.
4. Составление системы z -параметров.
5. Определение аналитических ограничений исходя из анализа нагрузки.
6. Выбор АФ с применением модифицированного частотного преобразования.
7. Решение системы уравнений определяющих вид частотной характеристики

совместно с полученными ограничениями и условиями устойчивости полинома знаменателя коэффициента отражения.

8. Определение функции входного сопротивления согласующей цепи.
9. Синтез согласующей цепи.

Предлагаемая методика отличается от известной использованием квазидвухполосовых частотных характеристик передачи мощности, сформированных на основе известных аппроксимирующих функций с применением модифицированного частотного преобразования.

Сравнение с известными результатами синтеза

Для демонстрации методики синтеза рассмотрим решение тестовой задачи, представленной в диссертационных исследованиях Девяткова². Нагрузка представляет собой отношение полинома четной степени к полиному нечетной:

$$Z_n(s) = \frac{R_n}{1 + sR_n C_n} = \frac{m_{1n} + n_{1n}}{m_{2n} + n_{2n}}, \quad (4)$$

где $R_n = 3,7$, $C_n = 0,44$, $m_{1n}(s)$, $m_{2n}(s)$, $n_{1n}(s)$, $n_{2n}(s)$ – четные и нечетные части полиномов функции сопротивления соответственно.

Полином $N_n(-s^2)$ дает информацию о нулях передачи:

$$N_n(-s^2) = m_{1n}(s)m_{2n}(s) - n_{1n}(s)n_{2n}(s) = R_n.$$

Для рассматриваемой нагрузки ограничение в соответствии с [4] имеет вид

$$B_M \geq 0, \quad (5)$$

где B_M – коэффициент полинома знаменателя z -параметра Z_{22} соответственно. Ограничение (5) определяет максимально возможный уровень передачи мощности.

Функцию коэффициента отражения на входе согласующей цепи для низкочастотного прототипа второго порядка представим в виде отношения полиномов:

$$\rho(-s) = \frac{s^8 + b_7 s^7 + b_6 s^6 + b_5 s^5 + b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{s^8 + a_7 s^7 + a_6 s^6 + a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}. \quad (6)$$

Функцию входного сопротивления представим в следующем виде:

$$Z_{\text{вх}}(s) = \frac{1 - \rho(-s)}{1 + \rho(-s)}. \quad (7)$$

Далее необходимо определить аналитические ограничения, исходя из условий физической реализуемости (5). Для этого достаточно произвести анализ z_{22} системы z -параметров [4], полученной из выражений (4) и (7). Обозначим полученные отношения полиномов z_{22} в символьном виде: $z_{22} = \frac{A_0 + A_1s + \dots + A_Ns^N}{B_0 + B_1s + \dots + B_Ms^M}$.

Выражению (5) соответствует

$$\frac{a_7 - b_7}{a_6 - b_6} - R_{\text{н}} C_{\text{н}} \geq 0. \quad (8)$$

В качестве функции передачи выберем функцию Чебышева второго порядка, которой для низкочастотного прототипа соответствует выражение $K_p(\omega^2) = K / \left[1 + \varepsilon^2 (2 \cdot \omega^2 - 1)^2 \right]$.

Далее требуется заменить переменную ω на модифицированное частотное преобразование (2), предварительно произведя нормировку по частоте при помощи решения систем нелинейных уравнений (3). В результате требуемая для синтеза функция передачи принимает следующий вид:

$$K_p(\omega^2) = K / \left[1 + \varepsilon^2 \left(2 \cdot \left(\frac{(0,69805^2 - \omega^2) \cdot (1,43443^2 - \omega^2)}{\omega^2 \cdot 0,2749635} \right)^2 - 1 \right)^2 \right].$$

Учитывая соотношение между коэффициентом отражения (6) и полученной функцией передачи мощности $K_p(-s^2) = 1 - \rho(s)\rho(-s)$, формируем систему уравнений для определения коэффициентов полиномов выражения (7). В результате решения системы уравнений совместно с ограничением (8) при условии устойчивости полинома знаменателя (6) находим функцию передачи, адаптированную к нагрузке. Решение получено при значениях параметров функции передачи $\varepsilon = 0,119$, $K = 0,998$ и коэффициентов полиномов выражения (6) $a_0 = 1,005$, $a_1 = 1,119$, $a_2 = 5,726$, $a_3 = 4,266$, $a_4 = 9,838$, $a_5 = 4,26$, $a_6 = 5,711$, $a_7 = 1,114$, $b_0 = 1,005$, $b_1 = 0,115$, $b_2 = 5,11$, $b_3 = 0,41$, $b_4 = 8,457$, $b_5 = 0,409$, $b_6 = 5,096$, $b_7 = 0,114$.

Исходя из полученных z -параметров, функция выходного сопротивления примет вид

$$Z_{\text{вых}}(s) = \frac{2,26091s^7 + 1,13067s^6 + 8,59337s^5 + 2,54114s^4 + 8,60457s^3 + 1,13362s^2 + 2,2697s}{1,594s^6 + 0,797s^5 + 5,314s^4 + 1,419s^3 + 4,391s^2 + 0,499s + 1}.$$

Полученное выходное сопротивление может быть реализовано как сопротивление лестничной схемы, нагруженное на активное сопротивление ($R_r = 1$) с нормированными значениями элементов: $k = 0,175$, $C_1 = 1,508$, $C_2 = 4,649$, $C_3 = 16,303$, $L_1 = 1,418$, $L_2 = 0,612$, $L_3 = 0,24$, $L_4 = 0,095$. Синтезированная схема широкополосного согласующего устройства (ШСУ) для сопротивления источника сигналов вместе с эквивалентом нагрузки представлена на рис. 2.

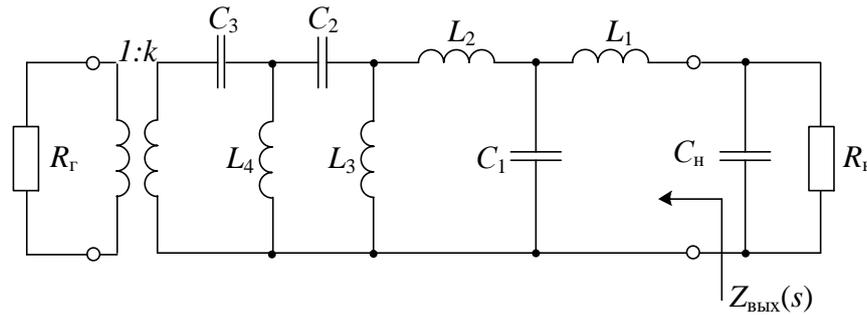


Рис. 2. Принципиальная схема согласующего устройства с нагрузкой
Fig. 2. Schematic of the matching device with load

На рис. 3 представлены частотные характеристики передачи мощности.

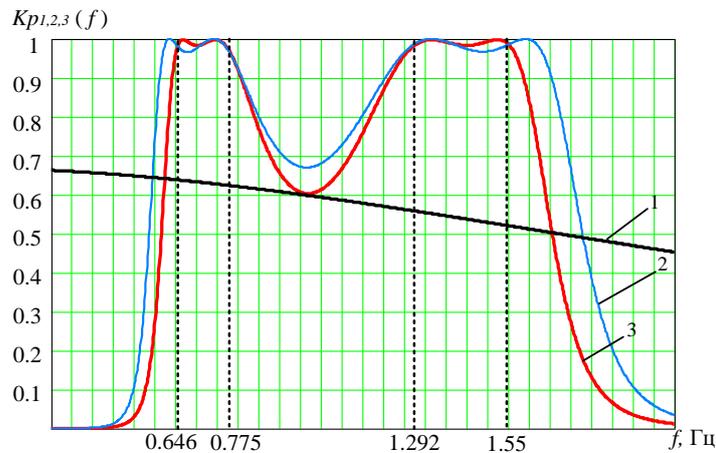


Рис. 3. Частотная характеристика передачи мощности:
1 – нагрузки; 2 – нагрузки с ШСУ, реализованным Девятковым;
3 – нагрузки с ШСУ, полученным при помощи разработанной методики
Fig. 3. Power Transmission Frequency Response:
1 – load; 2 – load with matching network implemented by Devyatkov;
3 – load with matching network obtained using the developed methodology

Полученная в результате синтеза квазидвухполосовая согласующая цепь при помощи разработанной методики формирует более избирательную частотную характеристику передачи мощности в сравнении с известным результатом, представленным Девятковым². Для определения численной оценки преимуществ разработанного математического аппарата произведено сравнение уровня внеполосного затухания передаваемой мощности в поддиапазонах $[0 - 0,646]$, $[0,775 - 1,292]$, $[1,55 - \infty]$ по интегральному критерию. В рассматриваемых частотных поддиапазонах интегральная ошибка должна стремиться к нулю. Ниже представлена величина интегральной ошибки для каждой функции передачи мощности в соответствующих частотных поддиапазонах.

$$\int_0^{0,646} |Kp_2(f)|df = 0,083, \int_0^{0,646} |Kp_3(f)|df = 0,05, \int_{0,775}^{1,292} |Kp_2(f)|df = 0,414, \int_{0,775}^{1,292} |Kp_3(f)|df = 0,393,$$

$$\int_{1,55}^{\infty} |Kp_2(f)|df = 0,22, \int_{1,55}^{\infty} |Kp_3(f)|df = 0,135.$$

В результате выигрыш во внеполосном затухании по интегральной ошибке, в сравнении с известным результатом Девяткова², составляет в процентном соотношении 39,876, 4,933, 38,735 % для каждого рассматриваемого частотного поддиапазона.

Заклучение

Представленная в статье модификация частотного преобразования позволяет производить формирование квазидвухполосовых частотных характеристик из известных аппроксимирующих функций произвольного порядка, используемых в задачах синтеза частотно-избирательных и согласующих цепей. Разработка методики синтеза квазидвухполосовых СУ на основе обобщенного метода Дарлингтона [4] является новым и важным результатом расширения потенциала аналитических подходов к решению сложных схемотехнических задач. Важным прикладным результатом методики является возможность независимой регулировки полос пропускания поддиапазонов.

Список литературы

1. Yildiz S., Aksen A., Kurvinen J., Lehtovuori A., Mai J., Wang C., Viikari V. Metal-covered Handset with LTE MIMO, Wi-Fi MIMO, and GPS Antennas. *Progress in Electromagnetics Research C*. 2018;80:89-101.
2. Чавка Г.Г. Многополосовое преобразование частоты. *Известия высших учебных заведений СССР. Радиоэлектроника*. 1968;12:1315-1318.
3. Маттей Г.Л. Таблицы для расчета трансформаторов сопротивлений в виде фильтра нижних частот Чебышева. *ТИИЭР*. 1964;52(8):1003-1028.
4. Филиппович Г. А. *Широкополосное согласование сопротивлений*. Минск: ВА РБ; 2004.

References

1. Yildiz S., Aksen A., Kurvinen J., Lehtovuori A., Mai J., Wang C., Viikari V. Metal-covered Handset with LTE MIMO, Wi-Fi MIMO, and GPS Antennas. *Progress in Electromagnetics Research C*. 2018;80:89-101.
2. Chavka G.G. [Multiband frequency conversion]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii SSSR. Radioelektronika = Radioelectronics and Communications Systems*. 1968;12:1315-1318. (In Russ.)
3. Mattei G.L. [Tables for for calculating the transformers-resistances as filter of the lower frequencies by Chebyshev]. *TIIEER*. 1964;52(8):1003-1028.
4. Filippovich, G. A. [Broadband impedance matching]. Minsk: VA RB; 2004. (In Russ.)

Вклад авторов

Янцевич М.А. определил способ формирования квазидвухполосовых частотных характеристик с регулируемыми частотными поддиапазонами, а также разработал методику синтеза квазидвухполосовых согласующих устройств на основе обобщенного метода Дарлингтона.

Филиппович Г.А. принимал участие в интерпретации полученных результатов.

Authors contribution

Yantsevich M.A. determined the method of forming quasi-two-band frequency characteristics with adjustable frequency subbands, and also developed the technique for synthesizing quasi-two-band frequency matching devices based on the generalized Darlington method.

Filippovich H.A. participated in the interpretation of their results.

Сведения об авторах

Янцевич М.А., адъюнкт кафедры автоматизи, радиолокации и приемо-передающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

Филиппович Г.А., к.т.н., доцент, профессор кафедры автоматизи, радиолокации и приемо-передающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

Information about the authors

Yantsevich M.A., post-graduate student of the Department of automation, radar and transmitting devices of Military Academy of the Republic of Belarus.

Filipovich G.A., PhD, associate Professor, Professor of the Department of automation, radar and transmitting and receiving devices of Military Academy of the Republic of Belarus.

Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Независимости, 220,
Военная академия Республики Беларусь
тел. +375-29-850-31-71;
e-mail: yantsevich1052500@mail.ru
Янцевич Михаил Александрович

Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosty ave., 220,
Military Academy of the Republic of Belarus
tel. +375-29-850-31-71;
e-mail: yantsevich1052500@mail.ru
Yantsevich Mikhail Aleksandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-80-88>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 615.473:620.174.21

МЕТОДИКА И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЯ, НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ ШТОК-ПОРШНЯ ШПРИЦА ОДНОКРАТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

КИСЕЛЁВ М.Г., ГАБЕЦ В.Л., МОНИЧ С.Г., ПЕТРОВ В.А.

Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 12 февраля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Целью статьи является описание методики и аппаратных средств определения усилия, необходимого для движения шток-поршня шприца однократного применения. Для получения новых экспериментальных данных используется метод измерения. Впервые получены осциллограммы изменения усилия, необходимого для движения шток-поршня испытуемых шприцев, и установлено, что по сравнению с двухкомпонентным, трехкомпонентный шприц характеризуется значительно меньшими значениями усилий, необходимых для шток-поршня. Так, при его движении без применения воды значение F в начале стадии всасывания в 1,5 раз меньше, чем у двухкомпонентного шприца, и в 2,4 раза меньше на стадии выдавливания. Использование воды приводит к увеличению усилия, необходимого для движения шток-поршня испытуемых шприцев. Так, для двухкомпонентного шприца усилие на стадии всасывания без применения воды составило 4,5 Н, на стадии выдавливания – 5,5 Н, а с применением воды значения этих усилий увеличились соответственно до 6,5 и 6 Н. Для трехкомпонентного шприца без применения воды усилие перемещения шток-поршня на стадии всасывания составило 2,9 Н и на стадии выдавливания – 2,3 Н, а с применением воды значения этих усилий выросли до 3,7 и 2,9 Н соответственно. Созданное устройство дает возможность провести комплексные исследования влияния вида шприца, его емкости, скорости перемещения шток-поршня, продолжительности остановки между стадиями всасывания и выдавливания жидкости и других параметров на величину сил, необходимых для перемещения шток-поршня шприца. Это позволит обосновать условия и нормируемое значение усилия (или усилий), необходимых для движения шток-поршня при проведении испытаний шприцев по данному показателю.

Ключевые слова: инъекционный шприц, шток-поршень, усилие движения, стадия выдавливания, стадия всасывания, устройство, методика проведения испытаний

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Киселёв М.Г., Габец В.Л., Монич С.Г., Петров В.А. Методика и аппаратные средства определения усилия, необходимого для движения шток-поршня шприца однократного применения. Доклады БГУИР. 2020; 18(2): 80-88.

METHODOLOGY AND HARDWARE FOR DETERMINING THE FORCE REQUIRED TO MOVE THE PLUNGER ROD OF A DISPOSABLE SYRINGE

MIKHAIL G. KISELEV, VYACHESLAV L. GABETS, SIARHEI G. MONICH,
VLADIMIR A. PETROV

Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 12 February 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The purpose of the article is to describe the methodology and hardware for determining the force required for the movement of the plunger rod of a single-use syringe. The measurement method is used to obtain new experimental data. We first-ever obtained the oscillograms of force variation required to move the plunger rod of test syringes and found that, compared to a two-component, three-component syringe is characterized by significantly smaller values of the effort required for the plunger rod to move. So, when it moves without using water, the F value at the beginning of the suction stage is 1.5 times less than that of a two-component syringe and 2.4 times less at the extrusion stage. The use of water increases the force required to move the rod-piston of the test syringes. Thus, for a two-component syringe the force at the suction stage without using water was 4.5 N and 5.5 N – at the extrusion stage, and with the use of water, the values of these forces, respectively, increased to 6.5 and 6 N. For a three-component syringe without water, the plunger rod displacement force at the suction stage was 2.9 N and at the extrusion stage – 2.3 N, and with water the values of these forces increased to 3.7 and 2.9 N, respectively. The device developed makes it possible to conduct comprehensive studies of the effect of the type of syringe, its capacity, the speed of movement of the plunger rod, the duration of the stop between liquid suction and extrusion stages and other parameters on the amount of forces required to move the plunger rod of the syringe. This will allow you to justify the conditions and the normalized value of the force (or forces) required for the movement of the plunger rod when testing syringes by this indicator.

Keywords: injection syringe, the plunger rod, the force of the movement, the stage of extrusion, the stage of the suction device, methods of testing.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Kiselev M.G., Gabets V.L., Monich S.G., Petrov V.A. Methodology and hardware for determining the force required to move the plunger rod of a disposable syringe. Doklady BGUIR. 2020; 18(2): 80-88.

Введение

В настоящее время наибольшее распространение получили одноразовые шприцы (ШОП – шприц одноразового применения). Различают два основных вида одноразовых шприцев: двухкомпонентные и трехкомпонентные. Первые состоят из цилиндра и поршня со штоком, выполненных в виде одной детали. В трехкомпонентных шприцах дополнительно используется уплотнитель, который расположен на конце поршня. Наличие этого элемента обеспечивает по сравнению с двухкомпонентным шприцем большую плавность перемещения шток-поршня при меньшем прикладывании к нему усилия [1–3].

Требования, предъявляемые к медицинским шприцам однократного применения, и методы их испытаний установлены стандартом по испытанию шприцев (ГОСТ ISO 7886-1-2011). Данный стандарт устанавливает требования к стерильным инъекционным шприцам однократного применения, изготовленным из полимерных материалов и предназначенным для использования сразу после заполнения. Стандарт не распространяется на инсулиновые шприцы, шприцы из стекла, шприцы со встроенными иглами и шприцы, предварительно заполненные инъекционным раствором [4, 5].

Одним из важных эксплуатационных показателей одноразовых шприцов является усилие, необходимое для движения шток-поршня [6]. В вышеуказанном стандарте приведена методика испытания шприцев по этому показателю. Для ее реализации необходимо

располагать соответствующими аппаратными средствами. В этой связи цель данной работы заключалась в создании устройства, позволяющего фиксировать и измерять усилие, необходимое для движения штока-поршня испытуемого шприца, в экспериментальном подтверждении работоспособности и возможности использования для проведения соответствующего испытания шприцев.

Методика проведения эксперимента

На рис. 1 представлена принципиальная схема устройства определения усилия, необходимого для движения штока-поршня одноразовых шприцев.

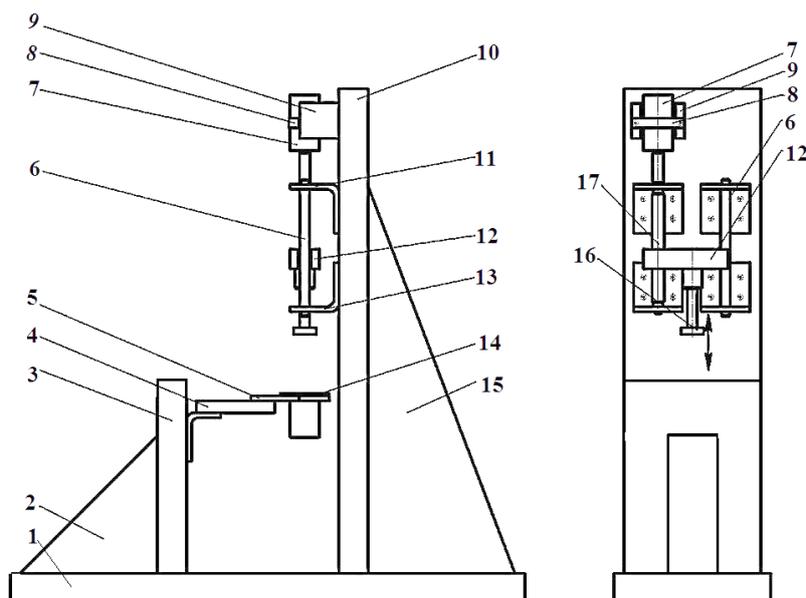


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторного устройства определения усилия, необходимого для движения штока-поршня одноразовых шприцев
Fig. 1. Schematic diagram of a laboratory device for determining the force required to move the plunger rod of disposable syringes

На массивном основании 1 устройства вертикально закреплены две плоских стойки 3 и 10. Для придания им большей жесткости они соединены с основанием с помощью плит 2 и 15, изготовленных в виде прямоугольных треугольников, выполняющих роль ребер жесткости. На стойке 10 смонтирован узел перемещения штока-поршня шприца. Он состоит из электродвигателя постоянного тока (МН-250Б) 7, закрепленного с помощью хомута 8 в призме 9, которая неподвижна прикреплена к стойке 10. Питание электродвигателя 7 осуществляется от источника питания постоянного тока, что позволяет бесступенчато регулировать частоту вращения его вала. Посредством муфты вал электродвигателя соединен с ходовым винтом 17, установленным в подшипниках скольжения 11, 13. С винтом связана подвижная каретка 12, в одной стороне которой предусмотрено соответствующее резьбовое отверстие, а в другой выполнен V-образный паз, контактирующий с цилиндрической направляющей 6, неподвижно закрепленной на стойке 10. К нижней поверхности каретки прикрепляется толкатель 16. Фотография общего вида узла перемещения штока-поршня шприца с указанием его основных элементов приведена на рис. 2.

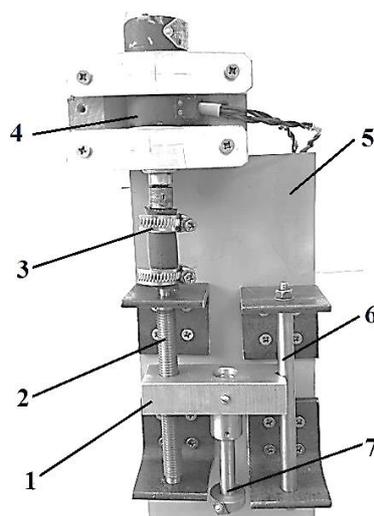


Рис. 2. Фотография общего вида узла перемещения штока-поршня шприца: 1 – подвижная каретка; 2 – ходовой винт; 3 – муфта; 4 – электродвигатель; 5 – плоская стойка; 6 – цилиндрическая направляющая; 7 – толкатель

Fig. 2. Photo of the General view of the plunger rod movement unit of the syringe: 1 – movable carriage; 2 – running screw; 3 – coupling; 4 – electric motor; 5 – flat rack; 6 – cylindrical guide; 7 – pusher

Узел закрепления испытуемого шприца и измерения усилия, действующего на шток-поршень в процессе его движения, смонтирован на стойке 3 (см. рис. 1). Испытуемый шприц устанавливается в отверстие сменной оправки 14 соответствующего диаметра до контакта упоров шприца с торцевой поверхностью оправки. Сменная оправка по скользящей посадке устанавливается в отверстие несущей планки 5. Сверху на поверхность упоров шприца устанавливается стопорное кольцо, которое с помощью прижимных зажимов фиксирует цилиндр шприца на несущей планке. Последняя консольно присоединена к тензOMETрическому датчику усилия 4, который с помощью стального уголка неподвижно прикреплен к стойке 3. На нижней части толкателя закреплены две планки, которые прижимаются к упору штока, обеспечивая тем самым его перемещение при движении толкателя вверх (на всасывание). Его движение вниз (на выпуск) обеспечивается силовым воздействием торцевой поверхности толкателя с поверхностью штока-поршня шприца. Фотография положения штока-поршня шприца, прикрепленного к толкателю, приведена на рис. 3.

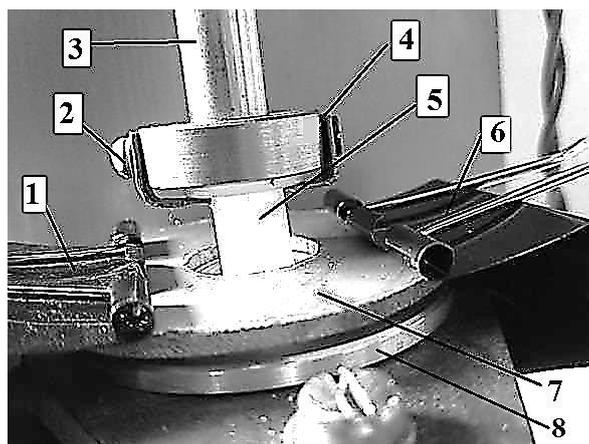


Рис. 3. Фотография положения штока-поршня шприца, прикрепленного к толкателю: 1 и 6 – пружинные зажимы; 2 и 4 – зажимные планки; 3 – толкатель; 5 – шток шприца; 7 – стопорное кольцо; 8 – сменная оправка

Fig. 3. Photo of the position of the syringe plunger rod attached to the pusher: 1 and 6 – spring clips; 2 and 4 – clamping bars; 3 – pusher; 5 – syringe rod; 7 – locking ring; 8 – replaceable mandrel

При включении электродвигателя вращение его вала с помощью передачи «винт-гайка» преобразуется в поступательное движение каретки, которое через толкатель сообщается

штоку-поршню. Направление его движения (вверх или вниз относительно цилиндра шприца) изменяется за счет реверсирования направления вращения вала электродвигателя. Возникающее между штоком-поршнем и поверхностью цилиндра усилие вызывает упругую деформацию тензометрического датчика, сигнал с которого поступает на усилитель и далее на цифровой запоминающий осциллограф ALEX2102CEX [10]. На его экране фиксируется изменение усилия F , необходимого для перемещения штока-поршня за время его движения относительно поверхности цилиндра шприца.

Тарировка измерительной системы осуществляется следующим образом. В отверстие несущей планки устанавливается стальной цилиндр с буртиком, в центре нижней торцевой поверхности которого закреплен конец тонкой стальной проволоки. На ее втором конце подвешиваются аттестованные грузы, с помощью которых устанавливается количественная зависимость между их массой и показанием осциллографа.

Результаты и их обсуждение

С целью подтверждения работоспособности созданного устройства и возможности его использования для проведения соответствующих испытаний была выполнена серия экспериментов по измерению усилия, необходимого для движения шток-поршня одноразовых инъекционных шприцев. Использовались шприцы двух видов: трехкомпонентные и двухкомпонентные одинаковой емкости, равной 3 мм. Скорость перемещения шток-поршня во всех направлениях была постоянной и составляла 95 мм/мин. Предварительно на кончик шприца устанавливалась инъекционная игла диаметром 0,6 мм. В одной серии экспериментов перемещение шток-поршня осуществлялась без использования жидкости (воды), а во второй – с ее применением, для чего конец иглы помещали в стакан с дистиллированной водой.

На рис. 4 приведены осциллограммы изменения усилия, необходимого для перемещения шток-поршня трехкомпонентного шприца.

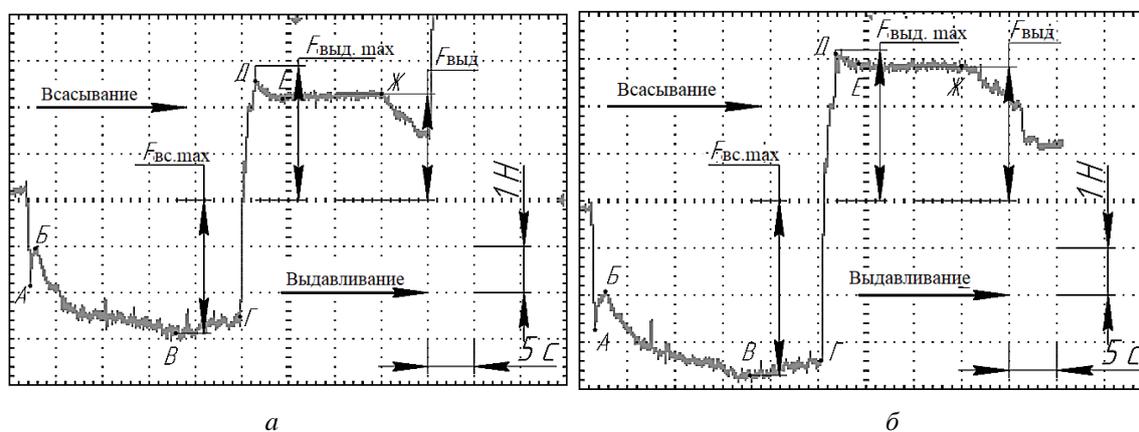


Рис. 4. Осциллограммы изменения усилия, необходимого для перемещения шток-поршня испытуемого трехкомпонентного шприца: *а* – без применения воды; *б* – с применением воды

Fig. 4. Oscillograms of changes in the force required to move the plunger rod of the three-component syringe under test: *a* – without water; *b* – with water

С момента начала движения шток-поршня из крайнего нижнего положения вверх (режим всасывания) без применения воды (рис. 4, *а*) усилие F резко возрастает от нуля до точки А, после чего также резко снижается до точки Б, т. е. имеет место скачкообразное изменение F на этой начальной стадии движения шток-поршня. Это объясняется переходом контактирующих поверхностей уплотнения шток-поршня и цилиндра шприца от трения покоя к трению движения, что, как известно [7–8], сопровождается пиковым (скачкообразным) изменением действующих между ними сил трения. По мере дальнейшего перемещения шток-поршня вначале происходит интенсивное, а затем более замедленное возрастание F , которое в точке В достигает своего наибольшего значения $F_{вс.мах}$. На окончательной стадии режима всасывания усилие F на участке ВГ несколько снижается. При движении шток-поршня вниз (режим выдавливания), которое происходит сразу после окончания его движения вверх,

т. е. без временной паузы, усилие F изменяет знак и скачкообразно возрастает до точки Д, которой соответствует значение $F_{\text{выд.мах}}$. После этого величина F на участке ДЕ снижается и далее принимает постоянное значение $F_{\text{выд}}$, которое сохраняется до точки Ж. При наступлении завершающей стадии движения шток-поршня на выдавливание усилие F резко падает. Если пренебречь, в силу его малости, действием воздуха при его всасывании и выдавливании из емкости шприца, то данная осциллограмма $F(t)$, в принципе, отражает характер изменения сил трения скольжения, возникающих между поверхностями уплотнителя шток-поршня и цилиндра шприца.

При использовании воды (рис. 4, б) зависимость $F(t)$ имеет практически такой же характер, как и в предыдущем случае. Отличие состоит только в том, что в данном случае усилие, необходимое для перемещения шток-поршня, имеет большие значения, что объясняется увеличением сил сопротивления, действующих на него при всасывании воды в цилиндр шприца и ее последующем выдавливании из него [9].

На рис. 5 представлены осциллограммы изменения усилия, необходимого для перемещения шток-поршня двухкомпонентного шприца.

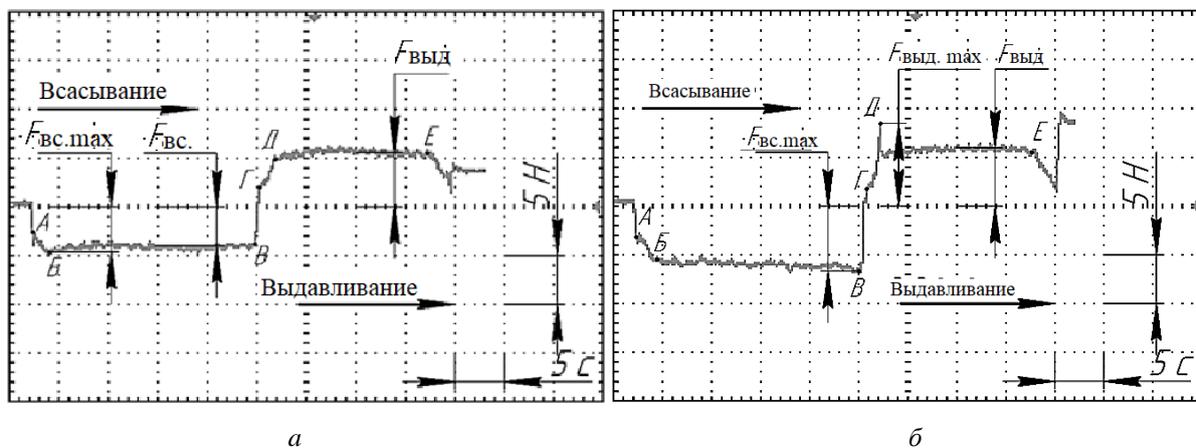


Рис. 5. Осциллограммы изменения усилия, необходимого для перемещения шток-поршня двухкомпонентного шприца: *а* – без применения воды; *б* – с применением воды
Fig. 5. Oscillograms of force variations required to move the plunger rod of a two-component syringe: *a* – without water; *b* – with water

Как видно, эти осциллограммы изменения $F(t)$ существенно отличаются от характера изменения усилия, необходимого для движения шток-поршня трехкомпонентного шприца. В данном случае при начале движения шток-поршня в режиме всасывания без применения воды (рис. 5, *а*) усилие F резко возрастает от нуля до точки А и затем более плавно увеличивается до точки Б, соответствующей $F_{\text{вс.мах}}$, после чего принимает практически постоянное значение $F_{\text{вс}}$, которое сохраняется до завершения стадии всасывания, т. е. до точки В. В начале стадии выдавливания усилие, необходимое для движения шток-поршня, изменяет знак и увеличивается от точки Г до точки Д и затем принимает постоянное значение $F_{\text{выд}}$ вплоть до точки Е, соответствующей завершению данной стадии движения шток-поршня. Как и в предыдущем случае, данная зависимость $F(t)$ без учета действия воздуха отражает изменение сил трения скольжения, возникающих между поверхностями шток-поршня и цилиндра шприца.

При движении штока-поршня с использованием воды характер зависимости $F(t)$ остается практически таким же, как и в предыдущем случае, за исключением следующих моментов. На стадии всасывания усилие F имеет большое значение, при этом на участке БВ оно не остается постоянным, а несколько увеличивается, достигая максимальной величины $F_{\text{вс.мах}}$ к моменту окончания этой стадии. В начале стадии выдавливания имеет место скачкообразное изменение усилия F на участке ГД, что обусловлено действием сил сопротивления жидкости в начале движения шток-поршня. После этого усилие F , как и в предыдущем случае, остается постоянным на всем участке ДЕ вплоть до окончания этой стадии.

В результате расшифровки осциллограмм получены численные значения усилий, необходимых для движения шток-поршня двух- и трехкомпонентных шприцев, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения усилий, необходимых для движения шток-поршня двух- и трехкомпонентных шприцев емкостью 3 мл

Table 1. Values of the forces required to move the plunger rod of two-and three-component syringes with 3-ml capacity

Вид испытуемого шприца	Значения усилий, необходимых для движения штока-поршня испытуемого шприца							
	без применения воды				с применением воды			
	$F_{\text{тахвс}}, \text{Н}$	$F_{\text{вс}}, \text{Н}$	$F_{\text{тахвыд}}, \text{Н}$	$F_{\text{выд}}, \text{Н}$	$F_{\text{тахвс}}, \text{Н}$	$F_{\text{вс}}, \text{Н}$	$F_{\text{тахвыд}}, \text{Н}$	$F_{\text{выд}}, \text{Н}$
Двухкомпонентный	4,5	4	2,5	5,5	6,5	–	8,5	6
Трехкомпонентный	2,9	–	2,9	2,3	3,7	–	3,2	2,9

Анализ представленных данных позволяет выделить следующие основные положения. По сравнению с двухкомпонентным, трехкомпонентный шприц характеризуется значительно меньшими значениями усилий, необходимых для движения шток-поршня. Так, при его движении без применения воды значение F в начале стадии всасывания в 1,5 раза меньше, чем у двухкомпонентного шприца, и в 2,4 раза меньше на стадии выдавливания. Объясняется это тем, что благодаря применению в трехкомпонентном шприце уплотнения, расположенного на конце штока, силы трения скольжения, действующие между его поверхностью и поверхностью цилиндра, имеют существенно меньшее значение, чем у двухкомпонентного шприца, когда происходит скольжение непосредственно поверхностей штока и цилиндра шприца.

Использование воды приводит к увеличению усилия, необходимого для движения шток-поршня испытуемых шприцев. Так, для двухкомпонентного шприца усилие на стадии всасывания без применения воды составило 4,5 Н и на стадии выдавливания – 5,5 Н, а с применением воды значение этих усилий увеличились соответственно до 6,5 и 6 Н. Для трехкомпонентного шприца без применения воды усилие перемещения шток-поршня на стадии всасывания составило 2,9 Н, на стадии выдавливания – 2,3 Н, а с применением воды значения этих усилий выросли соответственно до 3,7 и 2,9 Н.

Таким образом, результатами проведенных экспериментов подтверждено, что созданное устройство позволяет фиксировать во времени характер изменения усилия и его величину, необходимую для движения шток-поршня шприца на стадиях всасывания жидкости и ее последующем выдавливании из цилиндра шприца. Это, в свою очередь, дает возможность в дальнейшем провести комплексные исследования по оценке влияния вида шприца, его емкости, скорости перемещения шток-поршня, продолжительности остановки между стадиями всасывания и выдавливания жидкости и других параметров на величину сил, необходимых для перемещения шток-поршня шприца. В перспективе на основе анализа полученных данных предполагается обосновать условия и нормируемые значения усилия (или усилий), необходимого для движения шток-поршня, при проведении испытаний шприцев по данному показателю.

Заключение

Создано устройство, позволяющее регистрировать и измерять усилие, необходимое для перемещения шток-поршня медицинских шприцев при его движении на всасывание жидкости и ее последующее выдавливание.

С использованием данного устройства проведены экспериментальные исследования по определению усилия, необходимого для движения шток-поршня двух- и трехкомпонентного медицинских шприцев однократного применения емкостью 3 мл без использования жидкости (воды) и с ее применением при постоянной скорости перемещения шток-поршня, равной 95 мм/мин.

На основании расшифровки и анализа полученных осциллограмм изменения усилия, необходимого для движения шток-поршня испытуемых шприцев, установлено,

что по сравнению с двухкомпонентным трехкомпонентный шприц характеризуется значительно меньшими значениями усилий, необходимых для шток-поршня. Так, при его движении без применения воды значение F в начале стадии всасывания в 1,5 раз меньше, чем у двухкомпонентного шприца, и в 2,4 раза меньше на стадии выдавливания.

Использование воды приводит к увеличению усилия, необходимого для движения шток-поршня испытуемых шприцев. Так, для двухкомпонентного шприца усилие на стадии всасывания без применения воды составило 4,5 Н, на стадии выдавливания – 5,5 Н, а с применением воды значение этих усилий увеличились соответственно до 6,5 и 6 Н. Для трехкомпонентного шприца без применения воды усилие перемещения шток-поршня на стадии всасывания составило 2,9 Н, на стадии выдавливания – 2,3 Н, а с применением воды значения этих усилий выросли до 3,7 и 2,9 Н соответственно.

Созданное устройство дает возможность провести комплексные исследования влияния вида шприца, его емкости, скорости перемещения шток-поршня, продолжительности остановки между стадиями всасывания и выдавливания жидкости и других параметров на величину сил, необходимых для перемещения шток-поршня шприца. Это позволит обосновать условия и нормируемое значение усилия (или усилий), необходимых для движения шток-поршня при проведении испытаний шприцев по данному показателю.

Список литературы

1. Рабинович С.А., Анисимова Е.Н., Московец О.Н., Бабиков А.С. От птичьего пера до компьютерного шприца. *Клиническая стоматология*. 2001;3:42-45.
2. Сабитов В. Х. *Медицинские инструменты*. Москва: Медицина; 1985.
3. Кабатов Ю.Ф. *Медицинский инструментарий, аппаратура и оборудование*. Москва: Медицина; 1977.
4. Коваленко А.Е. Усовершенствованные зубохирургические инструменты. *Мед. техника*. 1975;5:59-61.
5. Крендаль П.Е. *Медицинское товароведение*. Москва: Медицина; 1974.
6. Рабинович С.А. *Эволюция медицинского шприца: от волюнки до цифровых технологий*. Москва: Поли Медиа Пресс; 2013.
7. Siniawski M.T., Felts J., Kurilich D., Lopez & A., Malik A. Method for testing sliding frictional response of lubricious thin films used in plastic medical syringes, *Tribology – Materials. Surfaces & Interfaces*. 2015;9(3):113-117. DOI: 10.1179/1751584X15Y.0000000011.
8. Batista E., Sousa J.A., Cardoso S., Silvério V. Experimental testing for metrological traceability and accuracy of liquid microflows and microfluidics. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2020;71:101691. ISSN 0955-5986.
9. Holzwarth U., Cossío U., Llop J., Kreyling W.G. Unpredictable nanoparticle retention in commonly used plastic syringes introduces dosage uncertainties that may compromise the accuracy of nanomedicine and nanotoxicology studies. *Front Pharmacol*. 2019;10:1293. DOI: 10.3389/fphar.2019.01293.
10. Киселёв М.Г. Методика и аппаратные средства проверки остроты медицинских скальпелей. *Доклады БГУИР*. 2019;5(123).

References

1. Rabinovich, S.A., Anisimova E.N., Moskovets O.N., Babikov A.S. [From a bird's feather to a computer syringe]. *Klinicheskaya stomatologiya = Clinical dentistry*. 2001;3:42-45. (In Russ.)
2. Sabitov, V.X. [Medical instruments]. Moscow: Medicine; 1985. (In Russ.)
3. Kabatov, Yu.F. [Medical instruments, equipment and equipment]. Moscow: Medicine; 1977. (In Russ.)
4. Kovalenko A.E. [Improved dental instruments]. *Med. tehnica = Med. technica*. 1975;5:59-61. (In Russ.)
5. Crandall P.E. [Medical commodity]. Moscow: Medicine; 1974. (In Russ.)
6. Rabinovich S.A. [Evolution of the medical syringe: from bagpipes to digital technologies]. Moscow: Poly Media Press.; 2013. (In Russ.)
7. Siniawski M.T., Felts J., Kurilich D., Lopez & A., Malik A. Method for testing sliding frictional response of lubricious thin films used in plastic medical syringes, *Tribology – Materials. Surfaces & Interfaces*. 2015;9(3):113-117. DOI: 10.1179/1751584X15Y.0000000011.
8. Batista E., Sousa J.A., Cardoso S., Silvério V. Experimental testing for metrological traceability and accuracy of liquid microflows and microfluidics. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2020;71:101691. ISSN 0955-5986.

9. Holzwarth U., Cossío U., Llop J., Kreyling W.G. Unpredictable nanoparticle retention in commonly used plastic syringes introduces dosage uncertainties that may compromise the accuracy of nanomedicine and nanotoxicology studies. *Front Pharmacol.* 2019;10:1293. DOI: 10.3389/fphar.2019.01293.
10. Kiselev M.G. [Methods and hardware for checking the sharpness of medical scalpels]. *Doklady BGUIR=Doklady BSUIR.* 2019;5(123). (In Russ.)

Вклад авторов

Киселев М.Г. выполнил литературный обзор по теме статьи и анализ экспериментальных данных.

Габец В.Л. принял участие в оформлении иллюстративных материалов.

Монич С.Г. принял участие в создании устройства для испытаний и описании методики.

Петров В.А. принял участие в проведении экспериментальных исследований.

Authors contribution

Kiselev M.G. performed a literary review on the topic of the article and analysis of experimental data.

Gabets V.L. participated in the design of illustrative materials.

Monich S.G. participated in the creation of a device for testing and description of the method.

Petrov V.A. participated in conducting experimental studies.

Сведения об авторах

Киселев М.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство приборов» Белорусского национального технического университета.

Габец В.Л., к.т.н., доцент, доцент кафедры «Конструирование производство приборов» приборостроительного факультета Белорусского национального технического университета.

Монич С.Г., к.т.н., старший преподаватель кафедры «Конструирование и производство приборов» Белорусского национального технического университета.

Петров В.А., студент приборостроительного факультета Белорусского национального технического университета.

Information about the authors

Kiselev M.G., D.Sci., Professor, Head of Design and Production of Instruments Department of the Belarusian National Technical University.

Gabets V.L., PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department “Design and Production of Instruments” of the Faculty of Instrument Engineering of the Belarusian National Technical University.

Monich S.G., PhD, Senior Lecturer of Design and Production of Instruments Department of the Belarusian National Technical University.

Petrov V.A., student of the instrument-making faculty of the Faculty of Instrument Engineering of the Belarusian National Technical University.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, пр-т Независимости, д. 65,
Белорусский национальный
технический университет
тел./факс: +375-17-292-40-81;
e-mail: kiselev.maikl@gmail.com
Киселев Михаил Григорьевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosty ave., 65,
Belarusian National Technical University
tel./fax: +375-17-292-40-81;
e-mail: kiselev.maikl@gmail.com
Kiselev Mikhail Grigorievich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-89-95>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 629.325 + 519.5

ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ МЕТОД НЕЧЕТКОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ В ЗАДАЧЕ ОБЪЕДИНЕНИЯ ОЦЕНОК ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

ХИЖНЯК А.В.

Военная академия Республики Беларусь (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 12 марта 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В статье рассмотрено применение оптимизационного метода нечеткой автоматической классификации в задаче объединения оценок траекторных измерений в радиолокационной системе. Под радиолокационной системой будем понимать единый автоматизированный иерархический технический комплекс, объединяющий с помощью средств связи совокупность асинхронно функционирующих средств радиолокации, а также центрального и промежуточных пунктов, осуществляющих сбор, обработку и выдачу траекторной радиолокационной информации. Следует отметить, что в условиях сопровождения плотных групп воздушных объектов с относительно небольшими интервалами, дистанциями или превышениями, не всегда удается получить траекторную информацию требуемого качества. Основной причиной этого является сложность определения значений корреляционных матриц ошибок оценок параметров вектора состояния воздушных объектов. При этом задача усложняется по мере увеличения числа промежуточных пунктов обработки при ее доведении до конечного потребителя. Целью настоящей статьи является повышение точности оценок траекторных измерений в радиолокационной системе. Для исследования используется математический аппарат теории нечетких множеств, в частности, оптимизационный метод нечеткой автоматической классификации. Показано, что в условиях априорной неопределенности параметров закона распределения ошибок траекторных измерений применение результатов нечеткой автоматической классификации при определении весовых коэффициентов позволяет повысить точность оценок в указанных условиях до 30 % по сравнению с методами, основанными на применении вероятностного подхода. Полученные результаты позволяют обосновать перспективность применения оптимизационных методов нечеткой автоматической классификации в задачах обработки траекторной информации. Кроме того, достоинством предложенного метода является его низкая вычислительная сложность и простота реализации, что особенно важно при одновременном сопровождении большого количества воздушных объектов.

Ключевые слова: радиолокационная информация, корреляционная матрица ошибок, вектор состояния траектории, теория нечетких множеств.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Хижняк А.В. Оптимизационный метод нечеткой автоматической классификации в задаче объединения оценок траекторных измерений в радиолокационной системе. Доклады БГУИР. 2020; 18(2): 89-95.

THE OPTIMIZATION METHOD OF FUZZY AUTOMATIC CLASSIFICATION IN THE PROBLEM OF COMBINING THE ASSESSMENTS OF TRAJECTOR MEASUREMENTS IN THE RADAR SYSTEM

ALEXANDER V. KHIZHNIAK

Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 12 March 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The paper describes the application of the optimization method of fuzzy automatic classification in the problem of combining estimates of trajectory measurements in a radar system. By a radiolocation system the author mean an automated hierarchical technical complex that combines, using communication tools, a set of asynchronously functioning radiolocation tools, as well as central and intermediate points that collect, process and issue trajectory radiolocation information. It must be borne in mind that in conditions of tracking tight groups of air targets, with relatively small intervals and distances, it is not always possible to obtain trajectory information of the required quality. The main reason for this is the difficulty in determining the values of the correlation matrices of errors in estimating the parameters of the state vector of air targets. The task becomes more complicated as the number of intermediate processing points increases when it is brought to the final consumer. The main goal of the article is to increase the accuracy of estimates of trajectory measurements in a radiolocation system. The research is done by means of the mathematical tool of fuzz-set theory, namely, by optimizing fuzzy automatic classification. The article demonstrates that using fuzzy automatic classification under a priori parametrical uncertainty in the law of trajectory measurement errors, when determining weight coefficients, can improve the accuracy of estimates in these conditions up to 30 % compared with methods based on the application of the probabilistic approach. The results obtained allow us to justify the prospects of using optimization methods of fuzzy automatic classification in the tasks of processing trajectory information. In addition, the advantage of the proposed method is its low computational complexity and ease of implementation, which is especially important while maintaining a large number of airborne objects.

Keywords: radar information, correlation matrix of errors, trajectory state vector, theory of fuzzy sets.

Conflict of interests. The author claims no conflict of interest.

For citation. Khizhniak A.V. The optimization method of fuzzy automatic classification in the problem of combining estimates of trajectory measurements in a radar system. Doklady BGUIR. 2020; 18(2): 89-95.

Введение

Среди основных направлений повышения качества решения задачи объединения оценок траекторных измерений в радиолокационной системе можно выделить два подхода [1]. Первый направлен на повышение качества траекторной радиолокационной информации (РЛИ) путем восстановления статистики траекторных параметров и последующего применения классических статистических алгоритмов [2]. Однако данный подход хорош, когда это восстановление, во-первых, возможно, а, во-вторых, радиолокационная система включает максимум 1÷2 промежуточных пункта обработки. Если таких пунктов больше, то восстановление исходной статистики становится крайне затруднительным. На практике количество промежуточных пунктов может доходить до 5÷6 и более, что делает указанный подход неприемлемым. Вторым направлением повышения качества решения задачи третичной обработки является разработка новых методов и алгоритмов, обеспечивающих их качественное функционирование в условиях низкой достоверности исходных данных.

Математическую постановку задачи третичной обработки можно отнести к классу задач классификации объектов с многомерными векторами параметров. Анализ работ в этой области показал, что в настоящее время одним из перспективных направлений является

применение математического аппарата теории нечетких множеств [3]. Теоретические и практические разработки при решении информационных задач и задач управления, использующие нечеткие алгоритмы, широко известны и в рекламе не нуждаются. Безусловно, они имеют как свои достоинства, так и недостатки. Однако в теории цифровой обработки РЛИ они не нашли широкого распространения.

Поэтому в настоящей статье автор хотел бы продемонстрировать как возможность применения, так и достоинства использования методов нечеткой математики при решении задач объединения траекторной РЛИ в условиях отсутствия достоверной информации о статистических свойствах ошибок траекторных измерений.

Основная часть

Сформулируем постановку задачи.

Имеется набор векторов состояния траекторий воздушных объектов, полученных от источников траекторной информации. В состав вектора состояния входят: прямоугольные координаты положения воздушных объектов (x, y, z) ; параметры изменения координат положения воздушного объекта V_x и V_y ; признаки и характеристики траекторий; время получения траекторных данных о воздушных объектах от источников информации; номера траекторий в системе нумерации источников траекторной РЛИ. Параметры положения воздушных объектов и скорости их изменения приведены в единую систему координат и к единому началу отсчета во времени. Законы распределения ошибок оценки координат и параметров траекторий считаются неизвестными. Систематические ошибки определения координат воздушных объектов считаются скомпенсированными. Обнаружение, завязка и отождествление траекторий считаются выполненными. Признаком пространства при объединении траекторных измерений образуются пространственными координатами воздушных объектов и составляющими скорости их изменения.

Искомая задача состоит в разработке способа объединения оценок траекторных измерений координат и параметров воздушных объектов на основе процедуры нечеткой автоматической классификации (НАК) при неизвестных значениях ошибок оценки траекторных измерений. Критерием качества реализации алгоритма объединения траекторных измерений является соответствие полученного на его выходе результата реальной воздушной обстановке.

Среди известных методов НАК наиболее широкое распространение получили методы на основе оптимизационного подхода, в рамках которого предполагается минимизация среднеквадратического отклонения параметров векторов состояния отождествляемых траекторий от центра масс выделенного кластера [4]. В качестве кластера выступает набор траекторий, имеющих «близкие» (в статистическом смысле) параметры векторов состояния. При этом в качестве меры близости используется значение степени принадлежности μ_{li} i -й отождествляемой траектории l -му кластеру.

Применение вычислительных процедур НАК при решении задачи объединения траекторных измерений предполагает: во-первых, выделение кластеров, характеризующихся наличием в них центров, представляющих собой значение взвешенной дисперсии параметров векторов состояний отождествляемых траекторий относительно центров кластеров, в заданной метрике пространства; во-вторых, вычисление элементов весовой матрицы отождествления в виде значений степеней принадлежности отождествляемых траекторий каждому из выделенных кластеров (его центров). Суть метода состоит в последовательной НАК векторов состояния траекторий по каждому траекторному измерению. Результатом такой процедуры является совокупность наборов матриц степеней принадлежности векторов состояния траекторий по координатам и составляющим вектора скорости. Значения элементов полученных матриц степеней принадлежности используются для получения весовых коэффициентов при объединении траекторных измерений.

Наиболее распространенный и изученный вариант экстремальной постановки задачи классификации в терминах нечетких множеств является вариант, используемый в качестве функционала качества классификации, – функционал Дж. Беждека – Дж. Данна, имеющий вид [4]

$$Q(P) = \sum_{l=1}^c \sum_{i=1}^n \mu_{li}^\gamma d(\theta_i, \tau^l), \quad (1)$$

где θ_i – вектор состояния i -го объекта;

μ_{li} – значение степени принадлежности классифицируемого объекта $i=1, \dots, n$ нечеткому кластеру с центром τ^l $l=1, \dots, c$;

$d(\theta_i, \tau^l)$ – расстояние между i -м классифицируемым объектом и l -м нечетким кластером;

γ – показатель нечеткости классификации ($\gamma = 2$) [4].

Результатом оптимизации функционала (1) является матрица $|\mu^*| = |\mu(\theta_i, \tau^l)|$, $i=1, \dots, n$, $l=1, \dots, c$, элементами которой являются значения степеней принадлежности классифицируемых объектов с векторами состояний θ_i нечетким кластерам с центрами τ^l . Оптимизацию будем проводить с использованием известного метода c -средних (fuzzy c -means) [4].

В большинстве описанных в литературе вариантов реализации метода c -средних в качестве функции расстояния $d(\theta_i, \tau^l)$ принято использовать квадрат евклидовой нормы в m -мерном пространстве признаков:

$$d(\theta_i, \tau^l) = |\theta_i - \tau^l|^2. \quad (2)$$

Для рассматриваемого в статье случая при $m = 5$ (x, y, z, V_x, V_y) расстояние (2) примет вид

$$d(\theta_i, \tau^l) = \left[|x_i - \tau_x^l|^2 + |y_i - \tau_y^l|^2 + |z_i - \tau_z^l|^2 + |V_{x_i} - \tau_{V_x}^l|^2 + |V_{y_i} - \tau_{V_y}^l|^2 \right]. \quad (3)$$

С учетом (3) вид функционала качества классификации (1) примет вид

$$Q(P) = \sum_{l=1}^c \sum_{i=1}^n \mu_{li}^2 \left[|x_i - \tau_x^l|^2 + |y_i - \tau_y^l|^2 + |z_i - \tau_z^l|^2 + |V_{x_i} - \tau_{V_x}^l|^2 + |V_{y_i} - \tau_{V_y}^l|^2 \right]. \quad (4)$$

Применив метод c -средних для минимизации (4), получим матрицу степеней принадлежности $|\mu_{li}^{\theta_i}|$ i -х классифицируемых объектов к l -м кластерам по совокупности всех пяти параметров векторов состояния θ_i . Применение матрицы $|\mu_{li}^{\theta_i}|$ целесообразно для решения задачи классификации в общем по совокупности всех признаков, но затруднительно для определения весовых коэффициентов при решении задачи объединения параметров траекторий, когда целесообразно учитывать каждый параметр отдельно. Поэтому для получения исходных данных весовых коэффициентов будем реализовывать выполнение НАК последовательно по каждому параметру вектора состояния θ_i с фиксацией полученных результатов. При этом для одного и того же набора векторов состояния θ_i поочередно выполняется оптимизация следующих функционалов:

$$Q_x(P) = \sum_{l=1}^c \sum_{i=1}^n (\mu_{li}^x)^2 |x_i - \tau_x^l|^2, \quad (5)$$

$$Q_y(P) = \sum_{l=1}^c \sum_{i=1}^n (\mu_{li}^y)^2 |y_i - \tau_y^l|^2, \quad (6)$$

$$Q_z(P) = \sum_{l=1}^c \sum_{i=1}^n (\mu_{li}^z)^2 |z_i - \tau_z^l|^2, \quad (7)$$

$$Q_{V_x}(P) = \sum_{l=1}^c \sum_{i=1}^n (\mu_{li}^{V_x})^2 |V_{x_i} - \tau_{V_x}^l|^2, \quad (8)$$

$$Q_{V_y}(P) = \sum_{l=1}^c \sum_{i=1}^n (\mu_{li}^{V_y})^2 |V_{y_i} - \tau_{V_y}^l|^2, \quad (9)$$

где $\mu_{li}^x, \mu_{li}^y, \mu_{li}^z, \mu_{li}^{V_x}, \mu_{li}^{V_y}$ – значения степеней принадлежности по параметрам вектора состояния x, y, z, V_x, V_y .

Полученные в результате оптимизации функционалов (5) – (9) наборы матриц степеней принадлежности позволяют перейти к определению весовых коэффициентов. Рассмотрим иллюстрационный пример при объединении 9 измерений ($R_1 - R_9$) по 3 классам ($\tau_x^1 - \tau_x^3$) для одной прямоугольной координаты «x» векторов θ_i . После выполнения алгоритма НАК получаем матрицу степеней принадлежности $|\mu_{li}^x|$, вид которой представлен в табл. 1.

Таблица 1. Форма представления матрицы степеней принадлежности по координате «x»
Table 1. The form of representation of the matrix of degrees of membership in the coordinate "x"

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9
τ_x^1	μ_{11}^x	μ_{12}^x	μ_{13}^x	μ_{14}^x	μ_{15}^x	μ_{16}^x	μ_{17}^x	μ_{18}^x	μ_{19}^x
τ_x^2	μ_{21}^x	μ_{22}^x	μ_{23}^x	μ_{24}^x	μ_{25}^x	μ_{26}^x	μ_{27}^x	μ_{28}^x	μ_{29}^x
τ_x^3	μ_{31}^x	μ_{32}^x	μ_{33}^x	μ_{34}^x	μ_{35}^x	μ_{36}^x	μ_{37}^x	μ_{38}^x	μ_{39}^x

Таким образом, значения степеней принадлежности μ_{li}^x определяют вес каждого из значений вектора состояний классифицируемых объектов при отнесении их к соответствующему классу по координате «x». Обобщенная оценка по этой координате вычисляется в соответствии с выражением

$$\hat{x}_l = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu_{li}^x}{n}, \quad (10)$$

где n – количество классифицируемых воздушных объектов.

Вычисление остальных обобщенных параметров вектора состояния траекторий осуществляется аналогично (10):

$$\hat{y}_l = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \mu_{li}^y}{n}, \quad (11)$$

$$\hat{z}_l = \frac{\sum_{i=1}^n z_i \mu_{li}^z}{n}, \quad (12)$$

$$\hat{V}_{x_i} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{x_i} \mu_{li}^{V_x}}{n}, \quad (13)$$

$$\hat{V}_{y_i} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{y_i} \mu_{li}^{V_y}}{n}. \quad (14)$$

В ходе моделирования проводилось сравнение результатов объединения траекторных измерений, полученных методом весового осреднения [5] (используются значения дисперсий ошибок оценок параметров векторов состояния), с предложенным методом. На рис. 1 показана зависимость ошибок определения пространственного положения воздушных объектов от их условий полета и метода осреднения. Рассмотрены три варианта условий полета: в построениях «ромб», «пеленг», «клин». Заштрихованные диаграммы соответствуют ошибкам оценок положения, вычисленным методом весового осреднения. Сплошной заливкой показаны диаграммы, полученные методом с использованием НАК.

Для представленного иллюстрационного примера проведена оценка сходимости алгоритма, реализующего вышеописанный способ. Останов алгоритма соответствует выполнению условия

$$\sum_{l=1}^3 \sum_{i=1}^9 (\mu_{li}^{k-1} - \mu_{li}^k) \leq \varepsilon, \quad (15)$$

где ε – значение критерия останова; k – номер итерации.

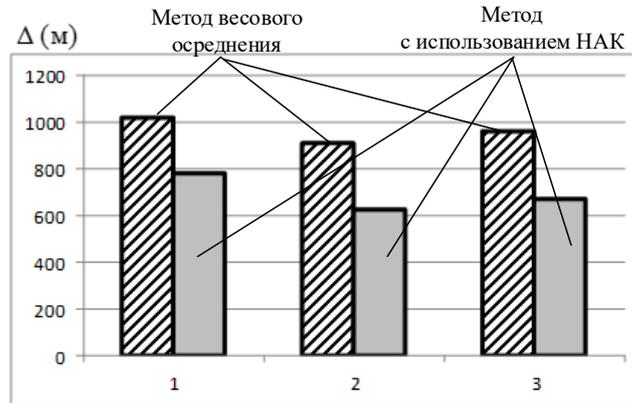


Рис. 1. Зависимость ошибок определения пространственного положения воздушных объектов от их условий полета и метода осреднения (1 – полет в построении «ромб», 2 – полет в построении «пеленг», 3 – полет в построении «клин»)

Fig. 1. The dependence of the errors in determining the spatial position of airborne objects from their flight conditions and the averaging method (1 – flight in the construction of the “rhombus”, 2 – flight in the construction of the “bearing”, 3 – flight in the construction of the “wedge”)

Критерием останова алгоритма будем считать достижение заданного порога $\varepsilon = 0,01$, при котором обеспечиваются удовлетворительные результаты [4].

Для нашего примера график сходимости имеет вид, представленный на рис. 2.

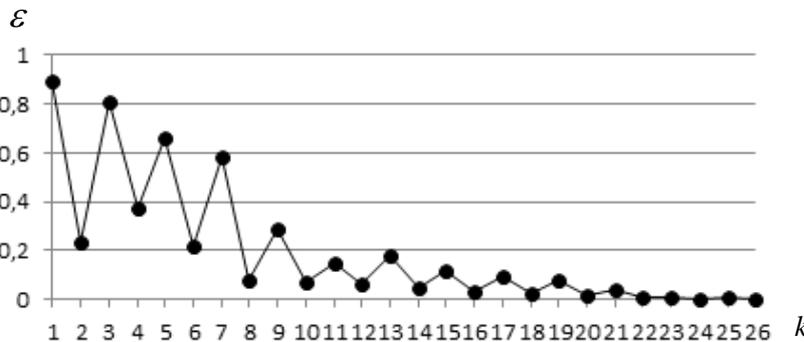


Рис. 2. Сходимость алгоритма НАК для иллюстрационного примера

Fig. 2. Convergence of the NAC algorithm for an illustrative example

Обсуждение результатов

Наиболее плотным распределением объектов в воздушном пространстве является «ромб». Далее идут «клин» и «пеленг» соответственно. Как следует из рис. 1, более плотному построению соответствуют и большие ошибки. Однако во всех трех вариантах построения наблюдается преимущество в точности оценок положения метода с использованием НАК перед методом весового осреднения в среднем до 30 %.

На рис. 2 график сходимости алгоритма с-средних достигает искомого значения $\varepsilon = 0,01$ примерно на 15÷17 итерациях. Это соответствует времени исполнения алгоритма, не превышающего 10–20 мкс, что позволяет решать задачу в масштабе реального времени.

Заклучение

Таким образом, в условиях априорной неопределенности параметров закона распределения ошибок траекторных измерений, особенно в условиях плотного построения воздушных объектов, применение методов нечеткой автоматической классификации позволяет повысить точность оценок до 30 % по сравнению с методами, основанными на применении вероятностного подхода. Кроме того, высокое быстродействие алгоритмов НАК обуславливает перспективность их применения в системах траекторной обработки, особенно в условиях возрастающей интенсивности воздушного движения.

Список литературы

1. Сирота А.Л. Вероятностные модели формирования результирующего вектора наблюдений в многоуровневых, многопозиционных системах. *Радиотехника*. 1998;6:10-14.
2. Коновалов А.А. *Основы траекторной обработки радиолокационной информации*. Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; 2013.
3. Белоус А.А., Хижняк А.В., Шевяков А.В. Метод объединения радиолокационной информации на основе нечеткой классификации. *Инженерный вестник*. 2010;3(29):38-43.
4. Вятчин Д.А., Шевяков А.В., Хижняк А.В. *Нечеткая кластеризация и нечеткая математическая морфология в задачах обработки изображений*. Минск: ВА РБ; 2012.
5. Охрименко А.Е. *Основы обработки и передачи информации*. Минск: МВИЗРУ; 1990.

References

1. Sirota A.L. [Probabilistic models for the formation of the resulting observation vector in multi-level, multi-position systems]. *Radiotekhnika = Radio Engineering*. 1998;6:10-14. (In Russ.)
2. Konovalov A.A. [*Fundamentals of trajectory processing of radar information*]. Saint Petersburg: SPSETU "LETI"; 2013. (In Russ.)
3. Belous A.A., Khizhnyak A.V., Shevyakov A.V. [The method of combining radar information based on fuzzy classification]. *Inzheneriy vestnik = Inzheneriy vestnik*. 2010;3(29):38-43. (In Russ.)
4. Vyatchenin D.A., Shevyakov A.V., Khizhnyak A.V. [*Fuzzy clustering and fuzzy mathematical morphology in image processing problems*]. Minsk: VA RB; 2012. (In Russ.)
5. Okhrimenko A.E. [*Fundamentals of information processing and transmission*]. Minsk: MVIZRU; 1990. (In Russ.)

Сведения об авторах

Хижняк А.В., к.т.н., доцент, начальник кафедры автоматизированных систем управления войсками Военной академии Республики Беларусь.

Information about the authors

Khizhniak A.V., PhD, Assistant of Professor, Head of research laboratory automated control system of troops of Military Academy of the Republic of Belarus.

Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Независимости, д. 220,
Военная академия Республики Беларусь
тел. +375-29-364-41-90;
e-mail: khizhniak_av@mail.ru
Хижняк Александр Вячеславович

Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosty ave., 220,
Military Academy of the Republic of Belarus
tel. +375-29-364-41-90;
e-mail: khizhniak_av@mail.ru
Khizhniak Aliaksandr Vyacheslavovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-96-104>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 623.618

СПОСОБ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ НАБЛЮДЕНИЯ ТЕПЛОВИЗИОННОГО ТИПА

МИХНЁНОК Е.И.

Военная академия Республики Беларусь (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 13 марта 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В статье рассмотрен предлагаемый автором способ обработки изображений применительно к задаче автоматического обнаружения движущихся объектов в оптико-электронных системах тепловизионного типа. Исследованию подлежат движущиеся объекты на наблюдаемой сцене, поэтому для решения задачи обнаружения целесообразно применение алгоритмов, основанных на методах вычитания фона. Однако среди наблюдаемых объектов могут находиться как объекты интереса (человек, транспортное средство), так и другие объекты и элементы фона, повышающие шумовую составляющую наблюдаемой обстановки. Также на повышение шумовой составляющей огромное влияние оказывает ложная сегментация в передний план областей обрабатываемых изображений при переносе поля зрения датчика оптико-электронной системы наблюдения. Целью настоящей статьи является доказательство снижения вероятности ложной тревоги автоматического обнаружителя за счет предлагаемых автором подходов к обработке изображений. Для исследования используется математический аппарат теории вероятностей и имитационное моделирование с последующей статистической обработкой данных. В статье показано, что вероятность ложной тревоги автоматического обнаружителя, построенного на методе вычитания фона, существенно возрастает после переноса поля зрения датчика оптико-электронной системы наблюдения и уменьшается после прекращения движения по мере автоматической сегментации ложно выделенных в передний план областей обрабатываемого изображения. Проведенное моделирование показало: предлагаемые автором подходы позволяют повысить пиковое отношение сигнал/шум обрабатываемых изображений и снизить вероятность ложной тревоги автоматического обнаружителя объектов интереса. Полученные результаты показывают реализуемость адаптации алгоритмов обнаружения, построенных на методах вычитания фона, для работы в сканирующих оптико-электронных системах наблюдения.

Ключевые слова: способ обработки, движущиеся объекты, оптико-электронная система.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Михнёнок Е.И. Способ обработки изображений в задаче обнаружения движущихся объектов в оптико-электронных системах наблюдения тепловизионного типа. Доклады БГУИР. 2020; 18(2): 96-104.

METHOD OF IMAGE PROCESSING IN THE PROBLEM OF DETECTING MOVING OBJECTS IN OPTICAL-ELECTRONIC SURVEILLANCE SYSTEMS OF THERMAL IMAGING TYPE

EVGENY I. MIKHNIONOK

Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 13 March 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The article considers the method of image processing proposed by the author in relation to the problem of automatic detection of moving objects in optoelectronic thermal imaging systems. Moving objects on the observed scene are subject to investigation, so it is advisable to use algorithms based on background subtraction methods to solve the detection problem. However, the observed objects may include objects of interest (a person, a vehicle), as well as other objects and background elements that increase the noise component of the observed situation. Also, the increase in the noise component is greatly influenced by false segmentation in the foreground of the areas of processed images when transferring the field of view of the sensor of the optical-electronic surveillance system. The purpose of this article is to prove the reduction of the probability of false alarm of an automatic detector due to the author's proposed approaches to image processing. The research uses the mathematical apparatus of probability theory and simulation with subsequent statistical processing of data. The article shows that the probability of a false alarm of an automatic detector based on the background subtraction method increases significantly after the transfer of the field of view of the sensor of the optical-electronic surveillance system and decreases after the movement stops as the areas of the processed image that are falsely highlighted in the foreground are automatically segmented. The simulation showed that the approaches proposed by the author can increase the peak signal-to-noise ratio of processed images and reduce the probability of a false alarm of the automatic detector of objects of interest. The results obtained show the feasibility of adapting detection algorithms based on background subtraction methods to work in scanning optoelectronic surveillance systems.

Keywords: processing method, moving objects, optical-electronic system.

Conflict of interests. The author claims no conflict of interest.

For citation. Mikhnionok E.I. Method of image processing in the problem of detecting moving objects in optical-electronic surveillance systems of thermal imaging type. Doklady BGUIR. 2020; 18(2): 96-104.

Введение

В настоящее время системы видеонаблюдения активно внедряются в различные сферы человеческой деятельности: в геологических и гидрологических исследованиях, лесном и сельском хозяйстве, охране окружающей среды, исследованиях космоса, в образовательных, военных и других целях. Для решения задачи обнаружения малококонтрастных, малоразмерных объектов актуально применение многоканальных сканирующих оптико-электронных систем наблюдения, функционирующих в любое время суток (день, ночь), в любых погодных условиях (дождь, туман и др.). Однако наличие каналов наблюдения различных частотных спектров вносит свои особенности в процесс функционирования данных систем. Так, например, при использовании датчиков ИК-диапазона в дневное время суток, особенно в летний период, местные предметы наблюдаемой сцены (столбы опор электропередачи, участки земли и др.) сильно нагреваются и на общем фоне имеют повышенный тепловой контраст. Это приводит к их ложному автоматическому обнаружению. Также дребезжание листвы, качание крон деревьев, наличие других дестабилизирующих факторов приводит к увеличению шумовой составляющей. Исключение влияния данных факторов на процесс обнаружения позволяет значительно повысить эффективность работы алгоритмов обнаружения и расширить их область применения.

В рассматриваемой задаче объектом интереса выступают человек и транспортное средство, а датчиком – оптико-электронная система с тепловизионным каналом, функционирующая в сложной фоноцелевой обстановке.

Учитывая тот факт, что объекты интереса характеризуются преимущественным движением на анализируемых участках местности, для реализации алгоритмов обнаружения с учетом особенностей наблюдаемой фоноцелевой обстановки целесообразно применение методов, основанных на вычитании фона.

Однако использование данных методов в «чистом виде», без дополнительных этапов обработки результатов их работы, не всегда в полном объеме позволяет минимизировать дестабилизирующие факторы в анализируемой сцене, а также шумовые воздействия, возникающие при переносе поля зрения датчика системы наблюдения.

Основная часть

В качестве исходного метода для реализации автоматического обнаружителя использован метод вычитания фона, в котором модель фона строится на основе улучшенной адаптивной смеси гауссовых распределений (MOG2) [1]. Достоинствами данного метода является его адаптированность к резким изменениям освещения сцены, что достигается автоматическим выбором количества компонент смеси, описывающих пиксель изображения.

Принцип работы обнаружителя заключается в следующем. При построении модели фона с использованием смеси гауссовых распределений производится накопление статистики изменения интенсивности каждого пикселя (x, y) изображения I_k на определенном числе кадров $\{X_1, X_2, \dots, X_k\} = \{I_j(x, y), j = \overline{1, k}\}$.

Соответственно, наблюдение значения $X_k(x, y)$ может определяться вероятностью [2]:

$$P(X_k) = \sum_{j=1}^S \omega_j^k N(X_k | \mu_j^k, \Sigma_j^k), \quad (1)$$

где ω_j^k – вес j -го распределения кадра k ; μ_j^k – математическое ожидание j -го распределения; Σ_j^k – среднеквадратичное отклонение j -го распределения; $N(X_k | \mu_j^k, \Sigma_j^k)$ – функция плотности нормального распределения; S – количество распределений в смеси.

Таким образом, для каждого пикселя обрабатываемого кадра задается распределение значений его интенсивности. Для обновления параметров модели фона используется новое значение интенсивности, выраженное одной из компонент смеси распределений.

Сортировка распределений в порядке уменьшения величины (2) используется для классификации пикселей (фона или переднего плана). Распределение с наименьшей дисперсией и максимальным весом соответствует пикселю фона [2].

$$r_j^k = \frac{\omega_j^k}{\sigma_j^k}. \quad (2)$$

Определим, что распределения, удовлетворяющие условию (3), относятся к фоновым пикселям фона.

$$B^k = \operatorname{argmin}_b \left\{ \sum_{j=1}^b \omega_j^k > T_{\min} \right\}, \quad (3)$$

где T – минимальный объем данных, описывающих распределение пикселей фона.

Для каждого пикселя кадра I_{k+1} производится определение соответствия распределению из группы B^k :

$$\sqrt{(X_{k+1} - \mu_j^k)^T (\sigma_j^k)^2 (X_{k+1} - \mu_j^k)} < 2,5\sigma_j^k. \quad (4)$$

При наличии соответствия пиксель относится к группе фоновых. При отсутствии соответствующего распределения принимается решение о соответствии пикселя объекту.

В зависимости от соответствия пикселя распределению из группы B^k производится обновление параметров распределений для обработки кадра I_{k+1} .

При нахождении соответствия весовые коэффициенты и параметры распределений пересчитываются согласно формул [2]:

$$\begin{aligned} \omega_j^{k+1} &= \omega_j^k + \alpha(1 - \omega_j^k) - \alpha c_T, \\ \mu_j^{k+1} &= (1 - \rho)\mu_j^k + \rho X_{k+1}, \\ (\sigma_j^{k+1})^2 &= (1 - \rho)(\sigma_j^k)^2 + \rho(X_{k+1} - \mu_j^{k+1})(X_{k+1} - \mu_j^{k+1})^T, \end{aligned} \quad (5)$$

где α – заданная константа; $\rho = \alpha N(x_k | \mu_j^k, \Sigma_j^k)$; $c_T = c/T$, c – параметр модели.

Распределениям, которым не соответствует X_{k+1} , пересчитываются веса согласно (6):

$$\omega_j^{k+1} = (1 - \alpha)\omega_j^k. \quad (6)$$

При отсутствии соответствия последнее распределение замещается новым со следующими параметрами: $\mu_s^{k+1} = X_{k+1}$, $(\sigma_s^{k+1})^2$ максимальная, ω_s^{k+1} минимальным.

Таким образом, обнаруживаются все движущиеся объекты на наблюдаемой сцене. Однако вместе с объектами интереса могут ложно обнаружиться местные объекты с повышенным тепловым контрастом, а также ложно детектироваться пиксели изображения в объекты переднего плана после переноса поля зрения датчика. Поэтому дальнейшие этапы направлены на исключение данных объектов.

Обнаруженные объекты поступают на этап пространственной фильтрации. Данный этап заключается в последовательном применении операций математической морфологии, оконтуривания и фильтрации объектов, не удовлетворяющих условиям минимальных размеров.

Термин математической морфологии относится к описанию свойств формы областей на изображении. Основными операциями являются расширение (дилатация), сжатие (эрозия), замыкание и размыкание [3].

Операции расширение (7) и сжатие (8) определяются следующим образом:

$$\delta_B(S) = S \oplus B = \{s + b \mid s \in S; b \in B\}, \quad (7)$$

$$\varepsilon_B(S) = S - B = \{B_h \subseteq S \mid h \in E\}, \quad (8)$$

где $\delta_B(S)$ – расширение подмножества S со структурным элементом B ; $\varepsilon_B(S)$ – сжатие подмножества S со структурным элементом B ; E – дискретная плоскость; h – вектор, определяющий каждую позицию B на E ; B_h – перенос B относительно h ; S – совокупность пикселей изображения объекта интереса; B – структурный элемент.

Результат обработки существенно зависит от конфигурации и размеров выбранного структурного элемента. Определение его конфигурации является эмпирическим процессом, а выбор размера представляет собой оптимизационную задачу, решение которой зависит от определенных факторов. Во-первых, необходимо сохранить топологию интересующего объекта, во-вторых, максимально использовать возможности методов математической морфологии для устранения дефектов изображения, в-третьих, необходимо минимизировать время обработки.

Последовательное выполнения операции сжатия и расширения определяют операцию размыкания (9):

$$A \circ B = (A(-)B) \oplus B, \quad (9)$$

где A – обрабатываемое изображение, B – структурный элемент.

В данном случае операция размыкания позволяет удалить объекты, размеры которых меньше размеров структурного элемента, а также отлично удаляет линии, толщина которых меньше, чем диаметр структурного элемента.

В свою очередь последовательное выполнение операций расширения и сжатия определяют операцию замыкания (10).

$$A \bullet B = (A \oplus B)(-)B. \quad (10)$$

Применение операции замыкания позволяет убрать малые дыры и щели в изображениях объектов. Параллельно с применением операций математической морфологии производится оконтуривание объектов. Целью данного этапа является выделение объектов, имеющих замкнутый контур. Вследствие того, что движение на наблюдаемых участках сцены могут осуществлять не только объекты интереса, но и другие объекты, например, дикие животные, то возникает необходимость определения минимального значения порога размеров обрабатываемых объектов.

Так как объектами интереса с наименьшими размерами выступает человек, то именно для данного типа объектов необходимо определить минимальный порог. В целях определения значения данной величины было проведено экспериментальное исследование. Объектом исследования выступал взрослый человек среднего роста (165 см), средством наблюдения являлся тепловизионный канал оптико-электронной системы наблюдения.

Для получения значения с доверительной вероятностью 0,9 и доверительным интервалом 5 % было проведено 2180 измерений. Результаты измерений показали, что при наблюдении в фас фигура человека занимает в среднем 28 пикселей, а при наблюдении в профиль – 24 пикселя. Поэтому для определения минимального порога размера объекта принимался случай при наблюдении его в профиль. Среднее значение составило 24 пикселя, а среднеквадратическое отклонение – 1,4 пикселя. Следовательно, значение минимального порога размера объектов интереса составило $S_{\min} = 20$ пикселей.

Конечным является этап временной фильтрации объектов, заключающийся в выполнении условия

$$k / n, \quad (11)$$

где k – требуемое количество последовательно обрабатываемых кадров, на которых наблюдался объект интереса; n – количество обрабатываемых кадров.

С целью устранения эффекта ложного детектирования областей изображения и отнесения их к группе объектов интереса в случаях переноса поля зрения датчика применяется отключение работы обнаружителя при движении оптико-электронной системы наблюдения.

Блок-схема алгоритма разработанного способа обработки изображений в задаче автоматического обнаружения движущихся объектов представлена на рис. 1.

Оценку эффективности применения разработанного способа проведем для показателей, характеризующих качество обработки изображения и качество решения задачи обнаружения. В качестве примера используем видеозапись движения группы нарушителей по участку Государственной границы. Одним из показателей, характеризующих качество обработки изображений, является пиковое отношение сигнал/шум [4]. В качестве критерия используем максимизацию его значения. Пиковое отношение сигнал/шум (PSNR) представляет собой отношение максимального значения сигнала к среднеквадратичному уровню шума, которое определяется разницей между свойствами пикселей исходного и обработанного кадров [4]:

$$PSNR = 10 \log \left(\frac{I_{\max}^2}{MSE} \right), \quad (12)$$

где I_{\max} – максимальное значение яркости пикселя изображения; $MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{1,i} - I_{2,i})^2$, – среднеквадратическая ошибка между двумя изображениями; n – количество пикселей изображения; I_1 – яркости пикселей обработанного изображения; I_2 – яркости пикселей исходного изображения.

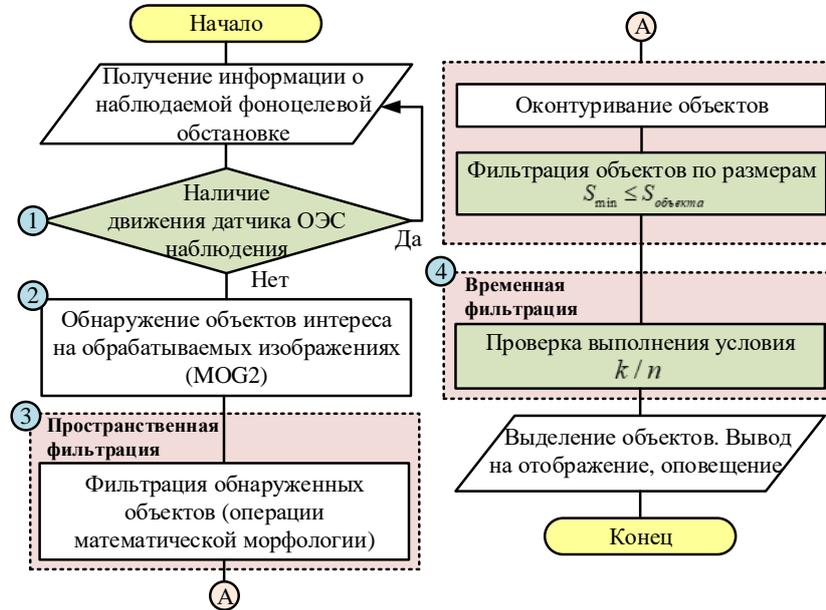


Рис. 1. Блок-схема алгоритма разработанного способа обработки изображений
Fig. 1. Block diagram of the algorithm of the developed image processing method

Следует отметить, что критерий измерения пикового отношения сигнал/шум основывается на сравнении пары изображений до и после их обработки. В качестве изображения до обработки примем результат работы алгоритма обнаружения, основанного на методе вычитания фона, в котором модель фона представляется смесью гауссовых распределений. Изображением после обработки выступит результат работы разработанного способа обработки изображений и метода извлечения визуального фона (ViVe) [5].

Для характеристики качества решения задачи обнаружения рассчитаем вероятность ложной тревоги. Следует отметить, что на выходе обнаружителя, основанного на методе вычитания фона, формируется изображение, где пиксели представляют решение о наличии или отсутствии объекта интереса. Учитывая, что координаты искомого объекта известны, можно вычислить количество правильно и ложно обнаруженных объектов.

Рассматривая итоговое изображение как набор принятых независимых решений и исходя из формул частоты события и полной вероятности, вероятности ложной тревоги можно вычислить по формуле [6]

$$F_k = \frac{N_{\text{лож}_i}}{N_k}, \quad (13)$$

где $N_{\text{лож}_i}$ – количество пикселей i ложно обнаруженных объектов; N_k – количество пикселей изображения k .

На рис. 2 представлены примеры обнаружения объектов интереса исследуемыми методами. Из рисунка видно, что при переносе поля зрения датчика (211-294 кадр) происходит неправильная сегментация пикселей обрабатываемых изображений (MOG2, Vibe), что, в свою очередь, приводит к уменьшению пикового отношения сигнал/шум (рис. 3) и повышению вероятности ложной тревоги (рис. 4).

Из рис. 3 видно, что для данного примера значение $PSNR$ разработанного способа превышает значения $PSNR$ метода MOG2 в среднем на 27 дБ, а $PSNR$ метода Vibe – на 21 дБ.

Из рис. 4 видно, что для данной фоноцелевой обстановки значение вероятности ложной тревоги при переносе поля зрения датчика опико-электронной системы наблюдения возрастает на несколько порядков (MOG2, Vibe) и уменьшается после прекращения движения по мере автоматической сегментации ложно выделенных в передний план областей обрабатываемого изображения. Среднее значение вероятности ложной тревоги для данного примера составляет: разработанный способ – 1×10^{-6} , Vibe – 1×10^{-3} , MOG2 – 2×10^{-3} .

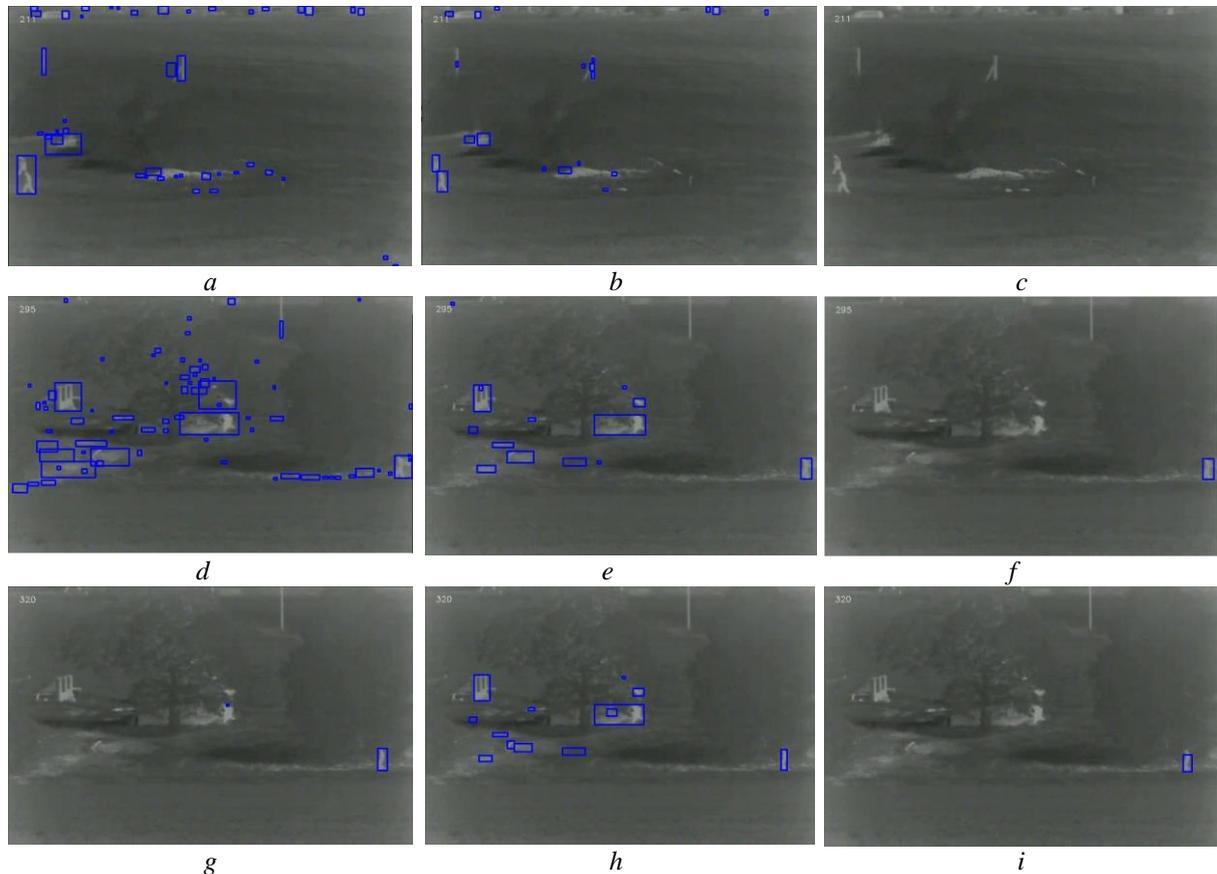


Рис. 2. Примеры работы исследуемых методов: 211 кадр (*a* – MOG2, *b* – Vibe, *c* – разработанный способ); 295 кадр (*d* – MOG2, *e* – Vibe, *f* – разработанный способ); 320 кадр (*g* – MOG2, *h* – Vibe, *i* – разработанный способ)
Fig. 2. Examples of the methods under study: 211 frame (*a* – MOG2, *b* – Vibe, *c* – developed method); 295 frame (*d* – MOG2, *e* – Vibe, *f* – developed method); 320 frame (*g* – MOG2, *h* – Vibe, *i* – developed method)

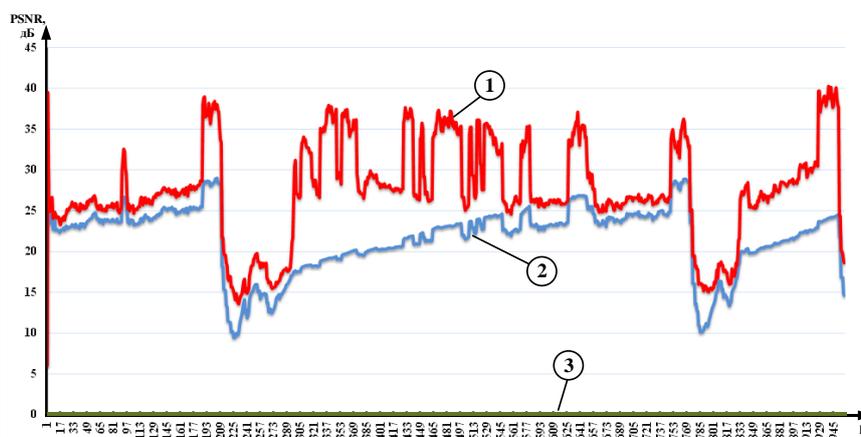


Рис. 3. Значения пикового отношения сигнал/шум (*PSNR*) на каждом кадре исследуемой видеопоследовательности (1 – разработанный способ, 2 – Vibe, 3 – MOG2)
Fig. 3. Values of the peak signal- to- noise ratio (*PSNR*) on each frame of the video sequence under study (1 – developed method, 2 – Vibe, 3 – MOG2)

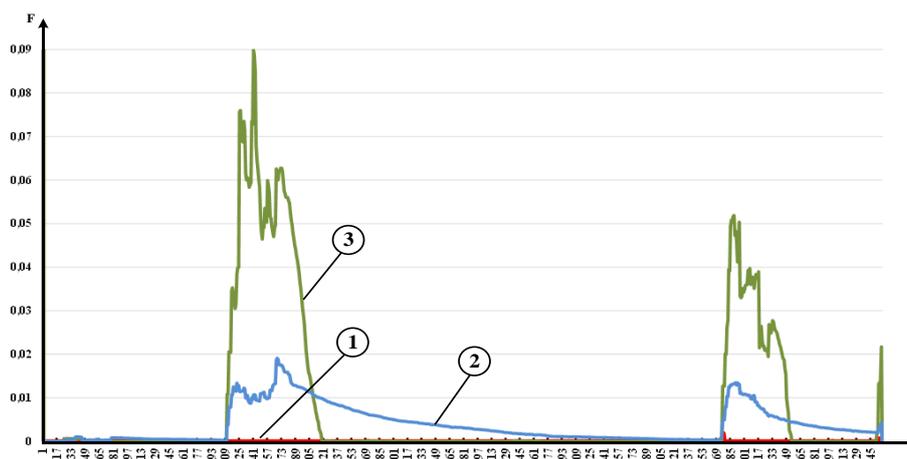


Рис. 4. Значения вероятности ложной тревоги на каждом кадре исследуемой видеопоследовательности (1 – разработанный способ, 2 – Vibe, 3 – MOG2)

Fig. 4. False alarm probability values for each frame of the video sequence under study (1 – developed method, 2 – Vibe, 3 – MOG2)

Заключение

Таким образом, представленный способ обработки изображений применительно к задаче обнаружения движущихся объектов в оптико-электронных системах тепловизионного типа позволяет адаптировать к работе в сканирующих системах наблюдения алгоритмы обнаружения, построенные на методах вычитания фона, повысить не менее чем в 10 раз в зависимости от наблюдаемой фоноцелевой обстановки пиковое отношение сигнал/шум обрабатываемых изображений, тем самым уменьшить вероятность ложной тревоги не менее чем на один порядок.

Список литературы

1. Zivkovic Z. Improved adaptive gaussian mixture model for background subtraction. *IEEE Proceedings of the 17th International Conference*. 2004;28-31.
2. Заливин А.Н., Балабанова Н.С. Обнаружение движущихся объектов методом вычитания фона с использованием смеси Гауссовых распределений. *Автоматизированные технологии и производства*. 2016;3:45-48.
3. Dougherty E.R. The dual representation of gray-scale morphological filters. *IEEE Trans. PAMI*. 1989.
4. Конюхов А.Л., Костевич А.Г., Курячий М.И. Критерии оценки отношения сигнал/шум в активно-импульсных телевизионно-вычислительных системах. *Доклады ТУРСУРа*. 2012;2:111-115.
5. Barnich O. ViBe: A universal background subtraction algorithm for video sequences. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2011;20(6):1709-1724.
6. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. *Теория вероятностей и ее инженерные приложения*. Москва: Высшая школа; 2000:480.

References

1. Zivkovic Z. Improved adaptive gaussian mixture model for background subtraction. *IEEE Proceedings of the 17th International Conference*. 2004;28-31.
2. Zalivin A.N., Balabanova N.S. [Detecting moving objects by subtracting the background using a mixture of Gaussian distributions]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva = Automated Technologies and Production*. 2016;3:45-48. (In Russ.)
3. Dougherty E.R. [The dual representation of gray-scale morphological filters]. *IEEE Trans. PAMI*. 1989.
4. Konyukhov A.L., Kostevich A.G., Kuryachiy M.I. [Criteria for evaluating the signal-to-noise ratio in active-pulse television and computer systems]. *Doklady TURSURA = Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*. 2012;2:111-115. (In Russ.)

5. Barnich O. ViBe: A universal background subtraction algorithm for video sequences. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2011;20(6):1709–1724.
6. Venttsel' Ye.S., Ovcharov L.A. [*Probability theory and its engineering applications*]. Moscow: Vysshaja Shkola; 2000:480. (In Russ.)

Сведения об авторах

Михнёнок Е.И., младший научный сотрудник НИЛ кафедры автоматизированных систем управления войсками Военной академии Республики Беларусь.

Information about the authors

Mikhnionok E.I., Junior Researcher of Research laboratory automated control system of troops of Military Academy of the Republic of Belarus.

Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Независимости 220,
Военная академия Республики Беларусь
тел. +375-29-291-27-36
e-mail: actosum@gmail.com
Михнёнок Евгений Игоревич

Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti ave., 220,
Military Academy of the Republic of Belarus
tel. +375-29-291-27-36
e-mail: actosum@gmail.com
Mikhnionok Evgeny Igorevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-105-111>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 234.538

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕННЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ СИСТЕМЫ Pt-Si

СОЛОДУХА В.А.¹, ПИЛИПЕНКО В.А.¹, КОМАРОВ Ф.Ф.², ГОРУШКО В.А.¹

¹ ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл» (г. Минск, Республика Беларусь)

² Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 16 марта 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Работа посвящена установлению закономерностей изменения микроструктуры системы Pt-Si при быстрой термообработке. Пленки Pt толщиной 43,7 нм наносились на подложки монокристаллического кремния КЭФ 0.5 ориентации (111) путем магнетронного распыления мишени из платины с чистотой 99,95 % на установке MPC 603 с криогенной откачкой до давления не менее $5 \cdot 10^{-5}$ Па. В качестве рабочей среды использовался аргон, чистота которого составляла 99,933 %. Быстрая термическая обработка проводилась в режиме теплового баланса путем облучения обратной стороны пластины некогерентным световым потоком в среде азота в диапазоне температур от 200 до 550 °С с шагом 50 °С в течение 7 с. Параллельно осуществлялся твердофазный синтез силицида платины стандартным методом с применением длительной одностадийной термообработки в аналогичной среде ($T = 550$ °С, $t = 30$ мин). Контроль температуры осуществлялся термометрическим методом с точностью $\pm 0,5$ °С. Размер зерна определялся методом просвечивающей электронной микроскопии. Толщина формируемого силицида платины, микрорельеф его поверхности и границы раздела с кремнием определялись методом растровой электронной микроскопии. Показано, что с увеличением температуры быстрой термообработки наблюдается рост зерен пленки платины на кремнии. Проведен сравнительный анализ среднего размера зерен, микрорельефа поверхности PtSi и ее границы раздела с кремнием для двух методов его формирования: с применением БТО и с использованием традиционной длительной термообработки при температуре 550 °С в течение 30 мин. в атмосфере азота. С помощью метода растровой электронной микроскопии показано, что величина микрорельефа на границе раздела PtSi-Si не превышает 15,9 нм, а размер зерен 37,7 нм. Это в 2,5 и 3,1 раза меньше, чем в случае традиционной одностадийной длительной термообработки.

Ключевые слова: быстрый термический отжиг, силициды платины, микроструктура, поверхность, граница раздела.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Солодуха В.А., Пилипенко В.А., Комаров Ф.Ф., Горушко В.А. Влияние временных режимов термообработки на микроструктуру системы Pt-Si. Доклады БГУИР. 2020; 18(2): 105-111.

INFLUENCE OF TIME MODES OF THERMAL TREATMENT ON Pt-Si SYSTEM MICROSTRUCTURE

SALADUKHA V.A.¹, PILIPENKO V.A.¹, KOMAROV F.F.², GORUSHKO V.A.¹

¹ JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

² Scientific research institution «Institute of Applied Physics Problems named after A. N. Sevchenko»
of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 16 March 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The paper is purposed to establish the principles of the micro-structural changes of Pt-Si system during the rapid thermal treatment. The Pt films 43.7 nm thick were applied on the substrates of mono-crystal silicon KEF 0.5 with orientation (111) by means of the magnetron platinum target sputtering (purity of 99.95 %) on the unit MPC 603 with the cryogen pumping to the pressure of no less than $5 \cdot 10^{-5}$ Pa. Argon was used as a working medium, whose purity constituted 99.933 %. Rapid thermal treatment was performed in the mode of the thermal balance with irradiation of the reverse side of the wafer by means of the non-coherent light flow in the nitrogen medium within the temperature range from 200 to 550 °C with a step of 50 °C during 7 s. In parallel, the solid phase synthesis was performed of platinum silicide by means of the standard method with application of the continuous single stage thermal treatment in the analogue medium ($T = 550$ °C, $t = 30$ min). Temperature monitoring was performed by means of the thermal couple method with accuracy of ± 0.5 °C. The grain size was determined by the translucent electron microscopy method. Thickness of platinum silicide under formation, its surface micro-relief and the separation boundaries with silicon were determined by means of the raster electron microscopy. It is demonstrated, that with the rise of the rapid thermal treatment one can observe growth of the platinum film on silicon. A comparative analysis was conducted of the average size of grains, micro-relief of the PtSi surface and its separation boundary with silicon for two methods of its formation with application of the rapid thermal treatment and with application of the traditional continuous thermal treatment at the temperature of 550 °C during 30 min in the nitrogen atmosphere. By means of the raster electron microscopy method it is demonstrated, that size of the micro-relief on the separation boundary of PtSi-Si does not exceed 15.9 nm and the size of grains is 37.7 nm. This is in 2.5 and 3.1 times smaller, then in the case of the traditional single stage continuous thermal treatment.

Keywords: rapid thermal annealing, platinum silicide, micro-structure, surface, interface.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Saladukha V.A., Pilipenko V.A., Komarov F.F., Gorushko V.A. Influence of time modes of thermal treatment on Pt-Si system microstructure Doklady BGUIR. 2020; 18(2): 105-111.

Введение

Пленки силицида платины на кремнии находят широкое применение в силовой микроэлектронике при формировании барьеров Шоттки и омических контактов [1, 2]. Это обусловлено стабильностью их механических и электрических свойств, низкими механическими напряжениями, стойкостью к электромиграции, легкостью получения [3]. Основным методом формирования силицидов является твердофазный синтез, который заключается во взаимодействии кремния с соответствующей пленкой металла при температурах от 400 до 1000 °C. Температура, время и среда данного процесса являются определяющими в формировании фазового состава, кристаллической структуры, размера зерен, механических и электрических параметров получаемого силицида. Применение высоких температур и длительностей приводит к существенному изменению микрорельефа границы раздела силицид–кремний. При этом, чем выше температура и длительность обработки, тем более развитым формируется микрорельеф границы раздела [4]. В случае диодов Шоттки это приводит к значительному увеличению токов утечки. Высокие температуры сопровождаются также

нежелательными диффузионными процессами в уже сформированных слоях, образованием и ростом структурных нарушений, механических и термических напряжений. Использование быстрой термической обработки для получения силицидов позволяет значительно снизить время их формирования без существенного изменения температуры процесса, тем самым исключить вышеуказанные отрицательные явления [5, 6].

Цель настоящей работы – исследование влияния временных режимов термообработок системы Pt-Si на ее микроструктуру: размер зерен, микрорельеф поверхности и границу раздела формируемого силицида с кремнием.

Объекты и методика эксперимента

Для проведения исследований пленки Pt толщиной 43,7 нм наносились на подложки монокристаллического кремния КЭФ 0.5 ориентации (111) путем магнетронного распыления мишени из платины с чистотой 99,95 % на установке MPC 603 с криогенной откачкой до давления не ниже $5 \cdot 10^{-5}$ Па. В качестве рабочей среды использовался аргон, чистота которого составляла 99,933 %. Быстрые термообработки в среде азота проводились на установке с галогенными лампами в диапазоне температур от 200 до 550 °C с шагом 50 °C и временем 7 с. Параллельно осуществлялся твердофазный синтез силицида платины стандартным методом с применением длительной одностадийной термообработки в аналогичной среде ($T = 550$ °C, $t = 30$ мин). Контроль температуры осуществлялся термопарным методом с точностью $\pm 0,5$ °C. Исследования изменения размера зерен проводились методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), а измерения толщины формируемого силицида платины, микрорельефа его поверхности и границы раздела с кремнием – методом растровой электронной микроскопии.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлены результаты исследования изменения размера зерен, проведенные методом ПЭМ, а также измерения толщины формируемого силицида платины, микрорельефа его поверхности и границы раздела с кремнием от температуры быстрой термообработки (БТО) системы Pt-Si, выполненные на сколах методом растровой электронной микроскопии.

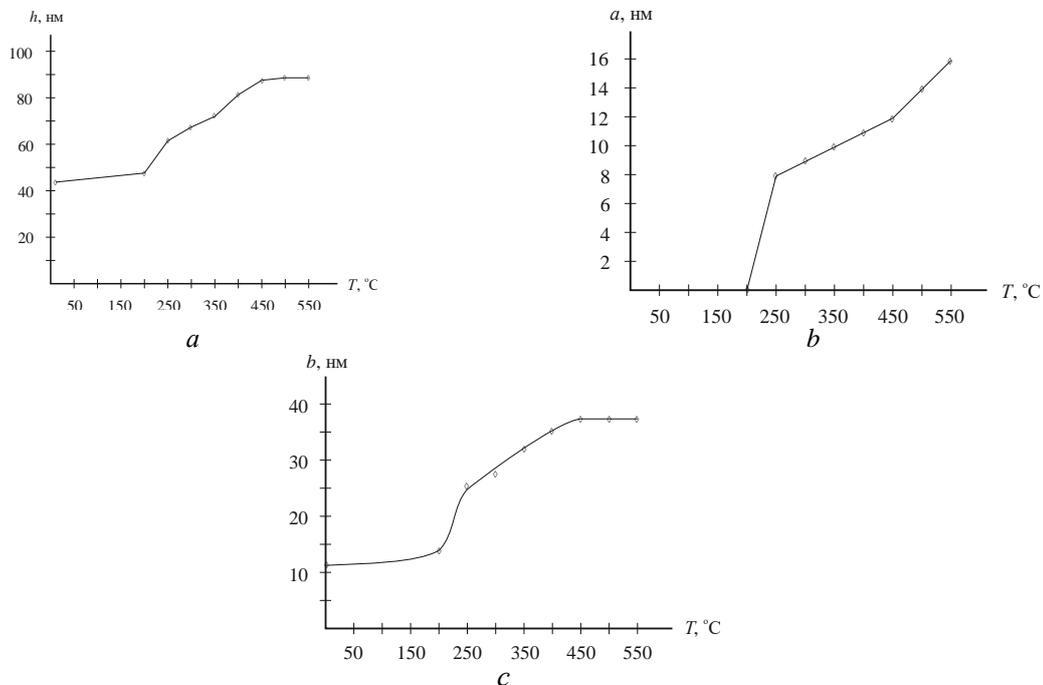


Рис. 1. Зависимость толщины формируемого силицида платины (a), микрорельефа на границе раздела (b) и размера зерен (c) от температуры БТО системы Pt-Si
Fig. 1. Dependence of the thickness of the formed platinum silicide (a), the microrelief at the interface (b), and the grain size (c) on the RTT temperature of Pt-Si system

БТО системы Pt-Si при температуре 200 °C приводит к небольшому росту толщины пленки (см. рис. 1, *a*) за счет начала диффузионных процессов на границе раздела Pt-Si без изменения микрорельефа (см. рис. 1, *b*) как на границе ее раздела с Si, так и ее поверхности. При этом имеет место небольшой рост среднего размера зерен (см. рис. 1, *c*), который увеличился от 11,9 нм для исходной пленки Pt до 13,9 нм после БТО. Увеличение температуры БТО до 250 °C вызывает увеличение от 47,6 до 63,5 нм толщины пленки, что обусловлено формированием силицида платины обогащенного металлом Pt₂Si, а также увеличение до 25,8 нм размера зерен. При этом появляется микрорельеф и на границе раздела Pt₂Si-Si, величина которого составила 7,9 нм.

Повышение температуры БТО до 300 °C приводит к дальнейшему увеличению толщины формируемого силицида от 63,5 до 67,4 нм, обусловленному полным переходом пленки Pt в пленку Pt₂Si. При этом также происходит увеличение микрорельефа на границе раздела, обусловленное интенсификацией на ней процесса диффузии Pt в Si, вызывающего разрыв связей Si-Si по междоузельному механизму, что и приводит к увеличению до 8,9 нм микрорельефа на границе раздела. При этом имеет место незначительный рост микрорельефа на поверхности пленки, связанный с изменением среднего размера зерен пленки, который увеличился до 27,8 нм. Такое увеличение толщины объясняется тем, что при твердофазном синтезе силицида платины идет реакция между пленкой металла и кремнием, при этом плотность слоя Pt₂Si отличается от плотности пленки Pt и Si-подложки. Используя теоретические значения плотностей Pt, Si и Pt₂Si, можно легко рассчитать, что на 1 нм металла расходуется 0,66 нм кремния и образуется 1,43 нм Pt₂Si. Это означает, что при напылении 43,7 нм слоя платины на кремний, что имеет место в рассматриваемом случае, должно образоваться 62,5 нм Pt₂Si. В данном случае образовалось 67,4 нм Pt₂Si, что достаточно хорошо согласуется с рассчитанной толщиной такой пленки.

Увеличение температуры БТО до 350 °C приводит к росту от 67,4 до 71,0 нм толщины формируемого силицида платины, а также увеличению микрорельефа, как на поверхности пленки, так и на ее границе раздела с кремнием. Так, размер зерен пленки силицида увеличился до 31,7 нм, а величина микрорельефа на границе раздела – до 9,9 нм. Следует отметить, что в этом температурном диапазоне начинает идти и процесс образования слоя PtSi на границе раздела с подложкой, что и приводит к дальнейшему росту толщины пленки силицида.

Повышение температуры БТО до 400 °C вызывает увеличение толщины пленки силицида до 81,3 нм, представляющего из себя двухфазную систему Pt₂Si с PtSi. При этом происходит рост зерен до 33,7 нм и величины микрорельефа на границе раздела PtSi-Si до 10,9 нм. Повышение температуры до 450 °C приводит к полному переходу пленки Pt₂Si в пленку моносилицида платины PtSi. При этом имеет место увеличение толщины пленки силицида до 86,1 нм, размера зерен – до 37,7 нм и микрорельефа на границе – до 11,9 нм.

Проведение БТО при 500 °C практически не приводит к дальнейшему росту толщины пленки, которая составляет 88,6 нм, и остается неизменной при росте температуры БТО до 550 °C. Это свидетельствует о том, что процесс твердофазного синтеза PtSi полностью завершается при температуре 450 °C. При этом размер зерен в данном температурном диапазоне не претерпевает никаких изменений и составляет 33,7 нм, а микрорельеф на границе раздела увеличивается от 13,9 нм при температуре 500 °C до 15,9 нм при температуре 550 °C. Последнее обстоятельство указывает на продолжение процесса растворения кремния в объеме пленки с ростом температуры.

В результате анализа светлопольных ПЭМ-фотографий от пленки Pt на кремнии до и после БТО установлено, что с увеличением температуры БТО происходит сначала отжиг дефектов на межзеренных границах, о чем свидетельствует более четкий контраст зерен, а затем наблюдается рост зерен, что говорит о формировании новой фазы (силицидной). При наличии двух силицидных фаз в образцах на ПЭМ снимках видны зерна разного размера. Контраст изображений при этом размытый. На ПЭМ-фотографиях образцов, прошедших БТО при температурах 500 и 550 °C, где должна быть одна фаза силицида PtSi, обнаружена одна особенность – наличие на крупных зернах большого количества очень мелких образований. Предположительно, этими образованиями могут быть зернышки чистой платины.

Используя вышеприведенные рассуждения по росту Pt₂Si, можно рассчитать, что в случае PtSi на 1 нм металла расходуется 1,32 нм кремния и образуется 1,97 нм данного силицида платины. Следовательно, из пленки платины толщиной 43,7 нм должно образоваться

86,1 нм PtSi. В рассматриваемом случае толщина моносицида платины составила 86,1–88,6 нм, что хорошо согласуется с коэффициентом 1,97 при получении такого силицида с применением традиционной длительной термообработки [5].

Представляет интерес сравнение среднего размера зерен, микрорельефа поверхности PtSi и ее границы раздела с кремнием для двух методов его формирования: с применением БТО и с использованием традиционной длительной термообработки (рис. 2, 3).

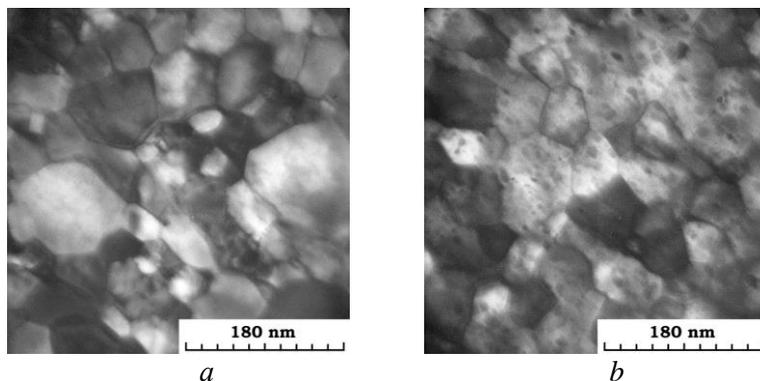


Рис. 2. Светлопольное ПЭМ-изображение пленки Pt на кремнии после длительной термообработки при 550 °С, 30 мин (a) и БТО при 550 °С, 7 с (b)

Fig. 2. Bright-field TEM image of a Pt film on silicon after long-term heat treatment at 550 °C, 30 min (a) and RTT at 550 °C, 7 s (b)

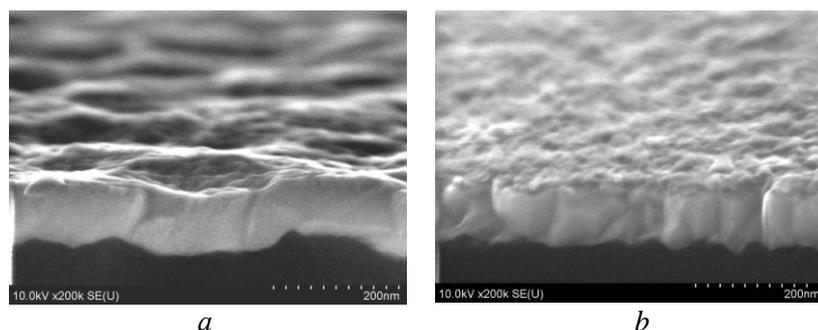


Рис. 3. Сколы структуры Pt-Si после длительной термообработки при 550 °С, 30 мин (a) и БТО при 550 °С, 7 с (b)

Fig. 3. Spall of the Pt-Si structure after long-term heat treatment at 550 °C, 30 min (a) and RTT at 550 °C, 7 s (b)

Для сравнения используется одностадийная длительная термообработка при температуре 550 °С в течение 30 мин в атмосфере азота. Анализ сколов структур после такой обработки показывает значительное увеличение микрорельефа поверхности PtSi и ее границы раздела с кремнием (см. рис. 3, a), который при толщине силицида 81 нм составляет 36,7 нм при размере зерен до 100 нм. Как уже отмечалось, формирование PtSi толщиной 88,6 нм с применением БТО при температуре 550 °С в течение 7 с обеспечивает микрорельеф на границе раздела PtSi-Si не более 15,9 нм, т. е. в 2,5 раза меньший, при среднем размере зерен 37,7 нм, который меньше в 3,1 раза. При этом микрорельеф поверхности силицида значительно менее развит, чем при длительной термообработке, а размер зерен имеет меньший разброс по площади пластины (см. рис. 3, b).

Другой отличительной чертой структуры PtSi, полученной методом БТО, по сравнению со структурой пленки, сформированной путем длительного нагрева системы Pt-Si, является наличие в ней зерен со спрямленными границами и углами в тройных точках, близкими к 120 градусам. Данное обстоятельство обусловлено кратковременностью нагрева. Действительно, рост зерен в пленке PtSi происходит за счет собирательной рекристаллизации под действием неуравновешенных сил поверхностного натяжения, действие которых приводит к спрямлению границы зерен и создает равновесную конфигурацию межзеренных границ в тройных точках. Скорость данного процесса максимальна в начальный момент термообработки и уменьшается по мере упорядочивания структуры. При увеличении времени воздействия температуры

система выходит из равновесного состояния и начинается аномально высокий рост отдельных зерен за счет релаксации сжимающих напряжений, действующих в пленке. Важной особенностью равновесной системы является то, что для выведения ее из этого состояния требуется воздействие на нее температур, значительно превышающих температуру, при которой она была в нее введена. Все это указывает на то, что при БТО образуются пленки PtSi с более равновесной структурой, чем при формировании ее путем длительного воздействия температуры на систему Pt-Si.

Заключение

БТО системы Pt-Si при температуре 550 °С в течение 7 с в атмосфере азота позволяет формировать силицид платины с образованием более равновесной структуры, размер зерен и микрорельеф которой как на поверхности пленки, так и границе ее раздела с кремнием в 3–4 раза меньше, чем при стандартной длительной термообработке.

Список литературы

1. Попов С. Силовые диоды Шоттки. *Электронные компоненты*. 2002;8:77-81.
2. Солодуха В.А., Турцевич А.С., Соловьев Я.А., Комаров Ф.Ф., Мильчанин О.В., Ковалева Т.Б., Гапоненко С.В. Формирование барьеров Шоттки на основе никель-платинового силицидного сплава. *Микроэлектроника*. 2014;43(1):9-16.
3. Мьюрарка Ш.П. Силициды для СБИС. М.: Мир; 1986:176.
4. Комаров Ф.Ф., Мильчанин О.В., Ковалева Т.Б., Солодуха В.А., Соловьев Я.А., Турцевич А.С. Низкотемпературный метод формирования контактного слоя силицида платины для силовых диодов Шоттки. *Доклады НАН Беларуси*. 2013;53(2):38-42.
5. Borisenko V.E., Hesketh P.J. *Rapid Thermal Processing of Semiconductors*. New York-London: Plenum Press; 1997:300.
6. Пилипенко В.А., Пономарь В.Н., Горушко В.А. Управление свойствами тонкопленочных систем с применением импульсной фотонной обработки. *Инженерно-физический журнал*. 2003;76(4):95-98.

References

1. Popov S. [Schottky Power Diodes]. *Jelektronnye komponenty = Electronic Components*. 2002;8:77-81. (In Russ.)
2. Solodukha V.A., Turtsevich A.S., Soloviev Ya.A., Komarov F.F., Milchanin O.V., Kovaleva T.B., Gaponenko S.V. [Formation of Schottky barriers on the basis of the nickel-platinum silicide alloy]. *Mikrojelektronika = Microelectronics*. 2014;43(1):9-16. (In Russ.)
3. Miurarka Sh.P. *Silicides for VLSI*. Moscow:Mir; 1986:176. (In Russ.)
4. Komarov F.F., Milchanin O.V., Kovaleva T.B., Solodukha V.A., Soloviev Ya.A., Turtsevich A.S. [Low temperature method of formation of the contact layer of platinum silicide for the Schottky power diodes]. *Doklady NAN Belarusi = Reports by National Academy of Sciences of Belarus*. 2013;53(2):38-42. (In Russ.)
5. Borisenko V.E., Hesketh P.J. *Rapid Thermal Processing of Semiconductors*. New York-London: Plenum Press; 1997:300.
6. Pilipenko V.A., Ponomar V.N., Gorushko V.A. [Controlling the properties of the thin film systems with application of the pulse foton treatment]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal = Engineering-Physics Journal*. 2003;76(4):95-98. (In Russ.)

Вклад авторов

Солодуха В.А. провел анализ полученных результатов.
Пилипенко В.А. провел исследования по влиянию временных режимов термообработки системы Pt-Si на микрорельеф поверхности и границу раздела с кремнием методом растровой электронной микроскопии.
Комаров Ф. Ф. провел исследования микроструктуры пленки Pt-Si методом ПЭМ.
Горушко В.А. подготовила образцы для проведения исследований.

Authors contribution

Soloduha V.A. conducted an analysis of the results.

Pilipenko V.A. conducted research on the effect of temporary heat treatment regimes of the Pt-Si system on the surface microrelief and the interface with silicon by scanning electron microscopy.

Komarov F.F. conducted a TEM study of the microstructure of the Pt-Si film.

Gorushko V.A. prepared samples for the research.

Сведения об авторах

Солодуха В.А., к.т.н., генеральный директор
ОАО «Интеграл» – управляющая компания
холдинга «Интеграл».

Пилипенко В.А., д.т.н., профессор, член-корр.
НАН Беларуси, заместитель директора по научному
развитию ГЦ «Белмикрoанализ» филиала
НТЦ «Белмикросистемь» ОАО «Интеграл» –
управляющая компания холдинга «Интеграл».

Горушко В.А., ведущий инженер ГЦ «Белмикрoанализ»
филиала НТЦ «Белмикросистемь» ОАО «Интеграл» –
управляющая компания холдинга «Интеграл».

Комаров Ф.Ф., д.ф.-м.н., профессор, член-корр.
НАН Беларуси, заведующий научно-исследовательской
лабораторией НИИ Прикладных физических
проблем им. А. Н. Севченко БГУ.

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Казинца 121А,
ОАО «Интеграл» – управляющая компания
холдинга ОАО «Интеграл»
тел. +375-17-212-37-41;
e-mail: office@bms.by
Пилипенко Владимир Александрович

Information about the authors

Saladukha V.A., PhD, General Manager of
JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing
Company.

Pilipenka U.A., D.Sci, Professor, Corresponding
Member of the NAS of Belarus, Deputy Director for
Science Research of the State Centre “Belmicroanalysis”
Affiliate RDC “Belmicrosystems” of JSC “Integral” –
“Integral” Holding Managing Company.

Harushka V.A., Leading Engineer of the State Centre
“Belmicroanalysis” Affiliate RDC “Belmicrosystems”
of JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company.

Komarov F.F., D.Sci, Professor, Corresponding Member of
NAS of Belarus, Head of the scientific-research
laboratory of the Research Institute for the Applied
Physical Problems named after A. N. Sevchenko BSU.

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Kazintsa str., 121A,
JSC “Integral” –
“Integral” Holding Managing Company
tel. +375-17-212-37-41;
e-mail: office@bms.by
Pilipenko Vladimir Aleksandrovich

