
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит два раза в квартал

Научный журнал издается с января 2003 года

*Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации № 1087 от 23.01.2010 г.*

Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований,
включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Главный редактор

Вадим Анатольевич Богуш

Ректор Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

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,
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

Федосюк В.М. Корреляция состава, аспектного соотношения и магнитосопротивления многослойных микро- и нанопроволок типа «ферромагнетик/диамагнетик».....	5
Гурский Л.И., Каланда Н.А., Ярмолич М.В., Петров А.В., Голосов Д.А., Киросирова М.В., Игнатенко О.В., Желудкевич А.Л. Сравнительный анализ изменения кислородной нестехиометрии и сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo в ферромолибдате стронция.....	14
Ломако А.А., Станчик В.В., Литвинович Г.С., Бручковский И.И., Беляев Б.И., Беляев М.Ю. Метод прогнозирования углов ориентации научной аппаратуры при съемке с борта Международной космической станции с использованием платформы наведения ..	22

Садик Б.Д.С., Цветков В.Ю., Бобов М.Н. Адаптивное комбинированное кодирование изображений с прогнозированием объема арифметического кода	31
Охрименко И.П., Петров П.В., Кольчевский Н.Н. Зависимость детектируемого сигнала от кинематических параметров спутника в космической системе S-LIGO-E2R	41
Козлов С.В., Ле Ван Кыонг. Модель и базовый алгоритм длительного когерентного накопления отраженного сигнала при ненулевых высших производных дальности до радиолокационной цели	50
Mukha V.S., Kako N.F. Total probability formula for vector Gaussian distributions.....	59
Пузанов А.Д., Нефёдов Д.С. Синтез алгоритма обнаружения беспилотных летательных аппаратов по акустическим шумам.....	65
Зяц П.В., Малевич И.Ю. Повышение помехозащищенности радиоприемных трактов с автоматической регулировкой чувствительности	74
Герман О.В., Кузнецов М.В. Количественная оценка нечетких антикризисных управлений	83
Бубнов Я.В., Иванов Н.Н. Обнаружение DGA доменов и предотвращение botnet средствами Q-обучения для POMDP	91
Кураев А.А., Матвеев В.В. Клилотрон на открытом резонаторе с симметричными коническими гофрированными зеркалами – горатрон.....	100

Корректурa и верстка Л.В. КОНДАКОВА
Компьютерный дизайн О.В. БОЙПРАВ, Т.В. МИРОНЕНКО

Подписано в печать 22.03.2021. Формат 60×84 ¼. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 12,79. Уч.-изд. л. 11,0. Тираж 100 экз. Заказ 39.

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.

DOKLADY BGUIR

Published twice quarterly

The journal has been published since January, 2003

The journal was registered on January 23, 2010 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus in the State Registry of Mass Media, reg. No. 1087.

The journal included in the List of Journal for Publication of the Results of Dissertation Researches in the Republic of Belarus and in the Database of Russian Science Citation Index (RSCI)

Editor-In-Chief

Vadim Anatol'evich Bogush

Rector of the Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

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

Fedosyuk V.M. Correlation of composition, aspect ratio and magnetic resistance of multilayer micro- and nanowires of the "ferromagnetic/diamagnetic" type	5
Hurski L.I., Kalanda N.A., Yarmolich M.V., Petrov A.V., Golosov D.A., Kiroshirova M.V., Ignatenko O.V., Zhaludkevich A.L. Comparative analysis of the change of oxygen nonstoichiometry and superstructural ordering of Fe/Mo cations in the strontium ferromolybdate	14
Lamaka A.A., Stanchyk V.V., Litvinovich H.S., Bruchkousky I.I., Belyaev B.I., Belyaev M.Y. Method for orientation angles forecasting of optical instruments from the International Space Station with orientation platform	22
Sadiq B.J.S., Tsviatkou V.Yu., Bobov M.N. Adaptive combined image coding with prediction of arithmetic code volume	31
Ohrymenko I.P., Petrov P.V., Kolchevsky N.N. Dependence of the detected signal on the kinematic parameters of the satellite in the S-LIGO-E2R space system	41
Kozlov S.V., Le Van Cuong. Model and long-term coherent accumulation basic algorithm for the reflected signal with non-zero higher derivative range to radar target	50
Mukha V.S., Kako N.F. Total probability formula for vector Gaussian distributions	59
Puzanau A.D., Nefedov D.S. Synthesis of algorithm of unmanned aerial vehicle detection by acoustic noise	65

Zayats P.V., Malevich I.Yu. Increasing the noise immunity of radio receiving paths with automatic sensitivity control	74
German O.V., Kuznetsov M.V. Quantitative estimation of fuzzy crisis management	83
Bubnov Y.V., Ivanov N.N. DGA domain detection and botnet prevention using Q-learning for POMDP	91
Kurayev A.A., Matveyenka V.V. Klynotron with using the open resonator and symmetric conical corrugated mirrors – goratron.....	100



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-2-5-13>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 537.9, 537.633.9

КОРРЕЛЯЦИЯ СОСТАВА, АСПЕКТНОГО СООТНОШЕНИЯ И МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ МИКРО- И НАНОПРОВОЛОК ТИПА «ФЕРРОМАГНЕТИК/ДИАМАГНЕТИК»

В.М. ФЕДОСЮК

*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 26 января 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. В работе представлены результаты исследования коэффициента гигантского магнитосопротивления (ГМС) в многослойных микро- и нанопроволоках, состоящих из последовательно расположенных ферромагнитных (Co, CoNi и NiFe) и диамагнитных (Cu) слоев. Образцы были получены методом электрохимического осаждения в поры матриц. В качестве матриц был использован оксид алюминия. Для установления влияния аспектного соотношения были использованы матрицы двух типов: с диаметром пор 8 мкм и 170–200 нм и варьируемой толщиной от 10 до 60 мкм. Исследования коэффициента ГМС были выполнены путем измерения вольт-амперных характеристик во внешних магнитных полях до 130 мТл. При использовании матриц I-типа (диаметр пор 8 мкм) отмечен положительный коэффициент ГМС (увеличение электросопротивления во внешнем магнитном поле), в то время как при использовании матриц II-типа (диаметр пор 170–200 нм) отмечен отрицательный коэффициент ГМС (уменьшение электросопротивления во внешнем магнитном поле). Это обусловлено усилением взаимодействий спин-поляризованных электронов в магнитных слоях через слой меди посредством РККИ-обмена при увеличении аспектного соотношения. Отмечено значительное влияние состава ферромагнитного слоя (Co, CoNi и NiFe) на величину коэффициента ГМС. Максимальное значение отрицательного коэффициента ГМС (до –27,5 %) было отмечено для системы нанопроволок на основе CoNi. Использование многослойных микро- и нанопроволок, электролитически осажденных в матрицы из оксида алюминия с возможностью контролирования коэффициентов ГМС открывает перспективны использования данных объектов в качестве чувствительных элементов (датчиков) постоянного магнитного поля, а также устройств хранения магнитной информации с вертикальным принципом.

Ключевые слова: микро- и нанопроволоки, многослойные структуры, матрицы, электрохимическое осаждение, магнитосопротивление.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Федосюк В.М. Корреляция состава, аспектного соотношения и магнитосопротивления многослойных микро- и нанопроволок типа «ферромагнетик/диамагнетик». Доклады БГУИР. 2021; 19(2): 5-13.

CORRELATION OF COMPOSITION, ASPECT RATIO AND MAGNETIC RESISTANCE OF MULTILAYER MICRO- AND NANOWIRES OF THE “FERROMAGNETIC/DIAMAGNETIC” TYPE

VALERY M. FEDOSYUK

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

Submitted 26 January 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The results of study of the giant magnetoresistance coefficient (GMR) in multilayer micro- and nanowires based on successively alternating ferromagnetic (Co, CoNi and NiFe) and diamagnetic (Cu) layers are presented in the paper. The samples were obtained by electrochemical deposition into the matrix pores. Aluminum oxide was used as matrices. To establish the influence of the aspect ratio, matrices of two types were used: with a pore diameter of 8 μm and 170–200 nm and a variable thickness from 10 to 60 μm . Investigations of the GMR coefficient were carried out by measuring the current-voltage characteristics in external magnetic fields up to 130 mT. When using type I matrices (pore diameter 8 μm), a positive GMR coefficient (an increase in electrical resistivity in an external magnetic field) was noted, while when using type II matrices (pore diameter 170–200 nm), a negative GMR coefficient was established (a decrease in electrical resistance in an external magnetic field). This is due to the enhancement of the interactions of spin-polarized electrons in the magnetic layers through the copper layer through the RKKY exchange with an increase in the aspect ratio. A significant effect of the composition of the ferromagnetic layer (Co, CoNi, and NiFe) on the value of the GMR coefficient is noted. The maximum value of the negative GMR coefficient (up to -27.5%) was established for the CoNi-based nanowire system. The use of multilayer micro- and nanowires, electrolytically deposited in a matrix of aluminum oxide with the ability to control the GMR coefficients, opens up perspective use of these objects as sensitive elements (sensors) of a constant magnetic field, as well as devices for storing magnetic information with a vertical principle.

Keywords: micro- and nanowires, multilayer structures, matrices, electrochemical deposition, magnetoresistance.

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

For citation. Fedosyuk V.M. Correlation of composition, aspect ratio and magnetic resistance of multilayer micro- and nanowires of the “ferromagnetic/diamagnetic” type. Doklady BGUIR. 2021; 19(2): 5-13.

Введение

На протяжении длительного времени значительный интерес многих исследователей прикован к материалам на основе наноструктурированных магнитных материалов, таких как многослойные наноструктурированные пленки [1], квазиодномерные объекты типа нанопроволок и микропроводов [2, 3]. Интерес многих исследователей обусловлен важной научной и практической значимостью данных объектов исследований [4–6]. Многие исследователи отмечают, что наноразмерные многослойные металлические структуры характеризуются эффектом гигантского магнитосопротивления (эффект ГМС). Эффект ГМС проявляется в резком снижении электрического сопротивления многослойной пленочной структуры (или гранулированных композиционных пленок), состоящих из последовательно расположенных слоев с различными магнитными и электрическими свойствами, в условиях воздействия постоянного магнитного поля [7, 8]. Коэффициент ГМС может быть определен с использованием нескольких формул.

Один из подходов заключается в представлении отношения изменения электрического сопротивления к сопротивлению в состоянии насыщения $\Delta R/R_{\text{нас}}$:
$$\frac{\Delta R}{R_{\text{нас}}} = \frac{R(H) - R_{\text{нас}}}{R_{\text{нас}}} \cdot 100\% ,$$

где $R(H)$ – сопротивление в зависимости от приложенного поля H , $R_{\text{нас}}$ – сопротивление в состоянии магнитного насыщения или сопротивление в максимальном поле, если образец полностью не насыщается. Другое определение, также часто используемое на практике, состоит в нормировке сопротивления к его значению при нулевом внешнем поле (R_0). Оно

определяется следующим образом: $\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R(H) - R_0}{R_0} \cdot 100\%$. Эти два представления связаны

друг с другом соотношением $\Delta R / R_{\text{нас}} = \frac{(\Delta R / R_0)}{(\Delta R / R_0) - 1}$.

Большинство экспериментаторов предпочитают пользоваться первым определением, поскольку сопротивление при нулевом поле, как правило, зависит от предыстории образца. Снижение электрического сопротивления связано с магнитным упорядочением в соседних ферромагнитных слоях (изменение с антипараллельного на параллельное упорядочение) под действием магнитного поля. При протекании электрического тока в плоскости слоев (current-in-plane или СІР ГМС) перенос заряда в основном имеет диффузионный характер, и ГМС можно рассматривать как результат спин-зависимого рассеяния на магнитных примесях, расположенных на границах раздела. При пропускании тока перпендикулярно плоскости слоев (current-perpendicular-plane или СРР ГМС) [9], электроны проводимости пересекают все слои, и зонная структура материалов, составляющих многослойную структуру, является крайне важной [10].

В квазиодномерных нанообъектах (нанопроволоки) [11] теоретически предсказана возможность наблюдения больших значений коэффициента гигантского магнитосопротивления, гораздо больших по сравнению с двумерными наноструктурами (пленки). Следует отметить, что значительные величины коэффициента ГМС в нанопроволоках могут быть отмечены в геометрии СРР. Именно при этой конфигурации реализуется рассеяние практически всех носителей заряда на границах ферромагнитных и диамагнитных слоев.

Главное затруднение при исследованиях нанопроволок в конфигурации СРР – детектирование относительного изменения удельного электрического сопротивления в постоянном магнитном поле. Так, для планарного образца с перпендикулярно ориентированными многослойными нанопроволоками с размером в плоскости $1 \times 1 \text{ см}^2$ и толщиной 10 мкм (длина нанопроволок) с удельным сопротивлением $\rho \sim 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, сопротивление в случае, когда ток протекает параллельно слоям (СІР), оказывается равным

$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{\rho \cdot 10^{-2}}{10^{-2} \cdot 10^{-6}} \approx \rho \cdot 10^6 = 10^{-2} \text{ Ом}$. Однако для того же образца в геометрии СРР

$R = \rho \frac{10^{-6}}{10^{-2} \cdot 10^{-2}} \approx \rho \cdot 10^{-2} = 10^{-10} \text{ Ом}$.

Сопротивление в последнем случае (СРР) почти на восемь порядков меньше, чем в случае СІР. Измерение очень малого сопротивления сопряжено с большими техническими трудностями. Для решения этой задачи требуется получать образцы с малой площадью поперечного сечения и большой толщиной. Поэтому для измерения СРР ГМС образцы должны состоять из большого числа слоев с очень малой площадью поперечного сечения. Это можно реализовать, получая образцы в виде нанопроволок методом электрохимического осаждения. И чем больше отношение длины к поперечному размеру, тем легче осуществляется измерение сопротивления образца.

Нанопроволоки, синтезированные в виде последовательно расположенных ферромагнитных структур в порах матриц, могут быть хорошим модельным объектом для объяснения природы магнитных, электрических и магнитотранспортных явлений в наноструктурированных квазиодномерных системах [11–13]. Данные системы имеют значительный потенциал для практического использования в качестве чувствительных элементов датчиков постоянных магнитных полей, устройств хранения магнитной информации с вертикальным типом записи. Следует отметить два наиболее важных параметра, влияющих на величину магнитосопротивления: 1. качество интерфейсов на границе раздела слоев; 2. соотношение линейных параметров нанопроволок (длина/диаметр) или аспектное соотношение.

Методика эксперимента

Образцы многослойных микро- и нанопроволок типа «ферромагнетик/диамагнетик» были синтезированы методом электрохимического осаждения ферромагнитных (Co, CoNi, NiFe) и диамагнитных (Cu) слоев в поры матриц. В качестве матриц были использованы образцы анодированного оксида алюминия двух типов: I-тип с диаметром пор 8 мкм (рис. 1, *a*) и II-тип с диаметром пор 170–200 нм (рис. 1, *b*).

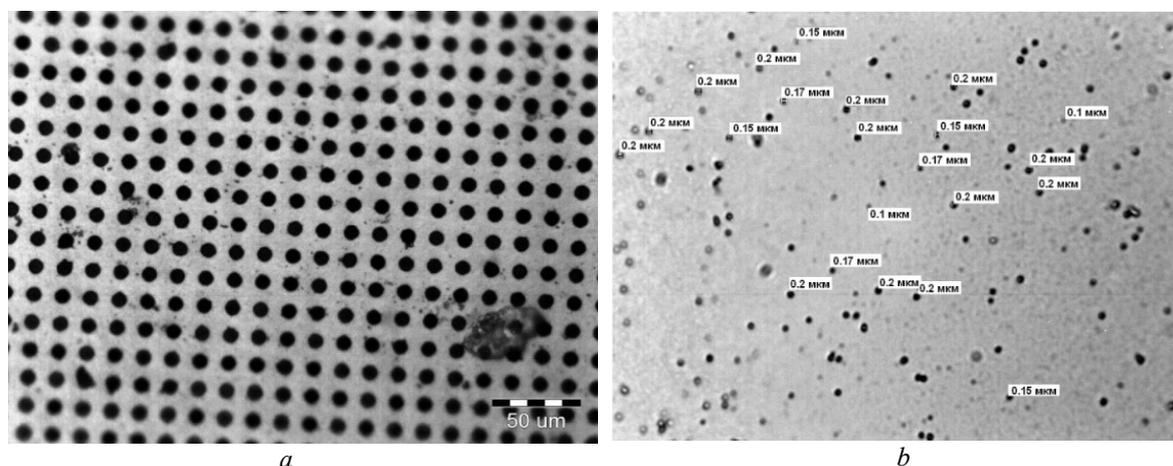


Рис. 1. Изображения поверхности матриц I-типа (*a*) и II-типа (*b*)
Fig. 1. Surface images of type I (*a*) and type II matrices (*b*)

Толщина матрицы (длина проволоки) варьировалась от 10 до 60 мкм. Толщины ферромагнитных слоев были фиксированными (25 нм), а толщина диамагнитного слоя составляла 3 нм.

Состав электролита и режимы получения многослойных микро- и нанопроволок для системы Co/Cu: $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 100; H_3BO_3 – 30; $\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 2–2,5; $\text{pH} = 4,2\text{--}4,5$; $T = 50\text{--}60$ °C; $\varphi_{\text{Co}} = -1,0 \dots 1,2$ В; $\varphi_{\text{Cu}} = -0,3 \dots 0,4$ В. При изменении времени осаждения магнитных и немагнитных слоев в пределах $\tau_{\text{NiCo}} = (0,5\text{--}10)$ с и $\tau_{\text{Cu}} = (5\text{--}100)$ с толщина магнитных слоев составляет 25–200 Å, медных слоев – 20–500 Å.

Состав электролита и режимы получения многослойных микро- и нанопроволок для системы CoNi/Cu: $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 280; $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 30; $\text{NiCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – 10; H_3BO_3 – 30; сахарин – 0,8; $\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 2–4; $\text{pH} = 2,4\text{--}2,6$; $T = 50\text{--}60$ °C; $\varphi_{\text{CoNi}} = -1,2 \dots 1,5$ В; $\varphi_{\text{Cu}} = -0,3 \dots 0,4$ В. Время осаждения магнитных слоев (τ_{NiCo}) и меди (τ_{Cu}) изменялось в интервалах (0,5–10) с и (5–100) с соответственно, что позволяло варьировать толщины слоев в пределах $d_{\text{NiCo}} = 25\text{--}200$ Å, $d_{\text{Cu}} = 20\text{--}500$ Å.

Состав электролита и режимы получения многослойных микро- и нанопроволок для системы NiFe/Cu: $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 210; $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 15; $\text{NiCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – 20; H_3BO_3 – 30; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 60; сахарин – 1; сегнетова соль (тарtrat натрия калия) – 30; $\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,5–2; $\text{pH} = 2,2\text{--}2,5$; $T = 25\text{--}35$ °C; $\varphi_{\text{NiFe}} = -1,0 \dots 1,2$ В; $\varphi_{\text{Cu}} = -0,3\text{--}0,4$ В; $\tau_{\text{NiFe}} = (0,5\text{--}10)$ с; $\tau_{\text{Cu}} = (5\text{--}100)$ с. При этом в полученных структурах толщины слоев варьировались в пределах $d_{\text{NiFe}} = 25\text{--}200$ Å, $d_{\text{Cu}} = 20\text{--}500$ Å.

Коэффициенты ГМС были определены с помощью измерительного комплекса (рис. 2) на базе программно-аппаратного комплекса ИППП-1/6, совмещенного с магнитопроводом рупорного типа, управляемого персональным компьютером в диапазоне напряжений до 2 В и магнитных полей до ± 130 мТл. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводились двухконтактным методом при фиксированных значениях магнитных полей 20, 40, 55, 75, 95, 110, 120, 130 мТл во взаимно противоположных направлениях. Магнитное поле прикладывалось перпендикулярно оси проволоки (направление магнитного поля перпендикулярно направлению тока). При каждом значении поля снималась ВАХ, а при расчете сопротивления принималась ее линейная часть.



Рис. 2. Измерительный комплекс для определения коэффициента ГМС
Fig. 2. Measuring system for determining the GMR coefficient

Расчет коэффициентов ГМС проводился по формуле $MR = (R_B - R_0) / R_B \cdot 100 \%$, где MR – величина магнитосопротивления (коэффициент, выраженный в процентах); R_B – электрическое сопротивление нанопроволок во внешнем магнитном поле, Ом; R_0 – электрическое сопротивление нанопроволок без магнитного поля, Ом.

Были сформированы две партии образцов микро- и нанопроволок.

Партия 1 – микропроволоки в порах матриц I-типа (MI – диаметр пор 8 мкм) с толщиной матриц 60 мкм (d60). В качестве ферромагнитного слоя были использованы слои Co (C), CoNi (CN) и NiFe (NF) с толщинами 25 нм. Толщина диамагнитного слоя была фиксирована – 3 нм.

Партия 1 (микропроволоки) – система на основе Co-MI-d60-CNC₃; система на основе CoNi-MI-d60-CNC₃; система на основе NiFe-MI-d60-NFC₃.

Партия 2 (нанопроволоки) – в порах матриц II-типа (MII – диаметр пор 170–200 нм) с толщиной матриц 10–60 мкм (d10–d60). В качестве ферромагнитного слоя были использованы слои Co (C) и CoNi (CN) с толщинами 25 нм. Толщины диамагнитного слоя составляли 3–5–12 нм.

Партия 2 – система на основе Co-MII-d10-CC₃; система на основе CoNi-MII-d10-CNC₃; система на основе CoNi-MII-d20-CNC₃; система на основе CoNi-MII-d40-CNC₃; система на основе CoNi-MII-d60-CNC₃.

Результаты и обсуждение

Результаты исследования образцов из партии 1 (микропроволоки). В многослойных гранулированных структурах Co/Cu и CoNi/Cu имеет место разбавление отдельных магнитных слоев примесными элементами до 5–6 ат. % Cu, в то время как в слоях меди примеси кобальта и никеля не обнаружены. При осаждении многослойных структур системы NiFe/Cu в слоях меди зафиксировано незначительное количество примеси железа – до 0,4 ат. %.

В многослойных микропроводах CoNi/Cu с толщинами слоев меди 3 нм – MI-d60-CNC₃ отмечено равномерное и однородное заростание пор матрицы. Интерфейс раздела между диамагнитными Cu и ферромагнитными CoNi не разрешаются. На рис. 3 представлена полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MI-d60-CNC₃. По данным химического анализа, четко разрешается зона подслоя Ni и зона сплава CoNi. Измерены полевые зависимости электросопротивления образцов при комнатной температуре в интервалах полей до 130 мТл.

Ветви полевой зависимости являются симметричными. Отмечен положительный характер магнитосопротивления (увеличение электросопротивления во внешних магнитных полях). Максимальное значение положительного коэффициента магнитосопротивления достигает порядка 1 % в полях свыше 40 мТл. Основной вклад в увеличение сопротивления вносит рассеяние спин-поляризованных электронов в диамагнитных слоях меди.

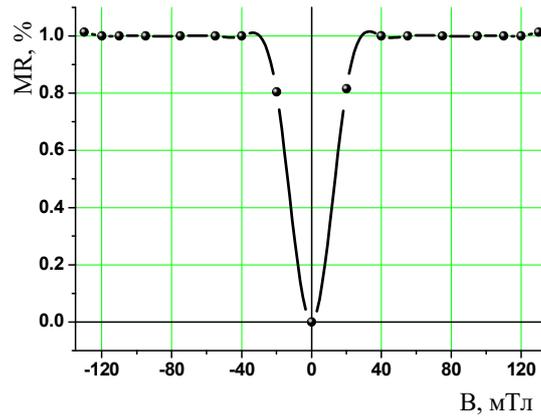


Рис. 3. Полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MI-d60-CNC₃
Fig. 3. Field dependence of the GMR coefficient for sample MI-d60-CNC₃

На рис. 4 представлена полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MI-d60-CC₃. Для образца на основе Co-MI-d60-CC₃, как и в случае с образцом на основе слоев CoNi, осажденных в матрицы ААО I-типа, отмечена симметричность положительной и отрицательной ветвей на графике полевой зависимости ГМС (рис. 4). Коэффициент ГМС также является положительным. Однако увеличение сопротивления носит ступенчатый характер. Наиболее резкое изменение сопротивления отмечено в полях до 20 мТл. Максимальный коэффициент составляет 2,2 % в полях 130 мТл. Природа магнитосопротивления данного образца также обусловлена рассеянием спин-поляризованных носителей заряда в диамагнитной прослойке меди.

На рис. 5 представлена полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MI-d60-NFC₃. Для образца на основе NiFe – MI-d60-NFC₃, как и в случае с образцами на основе слоев Co и CoNi, осажденных в матрицы ААО I-типа, отмечена симметричность положительной и отрицательной ветвей на графике полевой зависимости ГМС (рис. 5). Коэффициент ГМС также является положительным. Однако увеличение сопротивления носит практически линейный характер. Наиболее резкое изменение сопротивления отмечено в полях до 20 мТл. Максимальный коэффициент составляет порядка 3 % в полях 130 мТл. Природа магнитосопротивления данного образца также обусловлена рассеянием спин-поляризованных носителей заряда в диамагнитной прослойке меди.

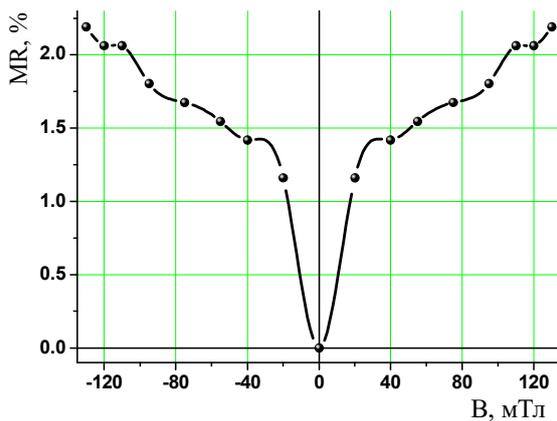


Рис. 4. Полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MI-d60-CC₃
Fig. 4. Field dependence of the GMR coefficient for sample MI-d60-CC₃

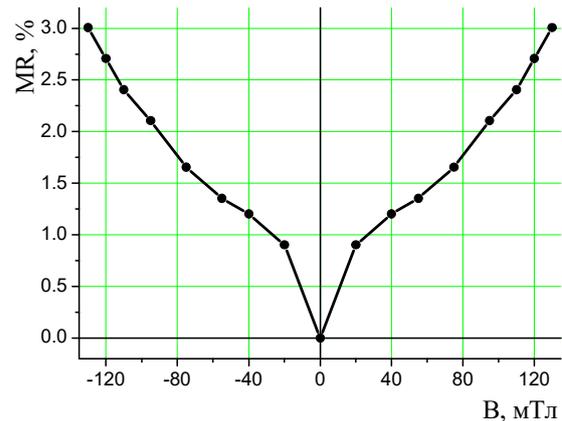


Рис. 5. Полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MI-d60-NFC₃
Fig. 5. Field dependence of the GMR coefficient for sample MI-d60-NFC₃

В результате исследований образцов, синтезированных в порах матриц I-типа, можно отметить увеличение удельного электрического сопротивления в постоянном магнитном поле. Таким образом, отмечен эффект положительного ГМС.

Минимальное значение коэффициента ГМС (порядка 1 %) наблюдается для образца на основе системы CoNi – MI-d60-CNC₃, в то время как максимальное значение коэффициента ГМС (порядка 3 %) наблюдается для образца на основе NiFe – MI-d60-NFC₃.

Результаты исследования образцов из партии 2. На рис. 6, 7 представлены полевые зависимости коэффициентов ГМС для образцов на основе Co (рис. 6) и CoNi (рис. 7) в матрицах с толщиной 10 мкм и диаметром пор 170–200 нм.

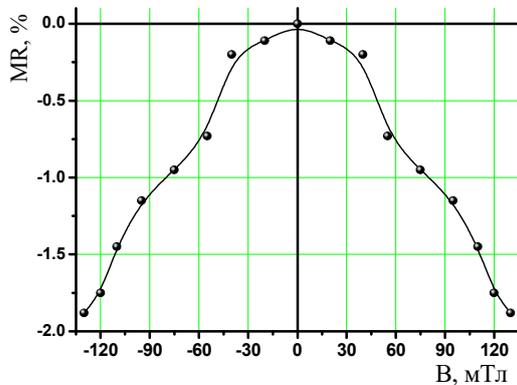


Рис. 6. Полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MII-d10-CC₃
Fig. 6. Field dependence of the GMR coefficient for sample MII-d10-CC₃

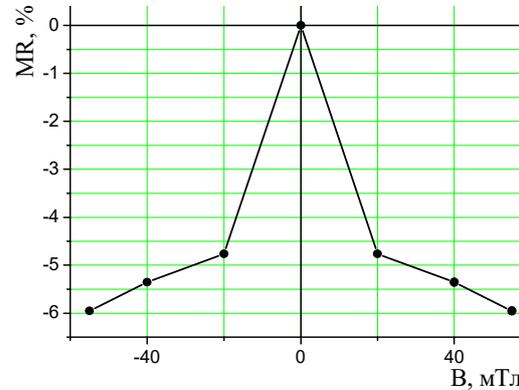


Рис. 7. Полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MII-d10-CNC₃
Fig. 7. Field dependence of the GMR coefficient for sample MII-d10-CNC₃

Характерно изменение знака коэффициента ГМС для образцов в матрицах II-типа на отрицательный по сравнению с положительными коэффициентами ГМС (характерное для образцов в матрицах I-типа). Ветви отрицательной и положительной части являются симметричными и характеризуются линейной зависимостью для образца на основе Co-MII-d10-CC₃ (рис. 6). Максимальный коэффициент магнитосопротивления (в поле 130 мТл) составляет –1,88 %. Однако для образца MII-d10-CNC₃ отмечена нелинейность (рис. 7). Наиболее резкое изменение коэффициента ГМС отмечено в полях до 20 мТл. Максимальный коэффициент магнитосопротивления (в поле 50 мТл) составляет –5,99 %. Таким образом, можно отметить увеличение коэффициента ГМС практически в 3 раза для образцов нанопроволок в матрицах II-типа при использовании в качестве ферромагнитных слоев CoNi вместо Co.

При увеличении толщины матрицы от 10 мкм до 20, 40 и 60 мкм с фиксированным диаметром пор (170–200 нм) увеличивается аспектное соотношение. При увеличении аспектного соотношения теоретически должен увеличиваться коэффициент ГМС. На рис. 8–10 представлены полевые зависимости коэффициента ГМС для образцов на основе CoNi с толщиной матрицы 20 мкм – MII-d20-CNC₃ (рис. 8), 40 мкм – MII-d40-CNC₃ (рис. 9) и 60 мкм – MII-d40-CNC₃ (рис. 10). При увеличении аспектного отношения значение отрицательного коэффициента ГМС увеличивается до –13,2, –15,3 и –27,5 % для толщин матриц 20, 40 и 60 мкм соответственно.

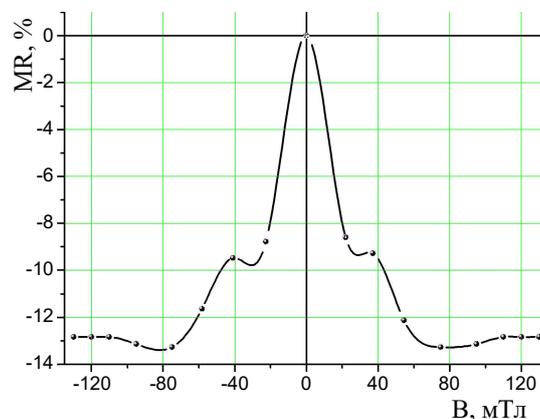


Рис. 8. Полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MII-d20-CNC₃
Fig. 8. Field dependence of the GMR coefficient for sample MII-d20-CNC₃

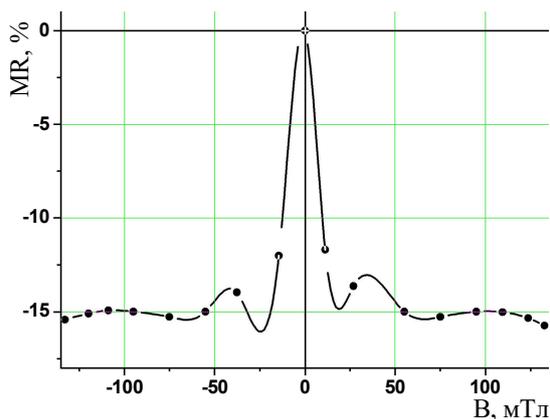


Рис. 9. Полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MII-d40-CNC₃
Fig. 9. Field dependence of the GMR coefficient for sample MII-d40-CNC₃

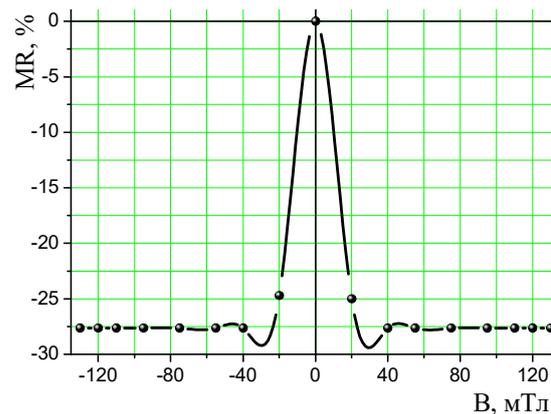


Рис. 10. Полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MII-d60-CNC₃
Fig. 10. Field dependence of the GMR coefficient for sample MII-d60-CNC₃

Заклучение

Синтезированы многослойные микро- и нанопроволоки на основе чередующихся слоев ферромагнитного материала (Co, CoNi и NiFe) и диамагнитного материала (Cu). Синтез был проведен методом электрохимического осаждения в поры оксида алюминия. Были использованы матрицы двух типов: с диаметром пор 8 мкм (тип I) и 170–200 нм (тип II). Толщины ферромагнитных и диамагнитных слоев были фиксированными – 25 и 3 нм соответственно.

Исследования коэффициентов ГМС были проведены путем измерения ВАХ во внешних магнитных полях до 130 мТл. Толщины матриц, определяющие аспектное соотношение, варьировались от 10 до 60 мкм. Процесс формирования многослойных структур с контролируемыми толщинами и составом на основе Co/Cu и CoNi/Cu и NiFe/Cu в матрицах протекает равномерно, степень заполнения пор близка к 100 %, заполнение осуществляется сферическими зернами с размерами, зависящими от диаметра пор в матрицах. После завершения процесса заполнения на поверхности матрицы образуется сплошная пленка соответствующего металла.

Показано, что образцы в матрицах I-типа на основе Co/Cu и CoNi/Cu и NiFe/Cu характеризуются положительным коэффициентом ГМС (от 1 до 3 %), в то время как использование матриц II-типа (с диаметром пор 170–200 нм) приводит к изменению знака коэффициента ГМС на отрицательный. Таким образом, установлено влияние диаметра пор (при переходе от микрометрового до наноразмерного диаметра пор) на коэффициент ГМС. Коэффициент отрицательного магнитосопротивления в системе CoNi/Cu выше по сравнению с системой Co/Cu при осаждении в матрицы с толщиной 10 мкм (различие практически в 3 раза).

Увеличение толщины матрицы от 10 до 60 мкм (что соответствует длине нанопроволок) при фиксированном диаметре пор (до 200 нм) приводит к увеличению ГМС от –5,99 (для 10 мкм) до –27,5 (для 60 мкм) и от –3,13 % (при толщине матрицы 13,5 мкм) до –27,5 % (при толщине 57–60 мкм) в нанопроволоках системы CoNi/Cu. Таким образом, установлено влияние аспектного соотношения в исследуемых нанопроволоках. Это обусловлено усилением взаимодействий спин-поляризованных электронов в магнитных слоях через слой меди посредством РККИ-обмена при увеличении аспектного соотношения.

Список литературы / References

1. Sanvito S., Lambert C.J., Jefferson J.H. GMR in 3d, 4d and 5d transition metals multilayers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1999;196-197:101-103. DOI:10.1016/S0304-8853(98)00677-5.
2. Posth O., Hassel C., Spasova M., Dumpich G., Lindner J., Mangin S. Influence of growth parameters on the perpendicular magnetic anisotropy of [Co/Ni] multilayers and its temperature dependence. *Journal of Applied Physics*. 2009;106(2):23919. DOI:10.1063/1.3176901.
3. Hassel C., Römer F.M., Meckenstock R., Dumpich G., Lindner J. Magnetization reversal in epitaxial Fe nanowires on GaAs(110). *Physical Review B*. 2008;77(22): 224439. DOI:10.1103/PhysRevB.77.224439.
4. Moser A., Takano K., Margulies D. T., Albrecht M., Sonobe Y., Ikeda Y., Sun S., Fullerton E.E. Magnetic recording: advancing into the future. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2002;35(19): R157–R167. DOI:10.1088/0022-3727/35/19/201.
5. Battle X., Labarta A. Finite-size effects in fine particles: magnetic and transport properties. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2002;35(6): R15–R42. DOI:10.1088/0022-3727/35/6/201.
6. Suzdalev I.P., Suzdalev P.I. Nanoclusters and nanocluster systems. Assembling, interactions and properties. *Russian Chemical Reviews*. 2001;70(3):177-210. DOI:10.1070/RC2001v070n03ABEH000627.
7. Baibich M.N., Broto J.M., Fert A., Van Dau F.N., Petroff F., Etienne P., Creuzet G., Friederich A., Chazelas J. Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices. *Physical Review Letters*. 1988;61(21):2472-2475. DOI:10.1103/PhysRevLett.61.2472.
8. Binash G., Grünberg P., Saurenbach F., Zinn W. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange. *Physical Review B*. 1989;39(7):4828-4830. DOI:10.1103/PhysRevB.39.4828.
9. Pratt W.P., Lee S.-F., Slaughter J.M., Loloee R., Schroeder P.A., Bass J. Perpendicular giant magnetoresistances of Ag/Co multilayers. *Physical Review Letters*. 1991;66(23):3060-3063. DOI:10.1103/PhysRevLett.66.3060.
10. Gijs M.A.M., Bauer G.E.W. Perpendicular giant magnetoresistance of magnetic multilayers. *Advances in Physics*. 1997;46(3-4):285-445. DOI:10.1080/00018739700101518.
11. Nasirpour F., Southern P., Ghorbani M., Irajizad A., Schwarzacher W. GMR in multilayered nanowires electrodeposited in track-etched polyester and polycarbonate membranes. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007;308(1):35-39. DOI:10.1016/j.jmmm.2006.04.035.
12. Schwarzacher W., Attenborough K., Michel A., Nabiyouni G., Meier J.P. Electrodeposited nanostructures. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1997;165(1):23-29. DOI:10.1016/S0304-8853(96)00465-9.
13. Evans P.R., Yi G., Schwarzacher W. Current perpendicular to plane giant magnetoresistance of multilayered nanowires electrodeposited in anodic aluminum oxide membranes. *Applied Physics Letters*. 2000;76(4):481-483. DOI:10.1063/1.125794.

Сведения об авторе

Федосюк В.М., д.ф.-м.н., профессор, член-кор.
НАН Беларуси, генеральный директор Научно-
практического центра Национальной академии
наук Беларуси.

Information about the author

Fedosyuk V.M., D.Sc., Professor, Corresponding
Member of NAS of Belarus, General Director
of the Scientific-Practical Materials Research Centre
of NAS of Belarus.

Адрес для корреспонденции

220072, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 19,
Научно-практический центр
Национальной академии наук Беларуси;
тел. +375-17-322-27-91;
e-mail: podvornaya@bsuir.by
Федосюк Валерий Михайлович

Address for correspondence

220072, Republic of Belarus
Minsk, P. Brovki str., 19,
Scientific-Practical Materials Research
Centre of NAS of Belarus;
tel. +375-17-322-27-91;
e-mail: podvornaya@bsuir.by
Fedosyuk Valery Mikhailovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-2-14-21>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 538.9: 539.264: 548.4

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ КИСЛОРОДНОЙ НЕСТЕХИОМЕТРИИ И СВЕРХСТРУКТУРНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ КАТИОНОВ Fe/Mo В ФЕРРОМОЛИБДАТЕ СТРОНЦИЯ

Л.И. ГУРСКИЙ¹, Н.А. КАЛАНДА², М.В. ЯРМОЛИЧ², А.В. ПЕТРОВ², Д.А. ГОЛОСОВ¹,
М.В. КИРОСИРОВА³, О.В. ИГНАТЕНКО², А.Л. ЖЕЛУДКЕВИЧ²

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

²Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (г. Минск,
Республика Беларусь)

³Государственный центр «Белмикрoанализ» ОАО «Интеграл» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 22 июня 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Однофазные образцы $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ без сверхструктурного упорядочения катионов железа и молибдена (P) с температурой Кюри 407 К были получены твердофазным методом. Согласно данным рентгеноструктурного анализа, динамика роста степени параметра P носит нелинейный характер. При этом процесс достижения максимальных значений параметра P ($P_{\text{макс}}$) длителен и его скорость в несколько раз ниже, чем скорость изменения кислородного индекса $6-\delta$. Обнаружено, что с увеличением температуры изотермического отжига величина P растет и достигает максимальных значений 88 % при $T = 1320$ К в течение 120 ч, $P_{\text{макс}} = 92$ % при $T = 1420$ К в течение 100 ч, тогда как $P_{\text{макс}} = 90$ % при $T = 1470$ К в течение 45 ч. Можно предположить, что более низкие значения $P_{\text{макс}}$ при $T = 1470$ К, чем при $T = 1420$ К, обусловлены влиянием тепловой энергии на разрушение цепочечного упорядочения катионов Fe и Mo, расположенных в шахматном порядке. На основании анализа временных зависимостей параметра P можно обнаружить два релаксационных процесса, и зависимость $dP/dt = f(t)$ можно условно разделить на две области – I и II. В области I время релаксации меньше, чем в II. Это связано с тем, что для упорядочения катионов в цепочках $-\text{O}-\text{Fe}-\text{O}-\text{Mo}-\text{O}$ в области I нужны перемещения атомов примерно на одно межатомное расстояние, тогда как в области II перемещения катионов осуществляются на большие расстояния с образованием длинноцепочечного упорядочения дальнего порядка.

Ключевые слова: ферромолибдат стронция, сверхструктурное упорядочение катионов, кислородная нестехиометрия.

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» подпрограммы «Материаловедение и технологии материалов».

Для цитирования. Гурский Л.И., Каланда Н.А., Ярмолич М.В., Петров А.В., Голосов Д.А., Киросирова М.В., Игнатенко О.В., Желудкевич А.Л. Сравнительный анализ изменения кислородной нестехиометрии и сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo в ферромолибдате стронция. Доклады БГУИР. 2021; 19(2): 14–21.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CHANGE OF OXYGEN NONSTOICHIOMETRY AND SUPERSTRUCTURAL ORDERING OF Fe/Mo CATIONS IN THE STRONTIUM FERROMOLYBDATE

LEONID I. HURSKI¹, NIKOLAY A. KALANDA², MARTA V. YARMOLICH²,
ALEXANDER V. PETROV², DMITRY A. GOLOSOV¹, MARIA V. KIROSIROVA³,
OLEG V. IGNATENKO², ALIAKSANDR L. ZHALUDKEVICH²

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

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

³The State Centre “Belmikroanaliz” of the “Integral” (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 22 June 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Sr₂FeMoO_{6-δ} single-phase samples without Fe/Mo cations superstructural ordering (P) and with Curie temperature 407 K were obtained by the solid-phase technique. According to the XRD data, the growth dynamics of the parameter P is nonlinear. In this case, the process of reaching maximum values of P (P_{\max}) is long and its rate is several times lower than the change of the oxygen index $6-\delta$. It was found that with increasing temperature of isothermal annealing, P increases and reaches maximal values 88 % at $T = 1320$ K for 120 h, $P_{\max} = 92$ % at $T = 1420$ K for 100 h, while $P_{\max} = 90$ % at $T = 1470$ K for 45 h. One can assume that the lower values of P_{\max} at $T = 1470$ K than at $T = 1420$ K are due to the influence of thermal energy on the destruction of chain ordering of Fe and Mo cations placed in staggered order. Based on the analysis of P time dependences, two relaxation processes can be found and the $dP/dt = f(t)$ can be divided into two regions – I and II. In the region I the relaxation time is shorter than that in the region II. The point is that the ordering of cations in the –O–Fe–O–Mo–O chains in the region I requires atomic displacements by approximately one interatomic distance, whereas in the region II cation displacements occur over long distances with the formation of long-chain long-range ordering.

Keywords: strontium ferromolybdate, superstructural ordering of cations, oxygen non-stoichiometry.

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

Gratitude. This work was carried out in frames of the European project H2020–MSCA–RISE–2018–823942 – FUNCOAT and the Task 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 materials technologies”.

For citation. Hurski L.I., Kalanda N.A., Yarmolich M.V., Petrov A.V., Golosov D.A., Kiroshirova M.V., Ignatenko O.V., Zhaludkevich A.L. Comparative analysis of the change of oxygen nonstoichiometry and superstructural ordering of Fe/Mo cations in the strontium ferromolybdate. Doklady BGUIR. 2021; 19(2): 14-21.

Введение

Изучение соединений со структурой двойного перовскита привлекает все большее внимание исследователей. Среди таких материалов особенно выделяются металлооксидные ферромагнетики Sr₂FeMoO_{6-δ} (SFMO), поскольку они обладают такими свойствами, как высокие величины отрицательного магниторезистивного эффекта ($MR \sim 38$ % в поле 1,0 Тл при $T = 50$ К), практически 100 % значения степени спиновой поляризации электронов проводимости и высокие значения температуры Кюри ($T_C \sim 420$ К) [1–3].

Вышеуказанные особенности делают эти материалы перспективными для их дальнейшего применения в спинтронных устройствах [4–6]. Одной из причин, почему эти материалы не используются широко, является плохая воспроизводимость свойств материалов, полученных в аналогичных условиях. Существенное влияние на содержание кислорода в SFMO

оказывают температура и время отжига, тип и поток газа. Это подтверждает сильную чувствительность материала соединения к условиям синтеза, от которых в существенной степени зависит кислородная стехиометрия составов [7–9].

Ключевой задачей в области спинтроники является совершенствование технологии получения высококачественных образцов SFMO с воспроизводимыми магнитными и гальваномангнитными свойствами. Одним из главных условий существования спиновой поляризации в ферромолибдате стронция является наличие сверхструктурного упорядочения катионов Fe и Mo [1, 2]. В реальной структуре по причине возникновения различного рода дефектов и, в частности, антиструктурных, обусловленных наличием анионных вакансий, появляются ионы железа $Fe^{2+}(3d^6)$ и молибдена $Mo^{6+}(4d^0)$.

Поскольку в обменных взаимодействиях диамагнитный катион молибдена не участвует, и между ионами $Fe^{2+}(3d^6)$ или $Fe^{3+}(3d^5)$ возможны только отрицательные обменные взаимодействия, это приводит к формированию антиферромагнитного упорядочения. Поэтому любые искажения кристаллической решетки, обусловленные кислородной дефектностью, оказывают сильное воздействие на электротранспортные и магнитные свойства ферромолибдата стронция [10, 11]. Поэтому, чтобы получить SFMO с оптимальными магнитными и гальваномангнитными свойствами и, исходя из этого, продлить срок службы устройств на их основе, требуется знание и контроль анионного состава материалов и динамики сверхструктурного упорядочения Fe/Mo по катионной подрешетке соединения.

Данное обстоятельство обуславливает необходимость установления корреляций между кислородной нестехиометрией и степенью сверхструктурного упорядочения катионов железа и молибдена, что позволит получать ферромолибдат стронция с воспроизводимыми физико-химическими характеристиками.

Методика проведения эксперимента

Порошки $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$ синтезировались методом твердофазных реакций из частично восстановленных прекурсоров $SrFeO_{2,5}$ и $SrMoO_4$. Прекурсоры были получены по керамической технологии из оксидов MoO_3 , Fe_2O_3 , $SrCO_3$ марки «ОСЧ». При синтезе прекурсоров $SrFeO_{2,5}$ и $SrMoO_4$ предварительный отжиг осуществлялся на воздухе при 970 К 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 сушились при температуре 350 К и затем прессовались в таблетки. Для повышения однородности шихты использовался вторичный помол полученных таблеток. Окончательный синтез при получении прекурсора $SrFeO_{2,5}$ 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 $p_{O_2} = 0,21 \cdot 10^5$ 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 % H_2/Ar при 1420 К в течение 5 ч и закалялись 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 $Sr_2FeMoO_{5,99}$ без сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo ($P = 0$).

Параметры кристаллической решетки определялись с использованием базы данных ICSD–PDF2 (Release 2000) и программного комплекса PowderCell [12] методом Ритвельда по данным рентгеновской дифракции на установке ДРОН-3 в CuK_{α} -излучении. Степень сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo рассчитывалась по формуле: $P = (2 \cdot SOF - 1) \cdot 100$ %, где SOF – фактор заселенности позиций (Seat Occupancy Factor).

Микроструктура и состав порошков SFMO исследовались методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на установке Hitachi S-4800 с приставкой рентгеноспектрального микроанализатора Bruker Quantex 200.

Температура Кюри образцов определялась пондеромоторным методом в ходе измерений их магнитного момента в интервале температур 77–800 К во внешнем магнитном поле 0,86 Тл.

Результаты и их обсуждение

Полученные образцы $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$ были однофазными, с температурой Кюри $T_C = 407$ К, без сверхструктурного упорядочения катионов железа и молибдена (рис. 1).

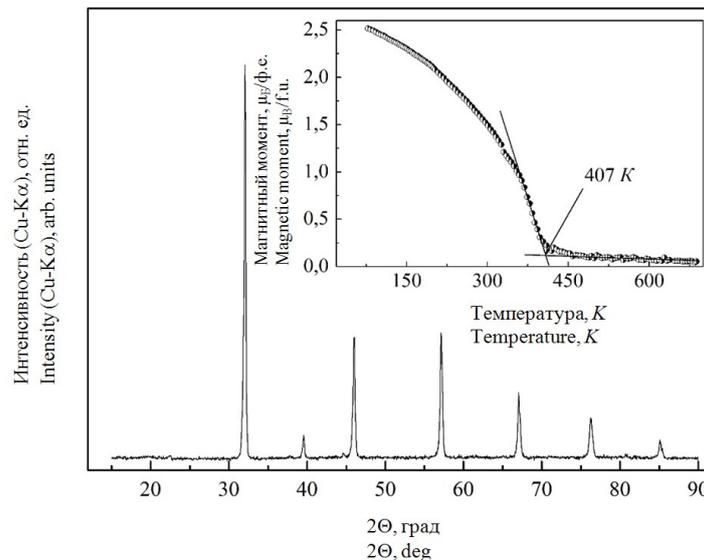


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма образца $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$. На вставке представлена температурная зависимость магнитного момента образца $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$

Fig. 1. X-ray diffraction pattern of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$ sample. The inset shows the temperature dependence of the magnetic moment of the $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$ sample

Для проведения сравнительного анализа скоростей выхода на насыщение кислородного индекса и степени сверхструктурного упорядочения образцов $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$ строились изотермические зависимости вида: $(6-\delta) = f(t)$ и $P = f(t)$.

Исследование поведения зависимостей $(6-\delta) = f(t)$ осуществлялось в условиях изотермических отжигов образцов $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$ при различных температурах в потоке газовой смеси 5 % H_2/Ar .

Подъем температуры до необходимых значений производился со скоростью 12 град/мин. Установлено, что изменение кислородного индекса выходит на насыщение при $6-\delta = 5,962$ и $T = 1370$ К в течение 18,2 ч, а с увеличением температуры до 1470 К кислородный индекс достигает значений $6-\delta = 5,923$ в течение 13,6 ч.

Для изучения динамики сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo путем построения функции вида $P = f(t)$ проводились изотермические отжиги образцов $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$ в течение 120 ч с шагом по 15 ч при различных температурах в потоке газовой смеси 5 % H_2/Ar , после чего образцы закаливались до комнатной температуры в той же газовой среде.

Согласно данным рентгеноструктурного анализа, динамика роста степени сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo носит нелинейный характер. При этом процесс достижения максимальных значений $P_{\text{макс}}$ длителен и имеет скорость в несколько раз ниже, чем скорость изменения кислородного индекса $6-\delta$ (рис. 2, 3).

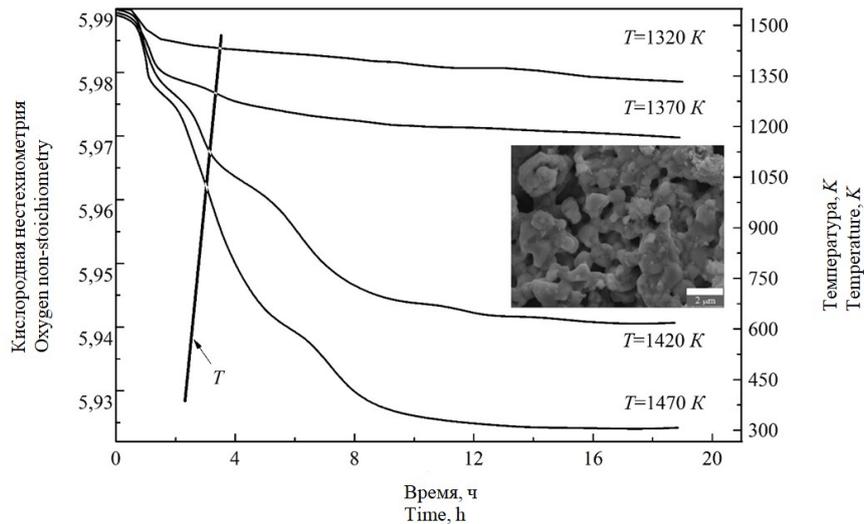


Рис. 2. Изменение кислородной нестехиометрии ($6-\delta$) в ходе отжига образца $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$ в потоке смеси инертных газов 5 % H_2/Ar со скоростью нагрева 12 град/мин и последующего изотермического отжига при различных температурах. На вставке показано РЭМ-изображение микроструктуры образца $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$

Fig. 2. Change in oxygen non-stoichiometry ($6-\delta$) during annealing of the $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$ sample in a stream of 5% H_2/Ar inert gas mixture with a heating rate of 12 deg/min and subsequent isothermal annealing at different temperatures. The inset shows the SEM image of the microstructure of the $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$ sample

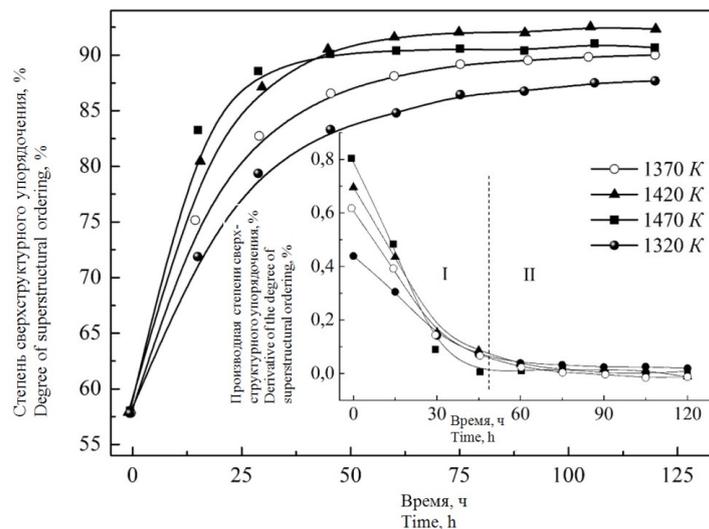


Рис. 3. Временные зависимости степени сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Мо, полученной при термообработке образцов $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$ в потоке смеси газов 5% H_2/Ar со скоростью нагрева 12 град/мин. На вставке показаны временные зависимости первой производной степени сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Мо

Fig. 3. Time dependences of the degree of superstructural ordering of Fe/Mo cations obtained by heat treatment of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$ samples in a 5% H_2/Ar gas mixture flow with a heating rate of 12 deg/min. The inset shows the time dependences of the first derivative of the degree of superstructural ordering of Fe/Mo cations

Обнаружено, что с увеличением температуры изотермического отжига величина P растет и достигает максимальных значений $P_{\text{макс}} = 88\%$ при $T = 1320\text{ K}$ в течение $t = 120\text{ ч}$, $P_{\text{макс}} = 92\%$ при $T = 1420\text{ K}$ в течение $t = 100\text{ ч}$, тогда как $P_{\text{макс}} = 90\%$ при $T = 1470\text{ K}$ в течение $t = 45\text{ ч}$. Можно предположить, что более низкие значения $P_{\text{макс}}$ при $T = 1470\text{ K}$, чем при $T = 1420\text{ K}$, обусловлены влиянием тепловой энергии на разрушение цепочечного упорядочения катионов Fe и Mo, расположенных в шахматном порядке. Зависимость $(6-\delta) = f(t)$ была аппроксимирована с использованием функции вида $6-\delta = (6-\delta_0)\exp(-t/\tau_0)$, где τ_0 – время релаксации десорбции кислорода, $(6-\delta_0) = 5,99$ – содержание кислорода в начале измерений (табл. 1).

Таблица 1. Время релаксации процессов десорбции кислорода и сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo при термообработке образцов Sr₂FeMoO_{5,99} в потоке смеси газов 5 % H₂/Ar со скоростью нагрева 12 град/мин

Table 1. The relaxation time of oxygen desorption processes and superstructural ordering of Fe/Mo cations during heat treatment of Sr₂FeMoO_{5,99} samples in a 5 % H₂/Ar gas mixture stream with a heating rate of 12 deg/min

T, K	τ _о , с	dP _о /dt	τ _p , с
1320	5,4320	0,4479	27,1173
1370	5,0235	0,6458	25,8194
1420	4,7411	0,7269	22,2838
1470	2,7961	0,8191	19,7692

На основе результатов анализа данных производных dP/dt можно обнаружить два релаксационных процесса, характеризующихся как различными постоянными времени, так и степенью воздействия на величину P . При этом зависимость $dP/dt = f(t)$ можно условно разделить на две области – I и II (рис. 3).

При аппроксимации $dP/dt = f(t)$ функцией вида $dP/dt = (dP_0/dt)\exp(-t/\tau_p)$, где τ_p – время релаксации сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo, dP_0/dt – производная сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo в начальный момент времени. Обнаружено, что в области I время релаксации меньше, чем в II (табл. 1). Можно предположить, что различие скоростей увеличения P в областях I и II связано с тем, что для упорядочения катионов в цепочках –O–Fe–O–Mo–O (область I) нужны перемещения атомов примерно на одно межатомное расстояние, тогда как в области II перемещения катионов осуществляются на большие расстояния с образованием длинноцепочечного упорядочения дальнего порядка.

Таким образом, динамика изменения кислородной нестехиометрии и степени сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo свидетельствует, что скорость десорбции кислорода в несколько раз больше скорости сверхструктурного упорядочения катионов.

Заключение

Установлено, что динамика роста степени сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo носит нелинейный характер. При этом процесс достижения максимальных значений $P_{\text{макс}}$ длителен и его скорость в несколько раз ниже, чем скорость изменения кислородного индекса δ . На основании анализа данных производных степени сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo установлено, что зависимость $dP/dt = f(t)$ можно условно разделить на две области – I и II, отличающиеся скоростями увеличения P . Можно предположить, что различие скоростей увеличения P в областях I и II связано с тем, что для упорядочения катионов в цепочках –O–Fe–O–Mo–O (область I) нужны перемещения атомов примерно на одно межатомное расстояние, тогда как в области II перемещения катионов осуществляются на большие расстояния с образованием длинноцепочечного упорядочения дальнего порядка.

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. Topwal D., Sarma D.D., Kato H., Tokura Y., Avignon M. Structural and magnetic properties of Sr₂Fe_{1-x}Mo_{1-x}O₆ (–1<x<0,25). *Physical Review B*. 2006;73:0944191-0944195. DOI:10.1103/PhysRevB.73.094419.
3. Chan T.S., Liu R.S., Hu S.F., Lin J.G. Structure and physical properties of double perovskite compounds Sr₂FeMoO₆ (M = Mo, W). *Materials chemistry and physics*. 2005;93(2-3):314-319. DOI:10.1016/j.matchemphys.2005.03.060.
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. 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 Applied Materials & Interfaces*. 2014;6(21):9201-19206. DOI: 10.1021/am5052125.

- 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.
- 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.
- Allub R., Navarro O., Avignon M., Alascio B. Effect of disorder on the electronic structure of the double perovskite Sr₂FeMoO₆. *Physica B: Condensed Matter*. 2002;320(1-4):13-17. DOI: 10.1016/S0921-4526(02)00608-7.
- Hurski L.I., Kalanda N.A., Yarmolich M.V., Turchenko V.A., Karpinsky D.V., Chumak V.A., Petrov A.V., Zhaludkevich A.L. Interrelation between oxygen non–stoichiometry and Fe/Mo superstructural ordering in Sr₂FeMoO_{6-δ}. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2017;(8):54-59. (In Russ.).
- 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.
- Zhou J.P., Dass R., Yin H.Q., Zhou J.S., Rabenberg L., Goodenough J.B. Enhancement of room temperature magnetoresistance in double perovskite ferrimagnets. *Journal of Applied Physics*. 2000;87(9):5037-5039. DOI: 10.1063/1.373240.
- Kraus W., Nolze G.W. Powder Cell – a program for the representation and manipulation of crystal structures and calculation of the resulting X-ray powder patterns. *Journal of Applied Crystallography*. 1996;29(3):301-303. DOI:10.1107/S0021889895014920.

Вклад авторов

Гурский Л.И. утвердил окончательный вариант рукописи для публикации, провел редактирование и осуществил критический пересмотр материалов статьи в части значимого интеллектуального содержания.

Каланда Н.А. поставил задачи и выполнил дизайн исследования, провел анализ и интерпретацию данных, подготовил статью к публикации.

Ярмолич М.В. провела синтез образцов Sr₂FeMoO_{6-δ} твердофазным методом, осуществила сбор и обработку экспериментальных данных по фазовому составу, анализ и интерпретацию экспериментальных данных.

Петров А.В. осуществил обработку данных, редактирование и оформление статьи для публикации.

Голосов Д.А. осуществил проведение измерений структурных свойств образцов Sr₂FeMoO_{6-δ} методом рентгеновской дифракции.

Киросирова М.В. провела исследования микроструктуры и элементного состава образцов Sr₂FeMoO_{6-δ} с помощью СЭМ и ЭДРС.

Игнатенко О.В. выполнил анализ и интерпретацию экспериментальных данных.

Желудкевич А.Л. выполнил исследования микроструктуры и магнитных свойств образцов Sr₂FeMoO_{6-δ}.

Authors' contribution

Hurski L.I. made a final approval of the manuscript for publication, carried out its editing and critical review in terms of significant intellectual content.

Kalanda N.A. realized a research concept and design, data analysis and interpretation, prepared the article for publication.

Yarmolich M.V. carried out a synthesis of the Sr₂FeMoO_{6-δ} samples by the solid–phase technique, realized the obtaining and treatment of experimental data concerning phase composition, analysis and interpretation of data.

Petrov A.V. realized a treatment of the obtained experimental results and preparation of the article for publication.

Golosov D.A. realized measurements of the structural properties of Sr₂FeMoO_{6-δ} samples by the X-ray diffraction technique.

Kirosirova M.V. carried out investigations of microstructure and element composition of Sr₂FeMoO_{6-δ} samples by means of SEM and EDX.

Ignatenko O.V. made the analysis and interpretation of the obtained data on the structure of the samples.

Zhaludkevich A.L. carried out investigations of microstructure and magnetic properties of the $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ samples.

Сведения об авторах

Гурский Л.И., член-кор. НАН Беларуси, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Центра 10.1 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Каланда Н.А., к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник отдела криогенных исследований научно-практического центра НАН Беларуси по материаловедению.

Ярмолич М.В., к.ф.-м.н., старший научный сотрудник отдела криогенных исследований научно-практического центра НАН Беларуси по материаловедению.

Петров А.В., к.ф.-м.н., старший научный сотрудник отдела криогенных исследований научно-практического центра НАН Беларуси по материаловедению.

Голосов Д.А., к.т.н., доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Киросирова М.В., ведущий инженер государственного центра «Белмикрoанализ» ОАО «Интеграл».

Игнатенко О.В., к.ф.-м.н., заместитель генерального директора, заведующий лабораторией физики высоких давлений и сверхтвердых материалов научно-практического центра НАН Беларуси по материаловедению.

Желудкевич А.Л., научный сотрудник лаборатории физики высоких давлений и сверхтвердых материалов научно-практического центра НАН Беларуси по материаловедению.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 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., Corresponding Member of the NAS of Belarus, D.Sc., Professor, Main Researcher at the Centre 10.1 of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kalanda N.A., PhD, Leading Researcher at the Department of Cryogenic Research of the Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus.

Yarmolich M.V., PhD, Senior Researcher at the Department of Cryogenic Research of the Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus.

Petrov A.V., PhD, Senior Researcher at the Department of Cryogenic Research of the Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus.

Golosov D.A., PhD, Associate Professor at the Department of Electronic Engineering and Technology of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kirosirova M.V., Leading Engineer at the State Centre "Belmikroanaliz" of the "Integral" Joint Stock Company.

Ignatenko O.V., PhD, Deputy General Director, Head of the Laboratory of High Pressure Physics and Superhard Materials of the Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus.

Zhaludkevich A.L., Researcher at the Laboratory of High Pressure Physics and Superhard Materials of the Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka, 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/10.35596/1729-7648-2021-19-2-22-30>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 528.716

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УГЛОВ ОРИЕНТАЦИИ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ ПРИ СЪЕМКЕ С БОРТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАТФОРМЫ НАВЕДЕНИЯ

А.А. ЛОМАКО¹, В.В. СТАНЧИК¹, Г.С. ЛИТВИНОВИЧ¹, И.И. БРУЧКОВСКИЙ¹,
Б.И. БЕЛЯЕВ¹, М.Ю. БЕЛЯЕВ²

¹Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко Белорусского государственного университета (г. Минск, Республика Беларусь)

²Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (г. Королёв, Российская Федерация)

Поступила в редакцию 31 августа 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. На борту Международной космической станции (МКС) в рамках эксперимента «Ураган» по исследованию Земли используются различные приборы наблюдения, в том числе фотографическая, фото- и видеоспектральная аппаратура, наведение которой проводится экипажем вручную через иллюминаторы. Однако на планирование таких экспериментов налагаются сильные ограничения, прежде всего связанные с необходимостью учета распорядка дня экипажа и наличия у него времени, выделенного на проведение научных экспериментов. Решением, позволяющим расширить возможности по проведению экспериментов, является использование автоматизированных платформ наведения (ПН). Одной из таких ПН является система ориентации видеоспектральной аппаратуры СОВА-1-426. В работе представлен метод вычисления углов ориентации научной аппаратуры для наведения на заранее заданные объекты земной поверхности с использованием СОВА-1-426. При этом в описанном методе помимо координат центра масс учитывается текущая ориентация МКС, что позволяет сделать прогноз более точным. Учет ориентации МКС достигается за счет использования кватерниона разворота МКС для наведения платформы в автоматическом режиме. Представленный метод расчета углов ориентации научной аппаратуры при съемке с борта МКС с использованием СОВА-1-426 позволяет с точностью не более 7 км осуществлять наведение на объекты земной поверхности с борта МКС. Описанный метод реализован программно и в настоящее время используется в ПН СОВА-1-426 на борту МКС для съемки объектов земной поверхности.

Ключевые слова: наведение на объекты наблюдения, Международная космическая станция, подвижные платформы наведения, космические эксперименты, модель SGP4, кватернионы разворота.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ломако А.А., Станчик В.В., Литвинович Г.С., Бручковский И.И., Беляев Б.И., Беляев М.Ю. Метод прогнозирования углов ориентации научной аппаратуры при съемке с борта Международной космической станции с использованием платформы наведения. Доклады БГУИР. 2021; 19(2): 22-30.

METHOD FOR ORIENTATION ANGLES FORECASTING OF OPTICAL INSTRUMENTS FROM THE INTERNATIONAL SPACE STATION WITH ORIENTATION PLATFORM

ALIAKSEI A. LAMAKA¹, VALERY V. STANCHYK¹, HLEB S. LITVINOVICH¹,
ILYA I. BRUCHKOUSKY¹, BORIS I. BELYAEV¹, MIKHAIL Y. BELYAEV²

¹*A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University
(Minsk, Republic of Belarus)*

²*S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (Korolev, Russian Federation)*

Submitted 31 August 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Onboard the International Space Station (ISS), as a part of the “Uragan” Earth exploration experiment, various observation devices are used, including photo and video spectral equipment, the orientation of which is carried out manually by the crew through the portholes. However, severe limitations are imposed on the planning of such experiments, primarily related to the necessity taking into account the crew’s daily routine and the availability of time allocated for scientific experiments. The solution for expanding the ability to conduct experiments is the employing of automated orientation platforms (OP). One of these OPs is the video spectral equipment orientation system SOVA-1-426. A method for orientation angles forecasting of optical instruments for pointing at predefined objects on the Earth’s surface with SOVA-1-426 is presented. Moreover, in the described method, in addition to the coordinates of the center of mass, the current orientation of the ISS is taken into account, which makes it possible to perform the forecast with better precision. Taking into account the ISS orientation is carried out through the use of the ISS rotation quaternion to control the platform in automatic mode. The presented method for the orientation angles forecasting of high-resolution photo-camera aboard the ISS by employing SOVA-1-426 allows its automatic alignment on the Earth’s surface objects with accuracy up to seven kilometers. The described method is implemented in software and is currently used in the SOVA-1-426 OP aboard the ISS for the remote sensing of the Earth’s surface.

Keywords: targeting to the Earth objects, International Space Station (ISS), mobile orientation platforms, space experiments, SGP4 model, rotation quaternions.

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

For citation. Lamaka A.A., Stanchyk V.V., Litvinovich H.S., Bruchkousky I.I., Belyaev B.I., Belyaev M.Y. Method for orientation angles forecasting of optical instruments from the International Space Station with orientation platform. Doklady BGUIR. 2021; 19(2): 22-30.

Введение

В рамках космического эксперимента (КЭ) по исследованию Земли «Ураган» на МКС в целях регистрации характеристик объектов на поверхности Земли работает различная научная аппаратура (НА), в том числе фотоаппаратура, фотоспектральная система (ФСС) [1] и видеоспектральная система (ВСС) [2]. Для мониторинга состояния объектов земной поверхности с борта МКС до недавнего времени всегда привлекались космонавты, в обязанность которых входило получение данных о подстилающей поверхности с помощью указанной НА. Такой подход, по сравнению со спутниковой съемкой, имеет как свои преимущества, так и недостатки.

Для съемки объекта космонавту необходимо увидеть необходимую точку на поверхности Земли и успеть навести на нее используемую НА. В условиях непрерывного движения подстилающей поверхности относительно станции со скоростью около 7 км/с это представляется довольно трудной задачей. Сложность состоит в географической привязке уже зарегистрированных данных – еще один недостаток такого подхода. По времени съемки можно

понять, где находилась проекция центра масс МКС в момент съемки. Но то, как была ориентирована НА относительно направления «надир» – вопрос неопределенный.

С 2016 года в рамках КЭ «Ураган» получил развитие проект по разработке автоматизированной системы ориентации видеоспектральной аппаратуры (СОВА) [3]. Данная система предназначена для автоматического наведения оптической оси установленной на нее НА и съемки без участия космонавтов. Такое решение позволяет избежать большинства недостатков, присущих съемке с борта МКС с участием оператора, и автоматизировать использование ручных камер и спектрометров, которые применялись до внедрения данной системы для мониторинга земной поверхности с борта МКС в КЭ «Ураган» [4]. Использование НА, находящейся на борту МКС, позволило в прошлом получить широкий спектр информации об объектах, процессах и явлениях на поверхности Земли [5–7]. Очевидны преимущества СОВА как автоматизированной платформы наведения, где доступны данные по ориентации НА в каждый момент времени. При этом существует возможность использования НА, которая уже доказала свою эффективность.

Задача автоматического наведения с борта МКС ранее не стояла. Тем не менее существует множество космических аппаратов (КА), основной задачей которых является получение данных об объектах земной поверхности. Особенностью съемки с использованием таких КА является возможность изменения углов ориентации КА для получения необходимых для съемки значений [8]. Съемка с борта МКС не дает таких возможностей, а постоянные колебания углов ориентации станции вносят ошибку в прогнозируемые углы наведения СОВА.

Краткие технические характеристики СОВА-1-426

Основное предназначение СОВА-1-426 – регистрации оптических характеристик объектов подстилающих поверхностей при выполнении мониторинга Земли с борта МКС в автоматическом режиме. СОВА-1-426 устанавливается на иллюминатор служебного модуля (СМ) российского сегмента (РС) МКС [3].

Конструктивно СОВА-1-426 – это непроницаемый для света со стороны отсека МКС жесткий кожух, который устанавливается на опоре и имеет место для крепления фотоаппарата или НА ВСС (рис. 1). Внутри корпуса имеются два зеркала. Одно из них – подвижное – закреплено на подвеске с возможностью поворота вокруг двух осей. Второе – неподвижное – направляет поток света на объектив научной аппаратуры. Подвижное зеркало может поворачиваться по двум взаимно перпендикулярным осям на 15 град, что дает возможность сканирования подстилающей поверхности в диапазоне ± 30 град по обеим осям [3]. Точность наведения по каждой из осей составляет 0,2 град.

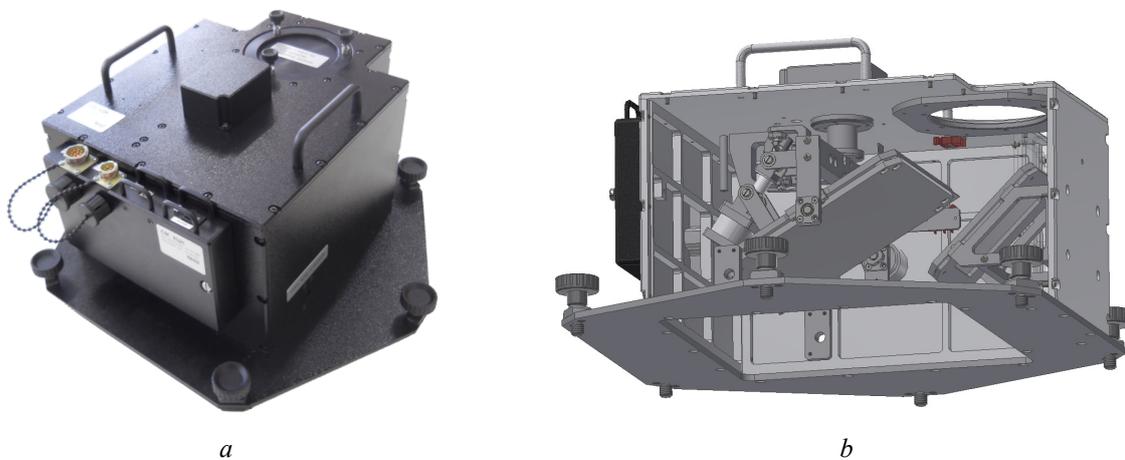


Рис. 1. СОВА-1-426: *a* – внешний вид; *b* – внутреннее устройство
Fig. 1. SOVA-1-426: *a* – view; *b* – internal organization

В настоящее время СОВА-1-426 функционирует на борту МКС и позволяет проводить съемку с использованием фотоаппаратуры и НА ВСС без участия оператора с прогнозированием времени съемки на сутки вперед. При этом возможность отклонения от надира в направлении, коллинеарном трассе полета, позволяет осуществлять компенсацию «смаза» изображения при съемке объектов земной поверхности с большими выдержками, что может понадобиться в условиях недостаточной освещенности либо при необходимости съемки индикатрисы отражения определенного объекта.

Прогнозирование положения центра масс МКС с помощью модели SGP4

Программное обеспечение СОВА имеет доступ к баллистическим данным МКС. Для построения прогноза и правильного наведения ПН необходимо использовать существующие на борту МКС потоки данных и принятые в них системы координат. В первую очередь важна собственная система координат (ССК) РС МКС, которая жестко связана со Станцией. Ось X_{PC} в ней направлена противоположно направлению полета МКС. Ось Y_{PC} направлена из центра масс МКС в обратную от Земли сторону. Ось Z_{PC} дополняет систему координат до правой тройки. СОВА-1-426 жестко устанавливается на иллюминатор и, таким образом, «привязана» к ССК РС МКС.

Вторая из используемых систем координат – ортогональная система координат (ОСК). В этой системе координат ось Y_{OSK} направлена вдоль радиус-вектора из центра Земли к МКС. Ось X_{OSK} – по вектору скорости в плоскости орбиты. Ось Z_{OSK} дополняет систему координат до правой тройки и, таким образом, направлена ортогонально вектору орбитальной линейной скорости V (рис. 2). В результате ОСК жестко связана с центром масс МКС, но не зависит от ориентации МКС, в отличие от ССК.

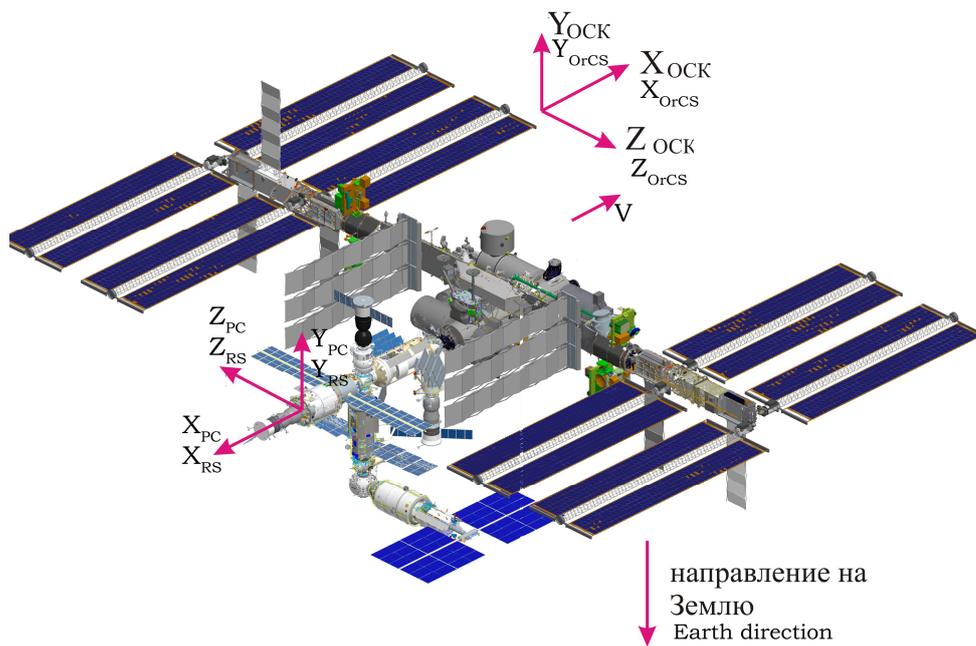


Рис. 2. Системы координат, связанные с МКС
Fig. 2. ISS-connected coordinate systems

Среди данных, которые можно получать на борту РС МКС, присутствуют различные пакеты, передаваемые по сети Ethernet посредством Multicast, транслируемые через один порт с варьируемой частотой от информационной управляющей системы РС МКС. Наиболее важными среди этих данных являются данные TLE (Two Lines Elements), транслируемые с частотой один раз в минуту, и данные системы управления движением и навигацией (СУДН) о параметрах углового движения МКС, транслируемые с частотой 5 Гц.

В данных СУДН присутствуют кватернионы разворота ССК МКС относительно звездной системы координат J2000 и ОСК, абсолютная угловая скорость МКС в ОСК, время расчета параметров ориентации.

Наличие постоянно обновляющихся данных TLE дает возможность прогнозирования положения МКС на ближайшее будущее, используя расчетную модель SGP4, для которой данные TLE являются входными. Данная модель позволяет получить положение центра масс МКС с достаточно высокой точностью на ближайшие сутки вперед при условии отсутствия искусственной корректировки орбитального положения МКС при помощи гироцинов.

Однако постоянно меняющаяся ориентация МКС также важна для наведения на объект земной поверхности. Углы крена, тангажа и рыскания МКС могут испытывать колебания с амплитудой до 4 град и достаточно большим периодом (порядка часов). Поэтому было принято решение о внесении коррекции в прогноз модели SGP4. Данная коррекция была реализована с помощью приема данных СУДН о параметрах углового движения МКС и последующего преобразования вектора наведения СОВА-1-426 с использованием этих данных.

Кватернионы разворота МКС и их использование для наведения ПН

Наиболее удобным для учета ориентации МКС среди данных СУДН является кватернион разворота ССК МКС относительно ОСК. Использование кватерниона разворота вместо матриц поворота позволяет существенно сократить время расчета поправок, так как алгебраические операции с кватернионами довольно просты и не требуют больших вычислительных мощностей [9]. Кватернионы имеют следующий обобщенный вид:

$$q = s + x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}, \quad (1)$$

где $s, x, y, z \in R$ – вещественные числа,

i, j, k – мнимые единицы со следующим свойством: $i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$.

Одной из важнейших особенностей кватернионов является возможность их использования для описания поворота вокруг некоторой оси в пространстве. Кватернион вида (1) может быть представлен также в виде кватерниона разворота (представления равнозначны) с разделением на скалярную и векторную часть:

$$q = \left[\cos \frac{\theta}{2}, \sin \frac{\theta}{2} \hat{\mathbf{v}} \right], \quad (2)$$

где θ – угол разворота некоторого вектора вокруг произвольной оси;

$\hat{\mathbf{v}}$ – единичный вектор, сонаправленный с осью, вокруг которой осуществляется поворот.

Сложение и вычитание кватернионов производится аналогично комплексным числам.

Произведение кватернионов вида (1) вычисляется по формуле

$$q_a q_b = (s_a s_b - x_a x_b - y_a y_b - z_a z_b) + (s_a x_b + s_b x_a + y_a z_b - y_b z_a) \mathbf{i} + (s_a y_b + s_b y_a + z_a z_b - z_b x_a) \mathbf{j} + (s_a z_b + s_b z_a + x_a y_b - x_b y_a) \mathbf{k} \quad (3)$$

Сопряженное число кватерниона можно вычислить, взяв противоположную по знаку векторную часть кватерниона.

При работе с кватернионами следует производить их нормировку, т. е. деление каждой составляющей на норму:

$$\bar{q} = \frac{q}{|q|}, \quad (4)$$

где $|q| = \sqrt{s^2 + x^2 + y^2 + z^2}$ – норма кватерниона.

Для разворота некоторого кватерниона q_v вида (1) необходимо умножить кватернион разворота q_r вида (1) на поворачиваемый кватернион q_v по формуле (3), а результат умножить

на кватернион, сопряженный кватерниону разворота (q_r^*). При этом кватернионы разворота должны быть нормированы по формуле (4):

$$q_v' = q_r q_v q_r^* \quad (5)$$

По определению кватернион со скалярной частью, равной нулю, называется чисто векторным. Таким образом, любой вектор является чисто векторным кватернионом. Тогда для СОВА-1-426 вектор наведения на объект съемки в ССК РС МКС, который можно получить благодаря расчетной модели SGP4, также является чисто векторным кватернионом. Используя в качестве кватерниона разворота кватернион разворота ССК МКС относительно ОСК, можно по формуле (5) получить уточненный кватернион наведения на объект съемки. Для этого в формуле (5) за q_r необходимо принять кватернион разворота ССК МКС относительно ОСК, за q_v – кватернион наведения на объект съемки в ССК РС МКС.

В свою очередь, с помощью простых тригонометрических преобразований уточненный кватернион наведения на объект съемки q_v' из (5) можно трансформировать в углы наведения платформы СОВА-1-426:

$$\begin{cases} \alpha_x = \frac{180}{\pi} \arctg\left(\frac{x_v'}{y_v'}\right) \\ \alpha_y = \frac{180}{\pi} \arctg\left(\frac{z_v'}{y_v'}\right), \end{cases} \quad (6)$$

где α_x и α_y – углы поворота зеркала СОВА-1-426;

x_v' , y_v' , z_v' – составляющие векторной части уточненного кватерниона наведения на объект съемки q_v' .

Необходимо отметить, что перед использованием формулы (6) в данном случае нормировка уточненного кватерниона наведения на объект не обязательна, так как для вычисления углов наведения ПН используется только отношение составляющих кватерниона.

Результаты и их обсуждение

Наведение съемочной аппаратуры на объекты съемки – достаточно трудоемкая задача. Для ее успешного выполнения в программном обеспечении СОВА реализовано разделение метода прогнозирования углов ориентации НА при съемке с борта МКС с использованием СОВА-1-426 на этапы.

На первом этапе выполняется прогнозирование положения центра масс МКС на ближайшие сутки полета. Для такого прогнозирования используется модель SGP4 и данные TLE, описанные выше. Минусом использования такого подхода является то, что в случае корректировки орбиты гиродинами модель будет давать достаточно высокую погрешность при расчете координат центра масс в течение периода около суток после корректировки.

Вторым этапом является расчет набора пар значений «время-углы» для СОВА-1-426 на основе вычисленного прогноза модели SGP4. Таким образом, задолго до пролета над объектом в программном обеспечении имеется время и необходимые углы наведения на объект. Однако все вышеописанное относится только лишь к координатам центра масс МКС. На самом же деле станция совершает колебательные движения около собственного центра масс, меняя таким образом свою ориентацию. Эта ориентация описывается кватернионом разворота МКС.

Третий этап состоит в коррекции полученных на втором этапе данных посредством их математического преобразования с помощью кватерниона разворота МКС. Данное преобразование осуществляется в режиме, близком к режиму реального времени, и описано выше. Это способствует уточнению вектора наведения на объект съемки.

Таким образом, весь процесс наведения состоит из трех этапов. Первые измерения с использованием СОВА-1-426 показали возможность наведения на объекты земной поверхности с разницей между координатами планируемых точек наведения и координатами центров полученных кадров в несколько километров. При этом в поле зрения НА ВСС попадает область поверхности размерами 28,5×36,9 км [2]. Экспериментальную погрешность в наведении планируется оценить по результатам проводимых в настоящее время измерений с борта МКС.

Заключение

Представленный метод расчета углов ориентации научной аппаратуры при съемке с борта МКС с использованием СОВА-1-426 позволяет с достаточной точностью осуществлять наведение на объекты земной поверхности с борта МКС в автоматическом режиме с предварительным заданием объектов. Использование уточнения углов наведения СОВА-1-426 за счет преобразования вектора наведения на объект кватернионом разворота МКС позволяет увеличивать точность наведения, полученную только с помощью расчета в модели SGP4, за счет ввода поправок для компенсации колебательных движений МКС, которые могут достигать амплитуды в 4–5 град. При этом высокая частота передачи по бортовой сети данных СУДН, с одной стороны, и большой период колебаний крена, тангажа и рыскания МКС – с другой, позволяют использовать последний полученный от информационной управляющей системы РС МКС кватернион разворота и не производить расчет будущего значения кватерниона разворота МКС. Метод нуждается в тщательной проверке в условиях проведения реального эксперимента на борту МКС, что и осуществляется в настоящее время.

Список литературы

1. Беляев Б.И., Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Роговец А.В., Рязанцев В.В., Сармин Э.Э., Сосенко В.А. Летная отработка исследовательской аппаратуры «Фотоспектральная система» на борту Российского сегмента Международной космической станции. *Космическая техника и технологии*. 2014;1:22-28.
2. Беляев Б.И., Беляев М.Ю., Сармин Э.Э., Гусев В.Ф., Десинов Л.В., Иванов В.А., Крот Ю.А., Мартинов А.О., Рязанцев В.В., Сосенко В.А. Устройство и летные испытания научной аппаратуры «Видеоспектральная система» на борту российского сегмента МКС. *Космическая техника и технологии*. 2016;2:12-20.
3. Беляев Б.И., Беляев М.Ю., Боровихин П.А., Голубев Ю.В., Ломако А.А., Рязанцев В.В., Сармин Э.Э., Сосенко В.А. Система автоматической ориентации научной аппаратуры в эксперименте «Ураган» на Международной космической станции. *Космическая техника и технологии*. 2018;4(23):70-80.
4. Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Караваев Д.Ю., Сармин Э.Э., Юрина О.А. Аппаратура и программно-математическое обеспечение для изучения земной поверхности с борта Российского сегмента Международной космической станции по программе «Ураган». *Космонавтика и ракетостроение*. 2015;1:63-70.
5. Беляев М.Ю., Виноградов П.В., Десинов Л.В., Кумаков С.К., Секерж-Зенькович С.Я. Идентификация источника океанских кольцевых волн около острова Дарвин по фотоснимкам из космоса. *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2011;1:70-81.
6. Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Караваев Д.Ю., Легостаев В.П. Использование съемки земной поверхности с МКС в интересах топливно-энергетического комплекса. *Известия РАН. Энергетика*. 2013;4:75-90.
7. Беляев Б.И., Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Катковский Л.В., Крот Ю.А., Сармин Э.Э. Результаты испытаний фотоспектральной системы на МКС. *Исследование Земли из космоса*. 2014;6:27-39.
8. Архипова Н.А., Золотой С.А., Корзун В.М., Костюченко В.Д., Куприянец О.Э., Соболев А.Л. Автоматизированная система оперативного анализа реализуемости дистанционного зондирования Земли. *Системный анализ и прикладная информатика*. 2016;3:4-11.
9. Ватульян А.О. Кватернионы. *Соросовский образовательный журнал*. 1999;5:117-120.

References

1. Belyaev B.I., Belyaev M.Y., Desinov L.V., Rogovets A.V., Ryazantsev V.V., Sarmin E.E., Sosenko V.A. [Flight testing of research equipment “Photospectral system” onboard the Russian Segment of International Space Station]. *Space Engineering And Technology*. 2014;1:22-28. (In Russ.)
2. Belyaev B.I., Belyaev M.Y., Sarmin E.E., Gusev V.F., Desinov L.V., Ivanov V.A., Krot Y.A., Martinov A.O., Ryazantsev V.V., Sosenko V.A. [Design and flight tests of science hardware video-spectral system onboard the Russian Segment of the ISS]. *Space Engineering And Technology*. 2016;2:12-20. (In Russ.)
3. Belyaev B.I., Belyaev M.Y., Borovikhin P.A., Golubev Yu.V., Lamaka A.A., Ryazantsev V.V., Sarmin E.E., Sosenko V.A. [Automatic positioning system for science hardware in Uragan experiment on the ISS]. *Space Engineering And Technology*. 2018;4(23):70-80. (In Russ.)
4. Belyaev M.Y., Desinov L.V., Karavaev D.Y., Sarmin E.E., Yourina O.A. [Hardware and software for studying the Earth’s surface onboard the Russian Segment of the ISS under the Uragan program]. *Cosmonautics And Rocket Engineering*. 2015;1:63-70. (In Russ.)
5. Belyaev M.Y., Vinogradov P.V., Desinov L.V., Kumakshev S.K., Sekerzh-Zenkovich S.Y. [Identification of the source of ocean ring waves near the island of Darwin from photographs from space]. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2011;1:70-81. (In Russ.)
6. Belyaev M.Y., Desinov L.V., Karavaev D.Y., Legostaev V.P. [Use of ground surface survey from the ISS for the benefit of Fuel&Energy Complex]. *Thermal Engineering*. 2013;4:75-90. (In Russ.)
7. Belyaev B.I., Belyaev M.Y., Desinov L.V., Katkovsky L.V., Sarmin E.E. [Processing spectra and images from the photospectral system in the space experiment “Uragan” on the ISS]. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2014;6:27-39. (In Russ.)
8. Arkhipova N., Zolotoy S., Korzun V., Kastsiuchenka V., Kupryianets V., Sobal A. [Automated system of the operational analysis of the feasibility of Earth remote sensing]. *System analysis and applied information science*. 2016;3:4-11. (In Russ.)
9. Vatulyan A.O. [Quaternions]. *Soros Educational Journal*. 1999;5:117-120. (In Russ.)

Вклад авторов

Ломако А.А. внес существенный вклад в определение замысла и дизайна исследования, осуществил подготовку статьи.

Бручковский И.И., Литвинович Г.С., Станчик В.В. приняли участие в исследовании и осуществили критический пересмотр статьи в части значимого интеллектуального содержания.

Беляев Б.И., Беляев М.Ю. внесли существенный вклад в определение замысла и дизайна исследования, утвердили окончательный вариант статьи для опубликования.

Authors’ contribution

Lamaka A.A. made a significant contribution to the concept and design of the study and preparation of the article.

Bruchkousky I.I., Litvinovich G.S., Stanchyk V.V. took part in the research and carried out critical revision of the article in terms of meaningful intellectual content.

Belyaev B.I., Belyaev M.Y. made a significant contribution to the research concept and design, approved the final version of the article for publication.

Сведения об авторах

Ломако А.А., младший научный сотрудник института прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета.

Станчик В.В., младший научный сотрудник института прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета.

Information about the authors

Lamaka A.A., Junior Researcher of A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University.

Stanchyk V.V., Junior Researcher of A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University.

Литвинович Г.С., младший научный сотрудник института прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета.

Litvinovich H.S., Junior Researcher of A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University.

Бручковский И.И., научный сотрудник института прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета.

Bruchkousky I.I., Researcher of A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University.

Беляев Б.И., д. ф-м. н., профессор, заведующий отделом института прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета.

Belyaev B.I., D.Sc., Professor, Head of Department of A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University.

Беляев М.Ю., д.т.н., профессор, заместитель руководителя Ракетно-космической корпорации «Энергия» им. С.П. Королёва.

Belyaev M.Y., D.Sc., Professor, Deputy Head of S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia.

Адрес для корреспонденции

220045, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Курчатова, 7,
Институт прикладных физических проблем
имени А.Н. Севченко Белорусского
государственного университета;
тел. +375- 29-190-65-60;
e-mail: alekseylomako@gmail.com
Ломако Алексей Андреевич

Address for correspondence

220045, Republic of Belarus,
Minsk, Kurchatov str., 7,
A.N. Sevchenko Institute
of Applied Physical Problems
of Belarusian State University;
tel. +375 29 190 65 60;
e-mail: alekseylomako@gmail.com
Lamaka Aliaksei Andreevich.



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-2-31-39>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.932+004.258

АДАПТИВНОЕ КОМБИНИРОВАННОЕ КОДИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ ОБЪЕМА АРИФМЕТИЧЕСКОГО КОДА

Б.Д.С. САДИК, В.Ю. ЦВЕТКОВ, М.Н. БОБОВ

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

Поступила в редакцию 30 сентября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Рассматривается задача повышения эффективности кодирования полутоновых изображений в пространстве битовых плоскостей разностей значений пикселей, полученных с помощью дифференциального кодирования (DPCM – Differential pulse-code modulation). Для компактного представления DPCM-значений пикселей предлагается использовать комбинированный кодер сжатия, реализующий арифметическое кодирование и кодирование длин серий. Арифметический кодер обеспечивает высокие коэффициенты сжатия, но имеет высокую вычислительную сложность и значительные накладные расходы на кодирование, что делает его эффективным в основном для сжатия средних по значимости битовых плоскостей DPCM-значений пикселей. Кодирование длин серий является предельно простым и превосходит арифметическое кодирование в сжатии длинных последовательностей повторяющихся символов, часто встречающихся в старших битовых плоскостях DPCM-значений пикселей. Для битовых плоскостей DPCM-значений пикселей любого изображения может быть подобрана комбинация простых кодеров длин серий и сложных арифметических кодеров, обеспечивающая максимальный коэффициент сжатия каждой битовой плоскости и всех плоскостей в целом при наименьшей вычислительной сложности. В результате каждому изображению соответствует своя эффективная структура комбинированного кодера, зависящая от распределения бит в битовых плоскостях DPCM-значений пикселей. Для адаптации структуры комбинированного кодера к распределению бит в битовых плоскостях DPCM-значений пикселей в статье предлагается использовать прогнозирование объема арифметического кода на основе энтропии и сравнение полученного прогнозного значения с объемом кода длин серий. Вычисление энтропии осуществляется на основе значений количества повторов единичных и нулевых символов, получаемых в качестве промежуточных результатов кодирования длин серий, что не требует дополнительных вычислительных затрат. Установлено, что в сравнении с адаптацией структуры комбинированного кодера с использованием прямого определения объема арифметического кода каждой битовой плоскости DPCM-значений пикселей предложенная структура кодера обеспечивает существенное снижение вычислительной сложности при сохранении высоких коэффициентов сжатия изображений.

Ключевые слова: комбинированное кодирование, адаптивное кодирование, арифметическое кодирование, кодирование длин серий, дифференциальное кодирование, сжатие изображений.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Садик Б.Д.С., Цветков В.Ю., Бобов М.Н. Адаптивное комбинированное кодирование изображений с прогнозированием объема арифметического кода. Доклады БГУИР. 2021; 19(2): 31-39.

ADAPTIVE COMBINED IMAGE CODING WITH PREDICTION OF ARITHMETIC CODE VOLUME

BAKER J. S. SADIQ, VIKTAR YU. TSVIATKOU, MICHAÏL N. BOBOV

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

Submitted 30 September 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The problem of increasing the efficiency of coding of halftone images in the space of bit planes of differences in pixel values obtained using differential coding (DPCM – Differential pulse-code modulation) is considered. For a compact representation of DPCM pixel values, it is proposed to use a combined compression encoder that implements arithmetic coding and run-length coding. An arithmetic encoder provides high compression ratios, but has high computational complexity and significant encoding overhead. This makes it effective primarily for compressing the mean-value bit-planes of DPCM pixel values. Run-length coding is extremely simple and outperforms arithmetic coding in compressing long sequences of repetitive symbols that often occur in the upper bit planes of DPCM pixel values. For DPCM bit planes of pixel values of any image, a combination of simple run length coders and complex arithmetic coders can be selected that provides the maximum compression ratio for each bit plane and all planes in general with the least computational complexity. As a result, each image has its own effective combined encoder structure, which depends on the distribution of bits in the bit planes of the DPCM pixel values. To adapt the structure of the combined encoder to the distribution of bits in the bit planes of DPCM pixel values, the article proposes to use prediction of the volume of arithmetic code based on entropy and comparison of the obtained predicted value with the volume of run length code. The entropy is calculated based on the values of the number of repetitions of ones and zero symbols, which are obtained as intermediate results of the run length encoding. This does not require additional computational costs. It was found that in comparison with the adaptation of the combined encoder structure using direct determination of the arithmetic code volume of each bit plane of DPCM pixel values, the proposed encoder structure provides a significant reduction in computational complexity while maintaining high image compression ratios.

Keywords: combined coding, adaptive coding, arithmetic coding, run-length encoding, differential coding, image compression.

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

For citation. Sadiq B.J.S., Tsviatkou V.Yu., Bobov M.N. Adaptive combined image coding with prediction of arithmetic code volume. Doklady BGUIR. 2021; 19(2): 31-39.

Введение

Кодирование неподвижных цифровых изображений с целью сжатия остается актуальной проблемой с середины прошлого века. Одним из эффективных методов является арифметическое кодирование (АС – Arithmetic coding), основанное на работах Шеннона и Элайеса. В сочетании с вейвлет-преобразованием и контекстным моделированием АС обеспечивает высокие коэффициенты сжатия изображений в составе широко используемого кодера JPEG2000 [1]. Высокая эффективность АС достигается, прежде всего, за счет отдельного кодирования битовых плоскостей коэффициентов вейвлет-преобразования, при котором АС применяется для каждой битовой плоскости независимо, что, однако, приводит к росту вычислительной сложности в сравнении с многоразрядным АС значений вейвлет-коэффициентов. В этой связи поиск возможностей упрощения кодеров на основе АС является актуальной задачей.

Для снижения вычислительной сложности АС представляют интерес исключение или упрощение преобразования и комбинированное кодирование битовых плоскостей (использование наряду с АС простых кодеров, обеспечивающих равные или большие коэффициенты сжатия). Данный подход существенно отличается от гибридного

кодирования [2–5], при котором несколько известных кодеров применяются последовательно или строится новый кодер из элементов структуры нескольких известных кодеров. Используемые для построения современных гибридных кодеров базовые кодеры основаны на дискретных косинусном и вейвлет- преобразованиях, арифметическом, Хаффмана и фрактальном кодировании, прогнозировании, векторном квантовании и других подходах [6–9]. Все они имеют, как правило, высокую вычислительную сложность, что приводит к еще большему усложнению гибридного кодера. Комбинированную структуру имеет кодер JPEG-LS на основе модели LOCO-I (LOW COMplexity LOSSless COMpression for Images) [10], в котором для уменьшения вычислительной сложности применяется контекстное моделирование с кодированием Голомба или кодирование длин серий (RLE – Run-length encoding) [11] в зависимости от значений градиента изображения. Однако в JPEG-LS кодируются не битовые плоскости, а непосредственно значения пикселей без учета характера распределения бит в старших и младших битовых плоскостях.

Для комбинированного кодирования битовых плоскостей, ориентированного на снижение вычислительной сложности, представляют интерес преобразования двумерного пространства пикселей в одномерное (рекурсивные Гильберта и Мортон), сохраняющие или улучшающие корреляцию значений пикселей в одномерном представлении, дифференциальное кодирование значений пикселей (DPCM – Differential pulse-code modulation) [12], улучшающее распределение значений для кодирования старших битовых плоскостей, и кодирование длин серий RLE, обеспечивающее высокую компактность представления длинных последовательностей символов и имеющее минимальную вычислительную сложность. Комбинированное кодирование изображений в пространстве разностей значений пикселей, формируемых на основе DPCM, с закреплением элементарных AC- и RLE-кодеров за битовыми плоскостями позволяет существенно снизить вычислительную сложность в сравнении с арифметическим кодированием всех битовых плоскостей, однако проигрывает в коэффициенте сжатия комбинированному кодированию с подбором элементарных кодеров для битовых плоскостей. Это обусловлено различным характером зависимостей коэффициентов сжатия изображений различных типов от распределения бит в битовых плоскостях после выборки значений пикселей по линейному или рекурсивному закону и их дифференциального кодирования, что не позволяет подобрать универсальную комбинацию элементарных AC- и RLE-кодеров для изображений всех типов.

Целью работы является повышение эффективности комбинированного арифметического и длин серий кодирования битовых плоскостей DPCM-значений пикселей полутоновых изображений за счет адаптации структуры комбинированного кодера к распределению бит в битовых плоскостях.

Постановка задачи

При комбинированном кодировании матрица $I = \left\| i(y, x) \right\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ DPCM-значений пикселей размером $Y \times X$ с битовой глубиной R , полученная с помощью дифференциального кодирования, раскладывается на битовые плоскости $B(r) = \left\| b(r, y, x) \right\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$, где $r = \overline{0, R-1}$ – номер битовой плоскости; $i(y, x)$ – DPCM-значения, связанные со значениями соответствующих бит $b(r, y, x)$ битовых плоскостей с помощью выражения $i(y, x) = \sum_{r=0}^{R-1} 2^r b(r, y, x)$. Старшие битовые плоскости кодируются с помощью кодеров длин серий бит (DRB) и арифметических кодеров (DAB) битовых плоскостей DPCM-значений пикселей, а младшие – передаются без кодирования (DNC). Это позволяет повысить коэффициент сжатия по сравнению с арифметическим кодированием DPCM-значений пикселей (DA), но приводит к росту вычислительной сложности. При комбинированном кодировании с закреплением кодеров за битовыми плоскостями (DHB) комбинация элементарных кодеров DRB, DAB и DNC является постоянной и может быть подобрана

экспериментально для изображений некоторого типа. Это снижает эффективность комбинированного кодирования изображений других типов. Для устранения данного недостатка необходима адаптация структуры комбинированного кодера к кодируемым данным за счет выбора для каждой битовой плоскости элементарного кодера, обеспечивающего наибольший коэффициент сжатия, – кодирование с подбором элементарных кодеров (DSB). Такой выбор может быть сделан после кодирования с помощью DRB ($f_{DRB}(r)$) и DAB ($f_{DAB}(r)$) и определения объема V кода с учетом DNC ($f_{DNC}(r) = B(r)$): $V(f_{DRB}(r))$, $V(f_{DAB}(r))$, $V(f_{DNC}(r)) = YX$ (рис. 1). Результат $f_{DSB}(r)$ адаптивного комбинированного кодирования в этом случае для одной битовой плоскости определяется выражением

$$f_{DSB}(r) = \begin{cases} f_{DRB}(r) & \text{при } V(f_{DAB}(r)) \geq V(f_{DRB}(r)) < YX, \\ f_{DAB}(r) & \text{при } V(f_{DRB}(r)) > V(f_{DAB}(r)) < YX, \\ f_{DNC}(r) & \text{при } V(f_{DRB}(r)) \geq YX \leq V(f_{DAB}(r)). \end{cases} \quad (1)$$

Хотя DRB имеет низкую вычислительную сложность и может эффективно использоваться для оценки объема кода, DAB требует значительно больших вычислительных затрат. В результате DSB-кодер имеет более высокую вычислительную сложность по сравнению с DNB. Таким образом, актуальной задачей является прогнозирование объема арифметического кода с низкой вычислительной сложностью. Прогнозирование эффективно используется в кодировании изображений, но ориентировано на вычисление значений пикселей или коэффициентов преобразования на основе базовых значений с формированием матрицы ошибок, хорошо сжимаемой без потерь или с потерями.

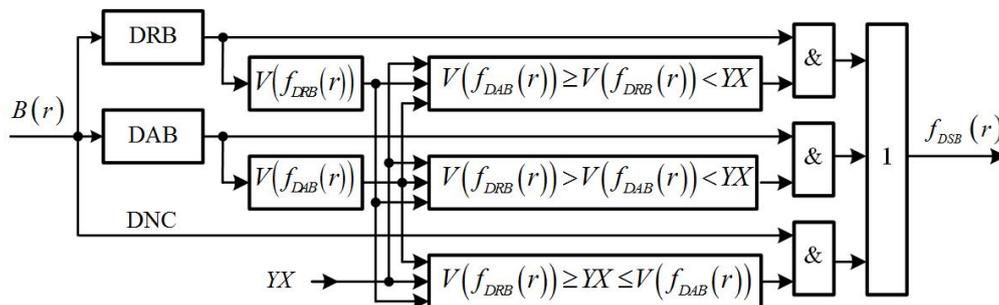


Рис. 1. Комбинированный кодер битовой плоскости с адаптацией на основе определения объема кода
Fig. 1. Combined bit-plane encoder with adaptation based on the definition of the code volume

Модель адаптивного комбинированного кодера

Предлагается математическая модель APCE (Arithmetic Prediction Combined Encoding) комбинированного длин серий и арифметического кодирования битовых плоскостей DPCM-значений пикселей полутоновых изображений с адаптацией к распределению бит в битовых плоскостях на основе прогнозирования объема арифметического кода ($f_{APCE}(r)$):

$$f_{APCE}(r) = \begin{cases} f_{DRB}(r) & \text{при } V_P(f_{DAB}(r)) \geq V(f_{DRB}(r)) < YX, \\ f_{DAB}(r) & \text{при } V(f_{DRB}(r)) > V_P(f_{DAB}(r)) < YX, \\ f_{DNC}(r) & \text{при } V(f_{DRB}(r)) \geq YX \leq V_P(f_{DAB}(r)), \end{cases} \quad (2)$$

где $V_P(f_{DAB}(r)) = YXH_{DAB}(r) + O_{DAB}(r)$ – прогнозный объем (бит) арифметического кода битовой плоскости $B(r)$; $H_{DAB}(r)$ – энтропия (бит/символ) арифметического кода; $O_{DAB}(r)$ – накладные расходы на арифметическое кодирование (в отличие от DRB они существенны).

В случае двоичного арифметического кодирования r -й битовой плоскости энтропия $H_{DAB}(r)$ определяется на основе вероятностей $P_0(r)$ и $P_1(r)$ нуля и единицы как

$$H_{DAB}(r) = -P_0(r) \log_2 P_0(r) - P_1(r) \log_2 P_1(r). \quad (3)$$

Вероятности $P_0(r)$ и $P_1(r)$ могут быть вычислены на основе результатов DRB-кодирования, представляющих последовательности длин серий нулей и единиц

$$f_{DRB}(r) = \left\{ \left\| l_0(r, s) \right\|_{(s=0, S_0(r)-1)}, \left\| l_1(r, s) \right\|_{(s=0, S_1(r)-1)} \right\}, \text{ с помощью выражений } P_0(r) = \frac{1}{YX} \sum_{s=0}^{S_0(r)-1} l_0(r, s),$$

$$P_1(r) = \frac{1}{YX} \sum_{s=0}^{S_1(r)-1} l_1(r, s), \text{ где } S_0(r) \text{ и } S_1(r) - \text{ число серий нулей и единиц в битовой плоскости } B(r).$$

Это не требует существенных вычислительных затрат и позволяет получить прогнозное значение $V_P(f_{DAB}(r))$ с низкой вычислительной сложностью для одной битовой плоскости

(рис. 2). Точные значения $O_{DAB}(r)$ вычисляются только после кодирования. Поэтому для прогнозирования $V_P(f_{DAB}(r))$ могут использоваться константы, зависящие от размера кодируемого изображения. Объем кода на выходе DRB определяется с помощью выражения

$$V(f_{DRB}(r)) = \sum_{s=0}^{S_0(r)-1} l_0(r, s) + \sum_{s=0}^{S_1(r)-1} l_1(r, s). \text{ В схеме на рис. 2 кодер DAB задействуется только}$$

при выполнении условия $V(f_{DRB}(r)) > V_P(f_{DAB}(r)) < YX$.

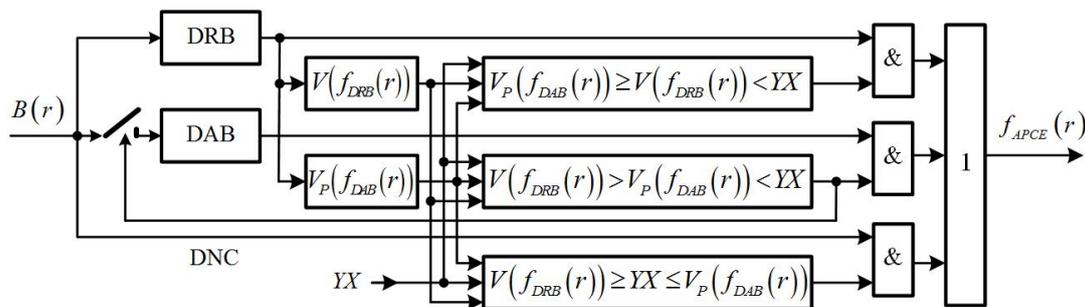


Рис. 2. Комбинированный кодер битовой плоскости с адаптацией на основе прогнозирования объема арифметического кода

Fig. 2. Combined bit-plane coder with adaptation based on prediction of arithmetic code volume

Структуры адаптивных комбинированных кодеров

На коэффициент сжатия изображения влияет порядок выборки пикселей. На рис. 3, а приведена структурная схема блока выборки пикселей исходного изображения $I_B = \left\| i_B(y, x) \right\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ по строкам (H), строкам и столбцам (HV) и развертке Гильберта (G)

(рис. 3, б) для вычисления DPCM-значений пикселей.

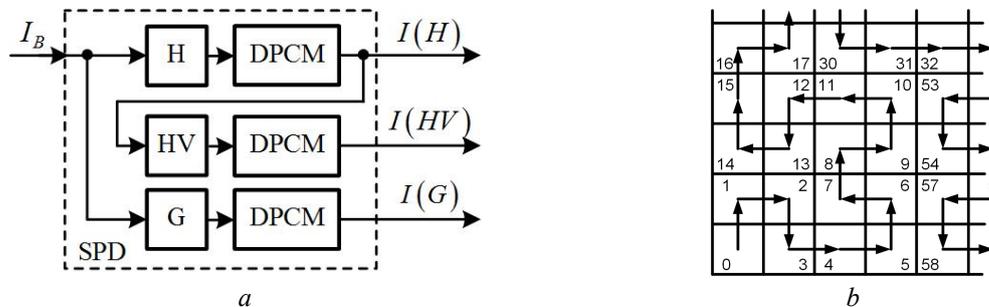


Рис. 3. Выборка и формирование DPCM-значений пикселей изображения:

а – структурная схема блока выборки пикселей; б – фрагмент траектории развертки Гильберта

Fig. 3. Sampling and formation of DPCM-values of image pixels:

а – block diagram of the pixel sampling unit; б – fragment of the Hilbert-scan trajectory

На основе модели APCE могут быть реализованы адаптивные кодеры с последовательной, параллельной и параллельно-последовательной структурами. Последовательная реализация имеет наибольшую временную и наименьшую структурную сложность, параллельная - наоборот. При любой реализации адаптивный кодер на основе модели APCE состоит из трех каскадов. В первом каскаде для каждой битовой плоскости $B(S,r)$ DPCM-значений пикселей и каждого способа их выборки $S = \{H, HV, G\}$ определяются лучший элементарный кодер $e(S,r) = \{DRB, DAB, DNC\}$ с учетом минимального объема кода $V(S,r) = \min(V(f_{DRB}(S,r)), V_P(f_{DAB}(S,r)), YX)$. Во втором каскаде определяются лучший способ выборки пикселей для формирования DPCM-значений $I(S)$, обеспечивающий минимальный объем кода $\min(V(S))$ при $S = \{H, HV, G\}$, и соответствующая конфигурация элементарных кодеров $E(S) = \|e(S,r)\|_{(r=0, R-1)}$, где $V(S) = \sum_{r=0}^{R-1} V(S,r)$ - объем кодов битовых плоскостей разностей пикселей. В третьем каскаде осуществляется комбинированное кодирование $f_{APCE}(I_B)$ DPCM-значений пикселей в соответствии с установленными комбинацией $E(S)$ элементарных кодеров и способом S выборки пикселей. На рис. 4, 5 приведена структура параллельно-последовательного APCE-кодера DPCM-значений пикселей изображения, формирующихся в блоке SPD после выборки (см. рис. 3, а).

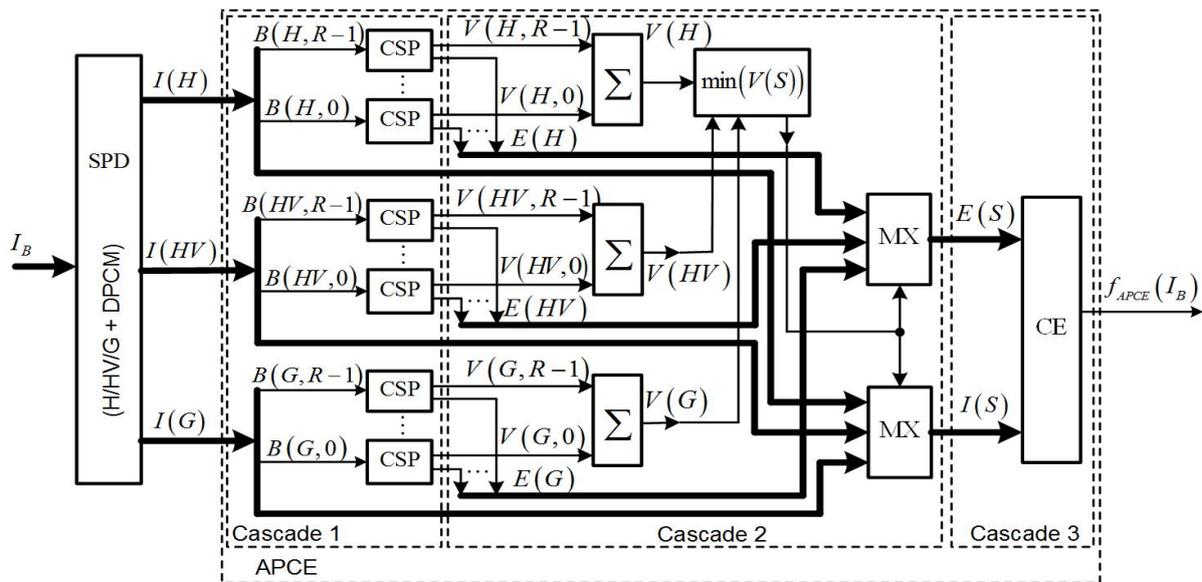


Рис. 4. Структура комбинированного APCE-кодера DPCM-значений пикселей изображения
Fig. 4. Structure of a combined APCE-encoder for DPCM-values of image pixels

DRB-кодирование в первом каскаде APCE-кодера и вычисления для принятия решений во втором каскаде выполняются параллельно, кодирование в третьем каскаде выполняется последовательно. В этом случае временная сложность обработки в первом и втором каскадах кодера пренебрежимо мала в сравнении с временной сложностью арифметического кодирования. При последовательной реализации APCE-кодера временная сложность обработки в первом и втором каскадах не превосходит временную сложность арифметического кодирования (временная сложность RLE на несколько порядков меньше временной сложности AC [13]). В этом случае нормированные относительно размера изображения значения временной (T_X) и структурной (S_X) сложностей X -кодеров (X - тип кодера: DA, DSB, APCE) без учета перестановок определяются с помощью выражений $T_{DA} = 1$; $S_{DA} = R$; $T_{DSB} = S_{DSB} = R$; $T_{APCE} = N_A + 1$; $S_{APCE} = 1$, где N_A - число битовых плоскостей, к которым применяется DAB-кодер.

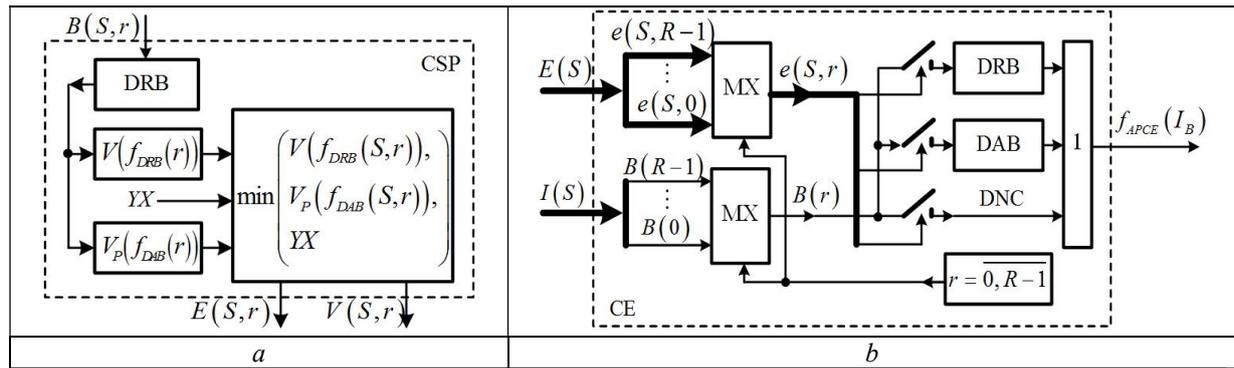


Рис. 5. Структуры блоков комбинированного APCE-кодера:
а – блок прогнозирования объема кода (CSP); б – блок комбинированного кодирования (CE)

Fig. 5. Block structures of combined APCE-encoder:
а – code volume prediction block (CSP); б – combined coding block (CE)

Оценка эффективности комбинированного кодирования изображений

В табл. 1 приведены коэффициенты CR_X сжатия без потерь 8-разрядных полутоновых изображений различных типов t (С – земной поверхности; Р – портретных; М – медицинских; R – тепловизионных) для кодеров различного вида X : $CR_{DA}(S)$ – DA; $CR_{\Sigma DAB}(S)$ – системы из R элементарных DAB-кодеров; CR_{DSB} – DSB; CR_{APCE} – APCE. Параметр S указывает на порядок выборки DPCM-значений пикселей: Н – по строкам; VH – по строкам и столбцам; G – по развертке Гильберта. В табл. 1 приведены комбинации элементарных кодеров для DSB и APCE, представленные последовательностями символов «А», «R» и «-», соответствующих элементарным кодерам DAB, DRB и DNC и расположенных слева на право в порядке убывания номеров битовых плоскостей; значения усредненных по битовым плоскостям удельных ошибок $\overline{E_{DAB}}(k)$ прогнозирования объема АС (байт/пиксель) для APCE-кодера,

определяемых с помощью выражения $\overline{E_{DAB}}(k) = \frac{1}{RYX} \sum_{r=0}^{R-1} V(f_{DAB}(r)) - V_P(f_{DAB}(r))$ (при $R=9$);

нормированные значения временной сложности T_{APCE} APCE-кодера. Из таблицы следует, что средняя по изображениям удельная ошибка $\overline{E_{DAB}}$ прогнозирования объема АС составляет

$\overline{E_{DAB}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \overline{E_{DAB}}(k) = 0,009459$ байт/пиксель. На основе $\overline{E_{DAB}}$ определены накладные расходы

$O_{DAB}(r)$ на АС, составляющие 39671, 9917, 2480 байт при $r = \overline{0, R-1}$ для изображений 2048×2048 , 1024×1024 , 512×512 пикселей соответственно. Значения $O_{DAB}(r)$ учтены при вычислении прогнозных объемов $V_P(f_{DAB}(r))$ АС битовых плоскостей DPCM-значений пикселей для принятия решения по выражению (2) во втором каскаде APCE-кодера. При одинаковой нормированной вычислительной сложности $R=9$, DSB-кодер обеспечивает больший коэффициент сжатия по сравнению с системой из 9 элементарных DAB-кодеров (выигрыш до 1,11 раза, в среднем в 1,02 раза) за счет применения DRB для кодирования старших битовых плоскостей. При этом DSB-кодер превосходит DA-кодер в коэффициенте сжатия (до 1,45 раза, в среднем в 1,32 раза), уступая ему во временной сложности в 9 раз. За счет прогнозирования объема АС на основе энтропии адаптивный APCE-кодер позволяет снизить временную сложность до 4,5 раз, в среднем в 2,2 раза, и пространственную сложность в 9 раз по сравнению с DSB-кодером. Однако за счет ошибки прогнозирования он обеспечивает меньший коэффициент сжатия по сравнению с DSB-кодером до 1,23 раза, в среднем в 1,02 раза. При этом APCE-кодер выигрывает в коэффициенте сжатия по сравнению с DA-кодером до 1,44 раза, в среднем в 1,32 раза, и в пространственной сложности в 9 раз, уступая ему во временной сложности до 6 раз, в среднем в 4,34 раза.

Таблица 1. Характеристики сжатия изображений
Table 1. Image compression characteristics

Изображение	$CR_{DA}(S)$	$CR_{DAB}(S)$	Комбинированное кодирование						
			S	DSB		APCE			
				Комбинация элементарных кодеров	CR_{DSB}	$\overline{E_{DAB}}(k) \times 10^{-6}$ (байт/пиксель)	Комбинация элементарных кодеров	CR_{APCE}	T_{APCE}
C1	1,14 (G)	1,62 (G)	G	-RRAAAA --	1,63	3345	-RRAAA ---	1,63	4
C2	1,17 (H)	1,66 (H)	H	-RRRAAA --	1,68	3833	-RRRAA ---	1,68	3
C3	1,04 (H)	1,47 (HV)	HV	-RRAAAA ---	1,48	3781	-RRAAAA ---	1,48	4
C4	1,01 (H)	1,42 (HV)	HV	-RRAAAA ---	1,43	3944	-RRAAAA ---	1,43	4
C5	1,20 (H)	1,70 (H)	H	-RRRAAA --	1,74	3907	-RRRRA ---	1,73	2
C6	1,10 (G)	1,53 (HV)	HV	-RRAAAA --	1,55	3933	-RRRAA ---	1,55	4
C7	1,05 (H)	1,47 (H)	H	-RRAAAA --	1,49	3847	-RRAAA ---	1,48	4
C8	1,09 (H)	1,54 (HV)	HV	-RRAAAA ---	1,56	3945	-RRAAAA ---	1,56	4
P1	1,13 (H)	1,57 (HV)	HV	-RAAAAA --	1,59	3730	-RRAAAA ---	1,58	4
P2	0,99 (H)	1,33 (HV)	HV	-AAAAAA --	1,33	2647	-RAAAA ---	1,33	5
P3	1,16 (G)	1,58 (H)	H	-RAAAA -RA	1,60	4032	-RAAA --AA	1,58	6
P4	1,07 (H)	1,37 (H)	H	-RAAAAA --	1,38	4501	-RRAAAA --	1,36	5
P5	1,06 (H)	1,48 (HV)	HV	-RRAAAA ---	1,50	4425	-RRAAAA ---	1,50	4
P6	1,08 (G)	1,46 (HV)	HV	AAAAAAAA	1,47	8918	-RRAAAA ---	1,45	4
P7	1,09 (H)	1,48 (H)	H	-RRAAAA ---	1,51	4241	-RRAAAA ---	1,51	4
P8	0,99 (G)	1,38 (G)	G	-RRRAA ---	1,39	4402	-RRAAAA ---	1,39	4
M1	1,46 (H)	1,95 (HV)	HV	-RRRAAAA -	1,99	3875	-RRRAAAA --	1,98	4
M2	1,43 (H)	1,91 (HV)	HV	-RRRAAAA -	1,95	2998	-RRRAAAA --	1,94	4
M3	2,07 (H)	2,56 (HV)	HV	ARRRAAAA	2,65	-770	ARRRAAAA -	2,52	6
M4	2,17 (H)	2,61 (HV)	HV	ARRRAAAA	2,67	-1010	ARRRAAAA -	2,53	6
M5	3,15 (H)	3,41 (HV)	HV	ARRRAAAA	3,58	3417	ARRRRRAA	3,55	5
M6	3,21 (H)	3,47 (HV)	HV	ARRRAAAA	3,64	3322	ARRRRRAA	3,63	5
M7	2,68 (H)	3,06 (HV)	HV	ARAARRAA	3,13	3601	ARRRRRA -	3,05	3
M8	4,33 (H)	4,54 (HV)	HV	ARRRRRAA	5,04	4371	ARRRRRAA	5,02	4
R1	1,09 (G)	1,41 (G)	G	-RAAAAA -	1,41	2845	-RAAAAA --	1,41	6
R2	1,18 (H)	1,56 (HV)	HV	-RRRAA ---	1,62	40260	-RRRAA ---	1,62	3
R3	1,22 (H)	1,60 (HV)	HV	-RRRAA ---	1,67	39638	-RRRAA ---	1,67	3
R4	1,14 (H)	1,48 (HV)	HV	-RRAAAA ---	1,51	40828	-RRAAAA ---	1,51	4
R5	1,16 (H)	1,50 (HV)	HV	-RRAAAA ---	1,54	39653	-RRAAAA --	1,54	5
R6	1,80 (H)	2,02 (H)	H	-RRRRRA --	2,19	24150	ARRRRRA -A	1,74	4
R7	1,15 (H)	1,39 (G)	G	-RAAAA ---	1,40	35021	-RAAAAA --	1,38	6
R8	1,15 (H)	1,45 (G)	G	-RAAAAA -	1,45	-1278	-RAAAAA --	1,45	6

Заключение

Предложена структура адаптивного комбинированного кодера сжатия без потерь полутоновых изображений на основе арифметического и длин серий кодирования битовых плоскостей DPCM-значений пикселей. Адаптация структуры комбинированного кодера к распределению бит в битовых плоскостях DPCM-значений пикселей основана на прогнозировании объема арифметического кода с использованием энтропии и сравнении полученного прогнозного значения с объемом кода длин серий. Это позволяет подобрать для каждой битовой плоскости DPCM-значений пикселей арифметический кодер или кодер длин серий, обеспечивающий максимальный коэффициент сжатия. Энтропия вычисляется на основе значений числа серий нулевых и единичных символов при кодировании длин серий, что не требует дополнительных вычислительных затрат. Прогнозирование объема арифметического кода на основе энтропии в адаптивном комбинированном кодере позволяет снизить временную сложность кодирования в среднем в 2,2 раза и пространственную сложность в 9 раз по сравнению с неадаптивным комбинированным кодированием при незначительном уменьшении коэффициента сжатия.

Список литературы / References

1. Marcellin M.W., Gormish M.J., Bilgin A., Boliek M.P. *An Overview of JPEG-2000. Proc. of IEEE Data Compression Conference.* 2000;523-541. DOI: 10.1109/DCC.2000.838192.
2. Xue S., Xu Y., Oelmann B. Hybrid Golomb codes for a group of quantised GG sources. *IEEE Proc. – Vision, Image and Signal Processing.* 2003;150(4):256-260. DOI: 10.1049/ip-vis:20030510.
3. Su C., Hsin H., Lin S. Wavelet tree classification and hybrid coding for image compression. *IEEE Proc. – Vision, Image and Signal Processing.* 2005;152(6):752-756. DOI: 10.1049/ip-vis:20050004.
4. Mukherjee D. Parameter Selection for Wyner-Ziv Coding of Laplacian Sources with Additive Laplacian or Gaussian Innovation. *IEEE Trans. on Signal Processing.* 2009;57(8):3208-3225.
5. Banerjee A., Halder A. An efficient image compression algorithm for almost dual-color image based on k-means clustering, bit-map generation and RLE. *2010 International Conference on Computer and Communication Technology (ICCCCT), Allahabad, Uttar Pradesh.* 2010:201-205. DOI: 10.1109/ICCCCT.2010.5640529.
6. Salman N.H., Rafea S. The Arithmetic Coding and Hybrid Discrete Wavelet and Cosine Transform Approaches in Image Compression. *Journal of Southwest Jiaotong University.* 2020;55(1):9.
7. Gahalot D., Mehra R. Huffman coding algorithm and DCT implementation for hybrid image compression on Matlab platform. *Pramana Research Journal.* 2019;9(11):53-61.
8. Xu C., Ye Y., Hu Z., Zou Y., Shen L., Liu X., Lu J. A primal-dual algorithm for robust fractal image coding. *Fractals.* 2019;27(7):14. DOI: 10.1142/S0218348X19501196.
9. Nag S. Vector quantization using the improved differential evolution algorithm for image compression. *Genetic Programming and Evolvable Machines.* 2019;20:187-212. DOI: 10.1007/s10710-019-09342-8.
10. Weinberger M.J., Seroussi G., Sapiro G. The LOCO-I lossless image compression algorithm: principles and standardization into JPEG-LS. *IEEE Transactions on Image Processing.* 2000;9(8):1309-1324.
11. Birajdar A., Agarwal H., Bolia M., Gupte V. Image Compression using Run Length Encoding and its Optimisation. *2019 Global Conference for Advancement in Technology (GCAT), Bangaluru, India.* 2019: 1-6.
12. Alias B., Mehra A., Harsha P. Hardware implementation and testing of effective DPCM image compression technique using multiple-LUT. *2014 International Conference on Advances in Electronics Computers and Communications, Bangalore.* 2014:1-4. DOI: 10.1109/ICAEECC.2014.7002433.
13. Al-Bahadily H.K., Altaay A.A.J., Tsviatkou V.U., Kanapelka V.K. New modified RLE algorithms to compress grayscale images with lossy and lossless compression. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications.* 2016;7(7):250-255. DOI: 10.14569/IJACSA.2016.070734.

Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.
All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Садик Б.Д.С., стажер кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

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

Бобов М.Н., д.т.н., профессор, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Sadiq B.J.S., Trainee at the Department of Infocommunications of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Tsviatkou V.Yu., D.Sc., Associate Professor, Head of the Department of Infocommunications of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bobov M.N., D.Sc., Professor, Professor at the Department of Infocommunications of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

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

Address for correspondence

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



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-2-40-48>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 530.122.1

ЗАВИСИМОСТЬ ДЕТЕКТИРУЕМОГО СИГНАЛА ОТ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СПУТНИКА В КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ S-LIGO-E2R

И.П. ОХРИМЕНКО, П.В. ПЕТРОВ., Н.Н. КОЛЬЧЕВСКИЙ

Белорусский государственный университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 2 октября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. В эксперименте детектирования гравитационных волн регистрируются изменения расстояний меньше чем $\sim 10^{-21}$. Эта особенность определяет минимальный размер экспериментальных установок данного назначения и частотный диапазон детектирования. Для расширения частотного диапазона и увеличения чувствительности гравитационных детекторов интерференционного типа необходимо значительно увеличивать линейные размеры детектора до размеров, сопоставимых с размерами Земли и даже ее превышающих. Республика Беларусь имеет опыт разработки, запуска и эксплуатации спутников, использование которых позволяет существенно увеличить линейные размеры гравитационного космического детектора. Рассматриваются системы спутников в качестве космического детектора гравитационных волн S-LIGO-N_xR-z_y. Космический детектор гравитационных волн S-LIGO-N_xR-z_y представляет собой систему лазерных интерферометров, состоящих из x числа спутников с заданными орбитами z типа на орбите планеты N Солнечной системы. В связи со сложным движением спутников интерферометры в такой системе аналогичны интерферометрам с подвижными зеркалами. Целью данной работы является исследование влияния кинематических параметров спутников на детектируемый сигнал в космических детекторах гравитационных волн S-LIGO-E2R-z₂. Конфигурация космического детектора определяет набор спутниковых орбит, направление и начальную фазу движения. Сигналы детектора зависят от мгновенного расстояния между спутниками и могут быть описаны в виде периодических функций. Получены уравнения, описывающие периодические изменения сигнала между спутниками в результате их относительного движения в зависимости от начальных условий запуска спутников. В работе рассмотрены общий случай для произвольных ориентированных орбит и два частных случая для коллинеарных и ортогональных круговых орбит для системы спутников в космических детекторах гравитационных волн S-LIGO-E2R-z₂-o и S-LIGO-E2R-z₂-p. Представлены графики зависимостей детектируемого сигнала от кинематических параметров спутников детекторов S-LIGO-E2R-z₂-o и S-LIGO-E2R-z₂-p. Показано, что детектируемые сигналы содержат участки нулевой интенсивности, а длительность и периодичность участков нулевой интенсивности связаны с кинематическими параметрами спутников.

Ключевые слова: гравитационные волны, спутниковые системы, интерферометры, космический детектор гравитационных волн.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Охрименко И.П., Петров П.В., Кольчевский Н.Н. Зависимость детектируемого сигнала от кинематических параметров спутника в космической системе S-LIGO-E2R. Доклады БГУИР. 2021; 19(2): 40-48.

DEPENDENCE OF THE DETECTED SIGNAL ON THE KINEMATIC PARAMETERS OF THE S-LIGO-E2R SPACE SYSTEM

IVAN P. OHRYMENKO, PAVEL V. PETROV, NICKOLAI N. KOLCHEVSKY

Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 2 October 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The changes of distances less than $\sim 10^{-21}$ are registered during the gravitational wave experiment. This feature determines the minimum size of experimental installations and the frequency range of gravitational wave detectors. To expand the frequency range and increase the sensitivity of gravitational interference detectors, it is necessary to increase the linear dimensions of the detector significantly as big as Earth and even more. The Republic of Belarus has experience in the development, launch and operation of satellites, the use of which can significantly increase the linear dimensions of the gravitational space detector. The satellite systems as a space detector of gravitational waves S-LIGO-NxR-zy are considered. The S-LIGO-NxR-zy space gravitational wave detector is a system of laser interferometers consisting of x number of satellites with given z -type orbits, in orbit of planet N of the solar system. The interferometers in such systems are identical to interferometers with oscillating mirrors due to the complex satellite motion. The purpose of this work is to study the influence of the kinematic parameters of satellites on the detected signal in the S-LIGO-E2R- z_2 system. The configuration of the space detector determines the set of satellite orbits, direction and initial phase of movement. The detector signals depend on the instantaneous distance between the satellites and can be described as periodic functions. There are obtained the equations that describe the periodic changes in the signal between satellites as a result of their relative motion, depending on the initial conditions for launching the satellites. The general case for arbitrary oriented orbits and two special cases for collinear and orthogonal circular orbits in space gravitational wave detectors S-LIGO-E2R- z_2 -p and S-LIGO-E2R- z_2 -o are considered in the paper. The graphs of the dependences of the detected signal on the kinematic parameters of the satellites of the detectors S-LIGO-E2R- z_2 -p and S-LIGO-E2R- z_2 -o are presented. It is shown that the detected signals contain sections of zero intensity, and the duration and frequency of sections of zero intensity are related to the kinematic parameters of satellites.

Keywords: gravitational waves, satellite systems, interferometers, space gravitational wave detector.

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

For citation. Ohrymenko I.P., Petrov P.V., Kolchevsky N.N. Dependence of the detected signal on the kinematic parameters of the satellite in the S-LIGO-E2R space system. Doklady BGUIR. 2021; 19(2): 40-48.

Введение

В наземной обсерватории LIGO (США), специально разработанной и построенной для детектирования гравитационных волн [1, 2], 14 сентября 2015 г. была зарегистрирована первая такая волна. Первое упоминание термина «гравитационная волна» (ГВ) обозначено в работе Пуанкаре [3], а первое заявление на экспериментальное подтверждение ГВ встречается в работах Дж. Вебера [4], в которых он утверждает, что зарегистрировал ГВ от космического источника в центре галактики с помощью детектора резонансного типа: алюминиевый цилиндр с высокоточными пьезодатчиками механических колебаний. Использование лазерных интерферометров для детектирования ГВ было впервые предложено в работе [5]. На основе этой работы был разработан, сконструирован и улучшен LIGO-детектор [6], Virgo, а также Японский детектор ГВ KAGRA [7]. На начало 2020 года детекторами ГВ зарегистрировано 67 событий, которые проходят дополнительную пост-проверку: официально подтверждена регистрация 11 ГВ, 56 – на стадии пост-обработки. На сегодняшний день ведутся разработки будущих наземных детекторов третьего поколения: IndIGO [8], Einstein Telescope [9] и Cosmic Explorer [10, 11], а также космических детекторов ГВ: DECIGO [12, 13], LISA [14, 15] и BBO

[16, 13]. Проекты LISA, DECIGO и BBO предполагают расположение спутников на околоземных орбитах – реализация таких детекторов в скором будущем затруднена. В связи с этим околоземные орбиты имеют большое преимущество в опыте и скорости реализации проектов. В космосе можно разместить гравитационный детектор, чувствительный к спектру ГВ, недоступных для LIGO-детекторов, размещенных на Земле. В Республике Беларусь освоено проектирование и изготовление изделий космической техники. Научно-конструкторское управление «Космос» в ОАО «Пеленг» занимается разработкой, проектированием и тестированием космических аппаратов (КА) и их полезной нагрузки для внешних и внутренних проектов. Республика Беларусь закрепила за собой статус космической державы после запуска первого собственного спутника «Белорусский космический аппарат» (БКА) 22 июля 2012 г. В 2018 году Белорусский государственный университет запустил собственный наноспутник, который стал третьим КА Республики Беларусь. 31 августа 2020 г. Президент Республики Беларусь подписал распоряжение о запуске второго научно-образовательного спутника Белорусского государственного университета в 2021 году.

Целью работы является исследование зависимости детектируемого сигнала от кинематических параметров спутников в рассматриваемых космических ГВ-детекторах S-LIGO-E2R-z2-о и S-LIGO-E2R-z2-р.

Кинематические параметры спутника в космической системе S-LIGO-NxR-zy

В Солнечной системе имеется множество естественных космических объектов с изученными кинематическими характеристиками – это ресурс, который можно и необходимо использовать для целей детектирования астрофизических ГВ. В качестве космического детектора ГВ рассматривается космическая измерительная система из N спутников с условным обозначением «S-LIGO-NxR-zy», где X – количество спутников Z типа (низкоорбитальные – L, среднеорбитальные – M, геостационарные – G или высокоэллиптические – H-орбиты), расположенных на Y – количестве орбит планеты наименования N (планета Земля – E). Рассматриваемый космический детектор может располагаться на орбитах планет Солнечной системы (СС), естественных спутниках планет СС или планетоидах в СС. Частным случаем модели детектора является система из двух спутников на околоземных орбитах различного типа S-LIGO-E2R-z2 (рис. 1, a).

В отличие от наземного детектирования ГВ со стационарным положением системы источник – детектор для космического детектора ГВ необходимо исследовать относительное движение системы спутников. Сигнал на детекторе космического интерферометра зависит от мгновенного расстояния между парой движущихся спутников и будет периодически изменяться.

Рассмотрим временную динамику сигнала между парой спутников для случая заданной высоты орбиты и произвольного угла наклона между плоскостями этих орбит. Мгновенное положение каждого спутника будет описываться в собственной двумерной орбитальной системе координат (СК) $x_{\Omega}Oy_{\Omega}$, центр которой совпадает с центром планеты, а плоскость совпадает с плоскостью орбиты. Выбор направления осей осуществляется следующим образом: сначала задается декартова СК XYZ планеты (рис. 1, b), где плоскость xOy совпадает с плоскостью экватора, а ось ординат направлена на точку весеннего равноденствия. Относительно СК планеты задается орбитальная СК спутника, ось абсцисс которой направляется в точку пересечения спутника с плоскостью экватора и считается нулевым углом положения спутника на орбите; остальные оси откладываются перпендикулярно оси абсцисс.

Параметрами, которые описывают мгновенное положение спутника в его СК, являются две координаты x_{Ω} и y_{Ω} , начальный угол положения спутника на орбите φ_0 и среднее движение спутника по орбите ω . Уравнения, описывающие мгновенное положение первого и второго спутника для произвольной орбиты, имеют следующий вид:

$$\begin{cases} x_{\Omega 1} = x_{01} \cos(\omega_1 t + \varphi_{01}) \\ y_{\Omega 1} = y_{01} \sin(\omega_1 t + \varphi_{01}) \\ z_{\Omega 1} = 0 \end{cases} \text{ и } \begin{cases} x_{\Omega 2} = x_{02} \cos(\omega_2 t + \varphi_{02}) \\ y_{\Omega 2} = y_{02} \sin(\omega_2 t + \varphi_{02}) \\ z_{\Omega 2} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где x_{01}, y_{01} – полуоси орбиты 1-го спутника, 1, 2 – номер спутника, ω_1 – среднее движение, φ_{01} – начальная фаза.

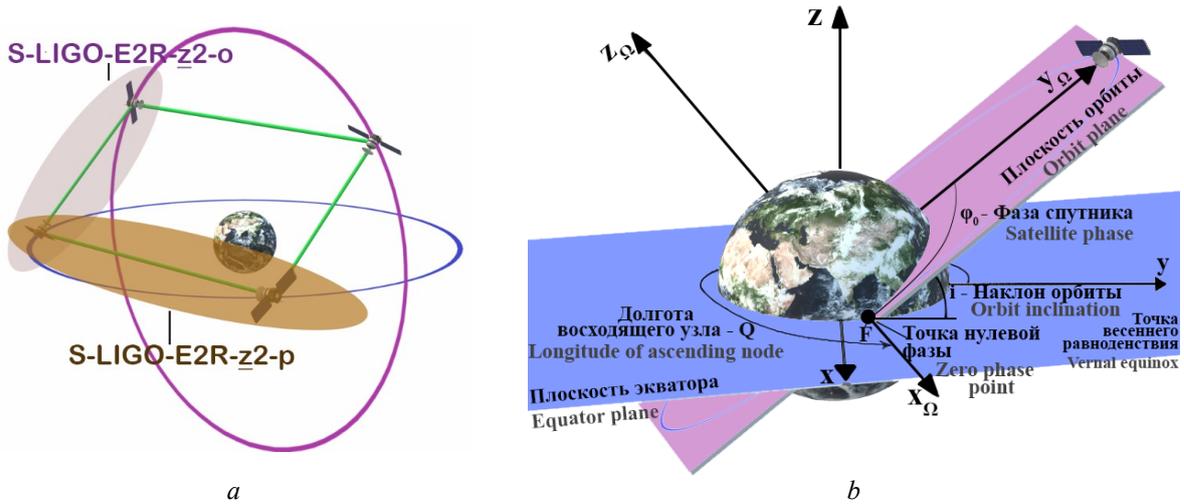


Рис. 1. Космические детекторы гравитационных волн S-LIGO-E2R-z2 (a); орбитальная система координат спутника $X_\Omega Y_\Omega Z_\Omega$ относительно заданной системы координат планеты XYZ (b)
Fig. 1. Space detector of gravitational waves S-LIGO-E2R-z2 (a); the satellite orbital coordinate system $X_\Omega Y_\Omega Z_\Omega$ relative to the planetary coordinate system XYZ given (b)

Тогда, используя матрицу поворота, координаты вектора мгновенного расстояния между парой спутников будут рассчитываться по следующей формуле:

$$r(t) = \begin{pmatrix} x_{01} \cos(\omega_1 t + \varphi_{01}) - x_{02} \cos(\omega_2 t + \varphi_{02}) \\ y_{01} \sin(\omega_1 t + \varphi_{01}) - y_{02} \cos(\alpha) \sin(\omega_2 t + \varphi_{02}) \\ - y_{02} \sin(\alpha) \sin(\omega_2 t + \varphi_{02}) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где α – произвольный угол между плоскостями орбит спутников.

Как говорилось ранее, мгновенное расстояние между спутниками $r(t)$ определяет величину детектируемого сигнала по формуле

$$I = \frac{I_0}{r(t)^2} = I_0 \left(\frac{1}{x_{01}^2 \cos^2(\varphi_{01} + \omega_1 t) - 2x_{01}x_{02} \cos(\varphi_{01} + \omega_1 t) \cos(\varphi_{02} + \omega_2 t) + x_{02}^2 \cos^2(\varphi_{02} + \omega_2 t)} + \frac{1}{y_{01}^2 \sin^2(\varphi_{01} + \omega_1 t) - 2y_{01}y_{02} \cos(\alpha) \sin(\varphi_{01} + \omega_1 t) \sin(\varphi_{02} + \omega_2 t) + y_{02}^2 \cos^2(\alpha) \sin^2(\varphi_{02} + \omega_2 t)} + \frac{1}{y_{02}^2 \sin^2(\alpha) \sin^2(\varphi_{02} + \omega_2 t)} \right). \quad (3)$$

Такая зависимость будет носить периодический характер и позволяет сделать вывод об угловом положении орбиты одного спутника относительно другого и определить кинематические характеристики движения спутника. Выражение (3) позволяет численно моделировать сигнал между двумя спутниками для последующего анализа. Анализируя полученный сигнал, можно решить задачу восстановления кинематических характеристик одного спутника относительно другого и угол между плоскостями их орбит.

Метод восстановления расстояния, кинематических характеристик из полученной временной зависимости интенсивности сигнала основывается на выявлении периодичности принимаемого сигнала, анализе функции мощности и амплитудно-частотной характеристики сигнала. Периодичность сигнала определяется параметрами орбиты спутников и направлением относительного движения. Интенсивность сигнала определяется увеличением расстояния $r(t)$ между спутниками, относительной ориентацией диаграммы направленности источника и детектора. Методы цифровой обработки сигналов (преобразование Фурье, фильтры) позволяют оперативно определять период и рассчитать амплитудно-частотную характеристику сигнала.

Рассмотрим частный случай общей задачи, а именно временную динамику сигнала между парой искусственных спутников Земли, движущихся на коллинеарных орбитах с учетом заданного направления движения и начального положения в системе космического детектора ГВ S-LIGO-E2R-z2-p. Спутники в данной системе будут описываться следующими параметрами: период обращения спутника T ; скорость спутника V ; радиус орбиты спутника R и угловое расстояние α , которое спутник прошел за время t ; направление относительного обращения и начальная фаза углового положения спутника φ_0 на орбите относительно точки нулевой фазы F . Скорость спутника V , период T и угол α рассчитываются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} V^2 &= gR = \frac{GM_p}{R}, \\ T &= \frac{2\pi R}{V} = \frac{2\pi R^2}{GM_p}, \\ \alpha &= \omega t = \pm \frac{2\pi t}{T} = \pm \frac{GM_p t}{R^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения для планеты, G – гравитационная постоянная, M_p – масса планеты, вокруг которой обращается спутник. Мгновенное положение двух спутников описываются следующими уравнениями:

$$\left\{ \begin{aligned} x_{\Omega 1} &= R_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_{01}) = R_1 \cos\left(\pm \frac{GM_p t}{R_1^2} + \varphi_{01}\right) \\ y_{\Omega 1} &= R_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_{01}) = R_1 \sin\left(\pm \frac{GM_p t}{R_1^2} + \varphi_{01}\right) \\ z_{\Omega 1} &= 0 \end{aligned} \right. \text{ и } \left\{ \begin{aligned} x_{\Omega 2} &= R_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_{02}) = R_2 \cos\left(\pm \frac{GM_p t}{R_2^2} + \varphi_{02}\right) \\ y_{\Omega 2} &= R_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_{02}) = R_2 \sin\left(\pm \frac{GM_p t}{R_2^2} + \varphi_{02}\right) \\ z_{\Omega 2} &= 0 \end{aligned} \right. , \quad (5)$$

где x_Ω , y_Ω , z_Ω – координаты положения спутника в пространстве в орбитальной СК, t – время, φ_0 – начальная фаза спутника, 1 и 2 – номер спутника.

Так как орбиты спутников лежат в одной плоскости, отличия в положении спутников заключаются в радиусах орбит и угловом расстоянии, которое они прошли за время t . Направление движения спутников может быть сонаправленным или разнонаправленным. В случае сонаправленного движения угол между спутниками зависит от времени и равен

$$\varphi(t) = \alpha_1 - \alpha_2 = \pm 2\pi t \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) = \pm GM_p \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) t, \quad (6)$$

где φ – угол между спутниками относительно центра системы координат (в данном случае совпадает с центром планеты). В случае, когда спутники обращаются в разных направлениях: один по часовой стрелке, а другой против, угол между спутниками определяется по формуле

$$\varphi(t) = \alpha_1 + \alpha_2 = \pm 2\pi t \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) = \pm GM_p \left(\frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} \right) t. \quad (7)$$

Тогда мгновенное расстояние $r(t)$ в случае, когда спутники движутся по коллинеарным орбитам, можно выразить по теореме косинусов через R_1 , R_2 и φ :

$$r(\varphi(t)) = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2 \cos \varphi} = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2 \cos \left(\pm GM_p \left(\frac{1}{R_1^2} \mp \frac{1}{R_2^2} \right) t \right)}. \quad (8)$$

Величина детектируемого сигнала примет следующий вид:

$$I(\varphi(t)) = \frac{I_0}{r(t)^2} = \frac{I_0}{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2 \cos \varphi} = \frac{I_0}{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2 \cos \left(\pm GM_p \left(\frac{1}{R_1^2} \mp \frac{1}{R_2^2} \right) t \right)}. \quad (9)$$

Используя выражение (7), можно выразить период зависимости $r(t)$ и соответственно период зависимости $I(t)$: период наступит, когда изменение угла φ составит 2π . Подставляя 2π в (7), получим период сигнала для сонаправленного и разнонаправленного движений спутников:

$$t_n^+ = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} = \frac{2\pi}{GM_p} \cdot \frac{R_1^2 R_2^2}{(R_2^2 - R_1^2)} \text{ и } t_n^- = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 + T_1} = \frac{2\pi}{GM_p} \cdot \frac{R_1^2 R_2^2}{(R_2^2 + R_1^2)}. \quad (10)$$

Пример расчета по формуле (9) показан на рис. 2. Из периодичности (7) следует периодичность временной зависимости сигнала (9). Максимальное значение (9) наступает тогда, когда (7) минимально, т. е. когда угол между спутниками φ равен нулю, спутники находятся на одной прямой, проходящей через центр Земли.

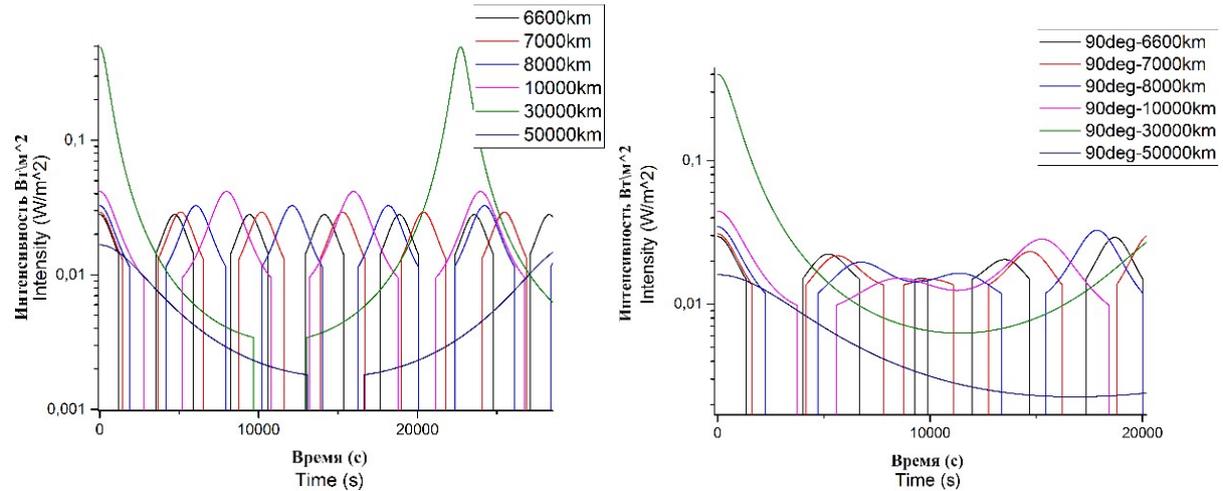


Рис. 2. Графики временной зависимости сигналов между двумя спутниками на различных орбитах для случаев ортогональных и совпадающих плоскостей орбит спутников в космическом детекторе гравитационных волн S-LIGO-E2R-z2

Fig. 2. Graphs of the signal time dependencies between two satellites on various orbits for collinear and orthogonal cases in space GW detector S-LIGO-E2R-z2

Рассмотрим другой частный случай общей задачи, а именно временную динамику сигнала между парой искусственных спутников Земли, движущихся на ортогональных орбитах с учетом начального положения в системе космического детектора ГВ S-LIGO-E2R-z2-о. Скорость спутника V , период T и среднее движение ω описываются формулами (4). Мгновенные положения спутников на ортогональных орбитах описываются следующими системами уравнений:

$$\begin{cases} x_{\Omega 1} = R_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_{01}) = R_1 \cos\left(\pm \frac{GM_p t}{R_1^2} + \varphi_{01}\right) \\ y_{\Omega 1} = R_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_{01}) = R_1 \sin\left(\pm \frac{GM_p t}{R_1^2} + \varphi_{01}\right) \\ z_{\Omega 1} = 0 \end{cases} \text{ и } \begin{cases} x_{\Omega 2} = R_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_{02}) = R_2 \cos\left(\pm \frac{GM_p t}{R_2^2} + \varphi_{02}\right) \\ y_{\Omega 2} = 0 \\ z_{\Omega 2} = R_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_{02}) = R_2 \sin\left(\pm \frac{GM_p t}{R_2^2} + \varphi_{02}\right) \end{cases} \quad (11)$$

Для ортогональных орбит мгновенное расстояние между спутниками $r(t)$ рассчитывается по формуле

$$r(t) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}. \quad (12)$$

Подставляя выражения из (11) в (12), получим окончательное выражение для $r(t)$:

$$r(t) = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1 R_2 \cos \omega_1 t \cos \omega_2 t} = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1 R_2 \cos\left(\pm \frac{GM_p t}{R_1^2}\right) \cos\left(\pm \frac{GM_p t}{R_2^2}\right)}. \quad (13)$$

Формула интенсивности сигнала между спутниками движущихся по ортогональным орбитам (3) примет следующий вид:

$$I(t) = \frac{I_0}{r(t)^2} = \frac{I_0}{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2 \cos \omega_1 t \cos \omega_2 t} = \frac{I_0}{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2 \cos \left(\pm \frac{GM_p t}{R_1^2} \right) \cos \left(\pm \frac{GM_p t}{R_2^2} \right)}. \quad (14)$$

Найдем период интенсивности сигнала для ортогональных спутников. Для удобства выберем условия начального положения так, что период наступает каждый раз, когда спутники находятся на минимальном расстоянии:

$$r(t) = |R_1 - R_2|. \quad (15)$$

Подставляя (15) в (13), определим условие периода:

$$|R_1 - R_2|^2 = r(t)^2 = \left(\sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2 \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t)} \right)^2, \\ 1 = \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) = \cos \left(\pm \frac{GM_p t}{R_1^2} \right) \cos \left(\pm \frac{GM_p t}{R_2^2} \right). \quad (16)$$

Решение (16) существует, когда оба косинуса одновременно равны 1 или -1:

$$\omega_2 t = \pi \cdot k \text{ и } \omega_1 t = \pi \cdot k, \text{ где } k = 0, 2, 4, \dots \quad (17)$$

$$\text{или } \omega_2 t = \pi \cdot l \text{ и } \omega_1 t = \pi \cdot l, \text{ где } l = 1, 3, 5, \dots \pm \frac{GM_p}{R_2^2} t = \pi \cdot k \text{ и } \pm \frac{GM_p}{R_1^2} t = \pi \cdot k, \text{ где } k = 0, 2, 4, \dots \quad (18)$$

$$\text{или } \pm \frac{GM_p}{R_2^2} t = \pi \cdot l \text{ и } \pm \frac{GM_p}{R_1^2} t = \pi \cdot l, \text{ где } l = 1, 3, 5, \dots$$

Расчеты на основе полученных формул показаны на рис. 2. Зависимость интенсивности принимаемого сигнала от времени имеет квазипериодичный характер, т.е. в строгом математическом смысле период сигнала огромен, но наблюдаемый сигнал содержит множество повторяемых участков, наблюдаемых при $r(t)$, близком к $|R_1 - R_2|$. В двух рассмотренных случаях, когда орбиты коллинеарны и ортогональны, будут происходить характерные события исчезновения сигнала, или моменты «нулевой интенсивности». Эти события обусловлены тем, что пара спутников, обращаясь вокруг земного геоида, на определенные моменты времени скрываются из прямой видимости друг друга. Для этого определим метод расчета нулевых интенсивностей.

В течение периода взаимного движения спутники и центр планеты образуют треугольник. Высота h пространственного треугольника, построенная из центра Земли, рассчитывается по формулам: 2

$$h = \frac{2S(t)}{\sqrt{r(t)^2}}, \quad S(t) = \frac{1}{2} R_1 R_2 \sin \theta, \quad \cos^2 \theta = \frac{r^2(t) - R_1^2 - R_2^2}{2 R_1 R_2}, \\ h = \frac{R_1 R_2 \sqrt{1 - \frac{r^2(t) - R_1^2 - R_2^2}{2 R_1 R_2}}}{\sqrt{r(t)^2}} = R_1 R_2 \sqrt{1 - \frac{r^2(t) - R_1^2 - R_2^2}{2 R_1 R_2}} = \\ = \left(\frac{1}{\frac{x_{01}^2 \cos^2(\varphi_{01} + \omega_1 t) - 2x_{01}x_{02} \cos(\varphi_{01} + \omega_1 t) \cos(\varphi_{02} + \omega_2 t) + x_{02}^2 \cos^2(\varphi_{02} + \omega_2 t) + y_{01}^2 \sin^2(\varphi_{01} + \omega_1 t)}{1} - \frac{1}{2y_{01}y_{02} \cos(\alpha) \sin(\varphi_{01} + \omega_1 t) \sin(\varphi_{02} + \omega_2 t) + y_{02}^2 \cos^2(\alpha) \sin^2(\varphi_{02} + \omega_2 t) + y_{02}^2 \sin^2(\alpha) \sin^2(\varphi_{02} + \omega_2 t)}} \right), \quad (19)$$

где $S(t)$ – площадь треугольника, h – высота треугольника, θ – угол между спутниками на момент времени t . Следовательно, если $h < R_3$, то спутники находятся вне зоны прямой видимости друг друга.

Спутники постоянно меняют свое положение в пространстве, высота треугольника также изменяется. Если высота треугольника меньше радиуса Земли R_3 и выполнено неравенство (20), то спутники находятся вне зоны прямой видимости друг друга и сигнал отсутствует:

$$2\pi - \theta_n < \theta < \theta_n, \theta_n = \arccos \frac{R_3}{R_2} + \arccos \frac{R_3}{R_1}. \quad (20)$$

Длительность и периодичность участков нулевой интенсивности позволяет однозначно идентифицировать источник сигнала и определить его кинематические характеристики.

Заключение

Космическое пространство является перспективным для размещения детекторов гравитационных волн максимальных размеров с целью расширения регистрируемого спектра чувствительности ГВ. В практическом аспекте наиболее доступным и быстрореализуемым вариантом развертывания космического детектора гравитационных волн является околоземное пространство. В рамках предложенной модели описания спутников космического детектора ГВ S-LIGO-NxR-zу рассмотрены общий случай для произвольных ориентированных орбит и два частных случая: при коллинеарных круговых орбитах космического детектора S-LIGO-E2R-z2-p и ортогональных круговых орбитах детектора S-LIGO-E2R-z2-o (рис. 1, а). По проведенным расчетам детектируемых сигналов для спутниковых систем S-LIGO-E2R-z2-o и S-LIGO-E2R-z2-p построены графики (рис. 2). В отсутствии гравитационной волны сигнал представляет сложную форму, содержащую периодические участки и участки нулевой интенсивности. Периодичность сигнала определяется кинематическими характеристиками спутников – добиться постоянного расстояния между спутниками можно только при равенстве орбит. Участки нулевой интенсивности свидетельствуют о взаимном расположении спутников и взаимном расположении плоскостей их орбит. Из приведенных графиков следует, что сигналы системы S-LIGO-E2R-z2-o имеют более высокую частоту в сравнении с S-LIGO-E2R-z2-p для схожих радиусов орбит. Периодический характер зависимости сигнала от относительного движения спутников может быть использован для восстановления кинематических параметров орбит спутников.

Список литературы / References

1. Abbot B.P., Abbot R., Abbot T.D. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger *Phys. Rev. Lett.* 2016;116 (iss. 6):061102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102.
2. Weiss R. Electromagnetically coupled broadband gravitational antenna *Quarterly Report of the Research Laboratory for Electronics.* 1972;105:54-76.
3. Poincare H. Sur la dynamique de l'électron. *Rend. Circ. Mat. Palermo.* 1906;21(ser. 1):129-176.
4. Weber J. Gravitational-wave-detector events. *Physical Review Letters.* 1968;20(iss. 23):1307-1308.
5. Gertsenshtein M.E., Pustovoit V.I. On the detection of low frequency gravitational waves. *JETP.* 1962;43(2):605-607.
6. Aasi J., Abbot B.P. The LIGO Scientific Collaboration. Advanced LIGO. *Class. Quantum Grav.* 2015;32:074001. DOI: 10.1088/0264-9381/32/7/074001.
7. Somiya K. Detector configuration of KAGRA – the Japanese cryogenic gravitational-wave detector. *Class. Quantum Grav.* 2012;29:124007.
8. Unnikrishnan C.S. IndIGO and LIGO-India: scope and plans for gravitational wave research and precision metrology in India. *Int J Mod Phys D.* 2013;22:1341010.
9. Hild S., Abernathy M., Acernese F. Sensitivity studies for third-generation gravitational wave observatories. *Class. Quantum Grav.* 2011;28(9). DOI: 10.1088/0264-9381/28/9/094013.
10. Reitze D.R., Adhikari X., Ballmer S. Cosmic Explorer: The U.S. Contribution to Gravitational-Wave Astronomy beyond LIGO. *Bulletin of the American Astronomical Society.* 2019;51(iss. 7, id. 35).
11. Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory. Instrument Science White Paper : LIGO-T1600119-v4: adopted 27.10.16. Cambridge: Technical Note: LIGO Scientific Collaboration, 2016: 116 p.
12. Kawamura S., Ando M., Nakamura T. The Japanese space gravitational wave antenna – DECIGO. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2008;122. DOI: 10.1088/1742-6596/122/1/012006.

13. Yagi K., Seto N. Detector configuration of DECIGO/BBO and identification of cosmological neutron-star binaries. *Phys. Rev. D.* 2011;83:20 p. DOI: 10.1103/PhysRevD.83.044011.
14. Danzmann K. *Laser Interferometer Space Antenna: A proposal in response to the ESA call for L3 mission concepts.* Hannover: Albert Einstein Institute; 2017.
15. Jenrich O., Binetruy P., Colpi M. *NGO, Revealing a hidden Universe: opening a new chapter of discovery (New Gravitational wave Observatory): Assessment Study Report.* Paris: European Space Agency; 2011; 153 p. № ESA/SRE (2011) 19.
16. Harry G.M., Fritschel P., Shaddock D.A., Folkner W., Phinney E.S. Laser interferometry for the Big Bang Observer. *Class. Quantum Grav.* 2006;23:4887-4894. DOI: 10.1088/0264-9381/23/15/008.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Охрименко И.П., магистр ф.-м.н., аспирант кафедры физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета.

Петров П.В., старший преподаватель кафедры физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета.

Кольчевский Н.Н., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета.

Information about the authors

Ohrymenko I.P., M.Sc, Postgraduate student at the Department of Physical Electronics and Nanotechnologies of Belarusian State University.

Petrov P.V., Senior Lecturer at the Department of Physical Electronics and Nanotechnologies of Belarusian State University.

Kolchevsky N.N., PhD, Associate Professor at the Department of Physical Electronics and Nanotechnologies of Belarusian State University.

Адрес для корреспонденции

220131, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Мирошниченко, 53-173;
тел. +375-29-348-46-22;
e-mail: ivan.ohrymenko@gmail.com
Охрименко Иван Петрович

Address for correspondence

220131, Republic of Belarus,
Minsk, Miroshnichenko str., 53-173;
tel. +375-29-348-46-22;
e-mail: ivan.ohrymenko@gmail.com
Ohrymenko Ivan Petrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-2-49-57>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396

МОДЕЛЬ И БАЗОВЫЙ АЛГОРИТМ ДЛИТЕЛЬНОГО КОГЕРЕНТНОГО НАКОПЛЕНИЯ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА ПРИ НЕНУЛЕВЫХ ВЫСШИХ ПРОИЗВОДНЫХ ДАЛЬНОСТИ ДО РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ЦЕЛИ

С.В. КОЗЛОВ, ЛЕ ВАН КЫОНГ

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

Поступила в редакцию 16 ноября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Цель работы заключалась в обосновании математической модели отраженного от движущихся радиолокационных целей сигнала при времени его наблюдения, определяющем необходимость учета миграции дальности и ее производных до третьего порядка включительно и миграции доплеровской частоты, и базового алгоритма длительного когерентного накопления отраженного сигнала. Алгоритм предусматривает вычисление отсчетов спектров «быстрого», в пределах каждого периода повторения, времени, выравнивание фаз отсчетов спектров путем умножения на корректирующие фазовые множители, определяемые предполагаемыми параметрами движения цели и номером периода повторения, суммирование спектральных отсчетов в «медленном» времени, умножение результата на комплексную частотную характеристику согласованного фильтра одиночного сигнала и выполнение обратного преобразования Фурье. Работоспособность алгоритма проиллюстрирована результатами компьютерного моделирования.

Ключевые слова: длительное когерентное накопление, миграция дальности, миграция доплеровской частоты, радиальная скорость, ускорение, производная ускорения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Козлов С.В., Ле Ван Кыонг. Модель и базовый алгоритм длительного когерентного накопления отраженного сигнала при ненулевых высших производных дальности до радиолокационной цели. Доклады БГУИР. 2021; 19(2): 49-57.

MODEL AND LONG-TERM COHERENT ACCUMULATION BASIC ALGORITHM FOR THE REFLECTED SIGNAL WITH NON-ZERO HIGHER DERIVATIVE RANGE TO RADAR TARGET

SERGEI V. KOZLOV, LE VAN CUONG

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

Submitted 16 November 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The purpose of the work was to substantiate a mathematical model of the signal reflected from moving radar target at the time of its observation, which determines the need to take into account the range migration and its derivatives up to the third order, inclusive, and the Doppler frequency migration, and the basic algorithm of long-term coherent accumulation for the reflected signal. The algorithm provides for the calculation of the “fast” spectra samples, within each repetition period, time, the phase alignment of the spectra samples by multiplying by the correcting phase factors determined by the expected parameters of the target movement and the number of the repetition period, the summation of the spectral samples in the “slow” time, the multiplication of the result by complex frequency response of a matched filter of a single signal and performing an inverse Fourier transform. The performance of the algorithm is illustrated by the results of computer simulation.

Keywords: long-term coherent accumulation, range migration, Doppler frequency migration, radial velocity, acceleration, acceleration derivative.

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

For citation. Kozlov S.V., Le Van Cuong. Model and long-term coherent accumulation basic algorithm for the reflected signal with non-zero higher derivative range to radar target. Doklady BGUIR. 2021; 19(2): 49-57.

Введение

Для обеспечения требуемой дальности обнаружения объектов радиолокационного наблюдения с малыми значениями эффективной площади рассеяния необходимо использовать длительное когерентное накопление (КН) отраженного сигнала (ОС). В процессе длительного КН такие параметры ОС, как время задержки и доплеровский сдвиг частоты, могут существенно изменяться. Особенно сильно это будет проявляться при использовании широкополосных зондирующих сигналов с шириной спектра десятки – сотни мегагерц.

Для трехкоординатных радиолокационных станций (РЛС) обнаружения и сопровождения воздушных объектов при характерном времени когерентного накопления $T_{\text{КН}}$ единицы – десятки миллисекунд и ширине спектра зондирующего сигнала (ЗС) $\Delta f_0 = 1 \dots 10$ МГц радиолокационные цели, имеющие максимальные модули радиальной скорости $|V_r| < 3\text{М}$ и радиального ускорения $|a_r| < 3g$, где g – ускорение свободного падения, как правило, остаются в пределах одного элемента разрешения по дальности, $|V_r| T_{\text{КН}} < \Delta r$, где $\Delta r = c / (2\Delta f_0)$ – разрешающая способность по дальности; c – скорость света. Модуль изменения $\delta V = \left| a_r T_{\text{КН}} + a'_r T_{\text{КН}}^2 / 2 \right|$, где a'_r – производная радиального ускорения, их радиальной скорости за время наблюдения существенно меньше разрешающей способности $\delta V \ll \Delta V = \lambda / (2T_{\text{КН}})$ по радиальной скорости, где $\lambda = c / f_0$ – длина волны, f_0 – несущая частота. Это определяет возможность использования классических процедур КН ОС [1].

При КН сигнала, отраженного от радиолокационной цели (РЦ), имеющей, например, $V_r = 50$ м/с, $a_r = 30$ м/с², $a'_r = 1$ м/с³ (беспилотный летательный аппарат, совершающий маневр)

при $T_{\text{кн}}=1$ с, изменение дальности, радиальной скорости и ускорения за время наблюдения составят $\delta r = 65,2$ м, $\delta V = 30,5$ м/с, $\delta a = 0,5$ м/с². При $\lambda = 0,1$ м, $\Delta f_0 = 100$ МГц отраженные сигналы в процессе наблюдения будут перемещаться (мигрировать) в пределах 43 элементов разрешения по дальности и 610 элементов разрешения по радиальной скорости. Поэтому КН с использованием классических процедур оказывается невозможным. Указанные явления соответствуют линейной миграции дальности (ЛМД), возникающей при $|V_r| T_{\text{кн}} > \Delta r$, квадратичной (КвМД) и кубической (КубМД) миграции дальности, возникающих при $|a_r| T_{\text{кн}}^2 / 2 > \Delta r$ и $|a_r| T_{\text{кн}}^3 / 6 > \Delta r$, в сочетании с миграцией доплеровской частоты (МДЧ), причиной которой являются отличные от нуля радиальное ускорение цели и производная ускорения при $|a_r T_{\text{кн}} + a_r' T_{\text{кн}}^2 / 2| T_{\text{кн}}^2 / 2 > \Delta V$.

Алгоритмы обнаружения целей в условиях миграции дальности (МД) и МДЧ рассматривались в [2–7]. Для случая ЛМД в [2] предложены достаточно эффективные алгоритмы обработки, но для РЦ, движущихся с ненулевыми высшими производными дальности, КвМД, КубМД и МДЧ не устраняются. В [3, 4] рассмотрены алгоритмы обработки сигналов в бортовых радиолокационных системах при наблюдении высокоскоростных летательных аппаратов. Используемые допущения верны для относительно низкой разрешающей способности по дальности и небольшом (0,1...0,2 с) времени КН. Компенсация ЛМД реализуется не полностью, а квадратичная и кубическая миграция дальности не устраняется. В [5] представлена структура накопителя с учетом высокой скорости и ненулевого ускорения цели, а также выражение для расчета его весовых коэффициентов без дальнейшей конкретизации алгоритма многоканальной обработки. В [6] приведен вариант алгоритма замкового камня, позволяющий реализовать фактически одноканальный приемник при наличии ЛМД, однако возможности использования данного алгоритма при наличии КвМД и КубМД не оценивались. В [7] приведен вариант оценки параметров движения РЦ на основе разности фаз спектральных отсчетов второго порядка, но его использование сопровождается снижением вероятности правильного обнаружения РЦ, а сама процедура оценки является достаточно сложной.

Таким образом, в настоящее время отсутствует модель ОС и алгоритмы обработки, обеспечивающие длительное КН ОС при ненулевых высших производных дальности до цели. Обоснование указанных модели и алгоритма обработки и является целью настоящей статьи.

Модель отраженного сигнала

Полагаем, что РЛС излучает когерентную пачку из $k = \overline{0, K-1}$, где K – число импульсов в пачке, линейно частотно-модулированных (ЛЧМ) импульсов с длительностью импульсов T_0 , периодом повторения $T_r = \text{const}$ и моментами излучения $t_k = kT_r$. Нормированная комплексная огибающая пачки зондирующих сигналов

$$\dot{S}_{\text{зс}}(\tau, k) = \text{rect} \left[\frac{\tau - kT_r}{T_0} \right] e^{j\pi\mu\tau^2} e^{j2\pi f_0(t_k + \tau)}, \quad (1)$$

где $\mu = \Delta f_0 / T_0$ – скорость изменения частоты; f_0 – начальная частота ЛЧМ-импульсов; $\text{rect}[x] = 1, 0 \leq x \leq 1$. Для упрощения выкладок начальная фаза пачки принята нулевой. Общая длительность наблюдения $T_{\text{кн}} = KT_r$. В (1) t_k – это «медленное» время, которое изменяется от периода повторения к периоду повторения, τ – «быстрое» время в пределах одного периода повторения. При цифровой обработке быстрое время принимает дискретные значения $\tau = t_m = m / F_s$, где $m = \overline{0, M-1}$, M – число отсчетов на каждом интервале наблюдения в «быстром» времени; F_s – частота дискретизации. Отметим, что случай $T_0 = T_r$ соответствует РЛС непрерывного излучения с частотной модуляцией по пилообразному закону.

Примем, что РЦ представляет собой один локальный центр отражения (блестящую точку) на дальности $r(t)$, изменяющейся на интервале наблюдения как

$$r(t) = r_0 + V_{0r}t + \frac{1}{2}a_r t^2 + \frac{1}{6}a_r' t^3, \quad (2)$$

где r_0, V_{0r}, a_r, a_r' – начальная дальность, начальная радиальная скорость, радиальное ускорение и скорость изменения радиального ускорения цели. Традиционная для радиолокации модель ОС после переноса на видеочастоту и дискретизации может быть записана в виде

$$\dot{S}(t_m, t_k) = \text{rect} \left[\frac{t_m - t_z(t_k + t_m)}{T_0} \right] e^{j\pi\omega(t_m - t_z(t_k + t_m))^2} e^{-j2\pi f_0 t_z(t_k + t_m)}, \quad (3)$$

где

$$t_z(t) = \frac{2r(t)}{c} \quad (4)$$

– время задержки ОС. Модель (3), (4) является достаточно точной для традиционных областей радиолокации.

Получим более точную модель принимаемого ОС, учитывающую движение цели с ненулевыми высшими производными дальности на достаточно большом интервале КН. Для этого запишем принимаемый сигнал относительно текущего времени $t = t_k + \tau, \tau \in [0, T_r]$. Если ОС в k -м периоде повторения принимается в момент времени $t = t_{izl} + 2\Delta t_1$, где Δt_1 – время распространения ЗС до цели как в прямом, так и в обратном направлении; $t_{izl} \in [t_k, t_k + T_0]$, то он был излучен в момент времени $t_{izl}(t)$, который можно найти из уравнения $c\Delta t_1 = r(t_{izl}(t) + \Delta t_1)$, откуда

$$c \frac{t - t_{izl}(t)}{2} = r \left(\frac{t_{izl}(t)}{2} + \frac{t}{2} \right). \quad (5)$$

Решение (5) определяет зависимость $t_{izl}(t)$ времени излучения сигнала от текущего времени t наблюдения. Перепишем (5) в явном виде:

$$c \frac{t - t_{izl}(t)}{2} = r_0 + \frac{1}{2}V_{0r}(t_{izl}(t) + t) + \frac{1}{8}a_r(t_{izl}(t) + t)^2 + \frac{1}{48}a_r'(t_{izl}(t) + t)^3. \quad (6)$$

Уравнение (6) является кубическим относительно $t_{izl}(t)$. После приведения к каноническому виду оно может быть решено по формулам Кардано или путем тригонометрического разложения Виета. Однако получающееся решение при этом оказывается весьма громоздким и малоприменимым для анализа. В этой связи для нахождения $t_{izl}(t)$ целесообразно использовать численные методы. Закон изменения фазы принимаемого сигнала

$$\varphi(t) = 2\pi f_0 t_{izl}(t). \quad (7)$$

Зная $t_{izl}(t)$ и $\varphi(t)$, запишем принимаемый сигнал после переноса на видеочастоту и дискретизации в виде

$$\dot{S}(t_m, t_k) = \text{rect} \left[\frac{t_{izl}(t_m + t_k) - t_k}{T_0} \right] e^{j\pi\omega(t_{izl}(t_m + t_k) - t_k)^2} e^{j2\pi f_0(t_{izl}(t_m + t_k) - t_k - t_m)}. \quad (8)$$

Выражение (8) представляет собой точную математическую модель ОС. Сравнение (3) и (8) показывает их отличие по аргументу времени как для огибающей, так и для фазы на величину $\delta = t_m - t_z(t_k + t_m) - (t_{izl}(t_m + t_k) - t_k) = t_k + t_m - t_z(t_k + t_m) - t_{izl}(t_m + t_k)$.

В табл. 1 для некоторых комбинаций параметров r_0, V_{0r}, a_r при $a_r' = 0$ приведены результаты расчетов величины $\delta(t)$, $t = t_k + t_m$ для значений $t = 0$ и $t = T_{\text{кн}} = 1$ с.

Таблица 1. Различия по времени задержки для традиционной и точной модели
Table 1. Differences in delay time for traditional and exact model

r_0 , км	V_{0r} , м/с	a_r , м/с ²	$\delta(0)$, нс	$\delta(T_{\text{кн}})$, нс	$\delta(T_{\text{кн}}) - \delta(0)$, нс	r_0 , км	V_{0r} , м/с	a_r , м/с ²	$\delta(0)$, нс	$\delta(T_{\text{кн}})$, нс	$\delta(T_{\text{кн}}) - \delta(0)$, нс
300	-500	0	3,333	3,328	-0,005	900	-500	0	10	9,994	-0,006
		-50	3,333	3,660	0,327			-50	9,999	10,992	0,993
		-100	3,333	3,992	0,659			-100	9,997	11,99	1,993
		-150	3,333	4,325	0,992			-150	9,996	12,987	2,991
	-3000	0	20	19,8	-0,2		-3000	0	60,001	59,801	-0,2
		-50	20	20,128	0,128			-50	59,999	60,794	0,795
		-100	20	20,456	0,456			-100	59,998	61,788	1,79
		-150	20	20,784	0,784			-150	59,996	62,781	2,785

Как следует из табл. 1, при начальной дальности до цели порядка сотен километров традиционная и точная модели практически совпадают за исключением смещения времени задержки для традиционной модели. Это смещение вызвано пренебрежением расстоянием, проходимым целью при ненулевой радиальной скорости цели за время прохождения электромагнитных волн от РЛС до цели в традиционной модели.

Наиболее существенным является разность $\delta(T_{\text{кн}}) - \delta(0)$, которая будет определять набег фазы $\delta\varphi = 2\pi f_0 [\delta(T_{\text{кн}}) - \delta(0)]$ ОС в сравнении с опорным (определяемым временем задержки для традиционной модели) на интервале радиолокационного контакта с целью. Так, например, при $r_0 = 900$ км, $V_{0r} = -500$ м/с; $a_r = a'_r = 0$ и несущей частоте $f_0 = 10$ ГГц получим $\delta\varphi = 2\pi f_0 [\delta(T_{\text{кн}}) - \delta(0)] = -21,6^\circ$. Полученная величина малосущественна с позиций КН. В то же время при $V_{0r} = -3000$ м/с получим $\delta\varphi = 2\pi f_0 [\delta(T_{\text{кн}}) - \delta(0)] = -720^\circ$, то есть, начиная с четверти интервала когерентного накопления (в данном случае 0,25 с), фазы отраженного и опорного сигнала окажутся противоположными. Для повышения точности введем поправочный сдвиг по времени δt , так что скорректированная временная задержка в (4)

$$t_{zc} = \frac{2r(t - \delta t)}{c} = \frac{2r(t - r(t)/c)}{c}, \quad (9)$$

где $\delta t \approx r(t)/c$ – величина поправки в первом приближении.

Получим выражение для t_{zc} , пренебрегая во временной поправке третьей производной по дальности $\delta t \approx r_0/c + V_{0r}t/c + a_r t^2/2c$:

$$t_{zc}(t) \approx \frac{2}{c} \left(r_0 + V_{0r}(t - \delta t) + \frac{1}{2} a_r (t - \delta t)^2 + \frac{1}{6} a'_r (t - \delta t)^3 \right) = \frac{2r_c(t)}{c}, \quad (10)$$

где

$$r_c(t) = r_{0c} + V_{0rc}t + \frac{1}{2} a_{rc}t^2 + \frac{1}{6} a'_{rc}t^3 \quad (11)$$

– скорректированный закон изменения дальности;

$$r_{0c} = r_0 - V_{0r} \frac{r_0}{c} + a_r \frac{r_0^2}{2c^2} - a'_r \frac{r_0^3}{6c^3}; V_{0rc} = V_{0r} - \frac{1}{c} (V_{0r}^2 + a_r r_0) + \frac{1}{c^2} \left(a'_r \frac{r_0^2}{2} + a_r V_{0r} r_0 \right) - \frac{V_{0r} a'_r r_0^2}{2c^3};$$

$$a_{rc} = a_r - \frac{1}{c} (3V_{0r} a_r + a'_r r_0) + \frac{1}{c^2} (V_{0r}^2 a_r + a_r^2 r_0 + 2V_{0r} a'_r r_0) - \frac{1}{c^3} (V_{0r}^2 a'_r r_0 - a_r a'_r r_0^2); \quad (12)$$

$$a'_{rc} = a'_r - \frac{1}{c} (3a_r^2 + 3V_{0r} a'_r) + \frac{1}{c^2} (3V_{0r} a_r^2 + 3a_r a'_r r_0 + 3V_{0r}^2 a'_r) - \frac{1}{c^3} (V_{0r}^3 a'_r - 3V_{0r} a_r a'_r r_0),$$

– скорректированные начальная дальность, радиальная скорость, радиальное ускорение и производная радиального ускорения закона (10). При этом в (10) отброшены члены, содержащие степени времени больше трех.

Модуль ошибки $|\delta(t)|$ для традиционной модели (3) с поправленным значением временной задержки (10), (11) при $t \leq 1$ с и предельного случая $|V_{0r}| < 30$ М, $|a_r| < 15$ г при наблюдении искусственного спутника Земли [8] не превышает 5 пс, при этом модуль разности $|\delta(T_{\text{кн}}) - \delta(0)|$ не превышает 0,3 пс. Эти временные различия практически несущественны для метрового, дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн. Таким образом, временная структура сигнала, отраженного от цели с законом движения (2), полностью эквивалентна временной структуре (3) с учетом (11) сигнала, отраженного от цели с начальными параметрами r_{0c} , V_{0rc} , a_{rc} , a'_{rc} , которые определяются (12). Величина поправок является относительно небольшой, но существенной с позиций длительного когерентного накопления. Так, например, для $r_0 = 900$ км, $V_{0r} = -3000$ м/с, $a_r = -150$ м/с², $a'_r = 0$ получим $r_{0c} = 900,009$ км, $V_{0rc} = -2999,58$ м/с, $a_{rc} = -150,004$ м/с², $a'_{rc} = -0,0002$ м/с³, т. е. наиболее существенно изменились два первых параметра движения цели. Отметим, что, например, при $f_0 = 10$ ГГц и $T_{\text{кн}} = 1$ с разрешающая способность по скорости составит $\Delta V = c / (2f_0 T_{\text{кн}}) = 0,015$ м/с, что существенно превышает величину $V_{0rc} - V_{0r} = 0,42$ м/с. Очевидно, что из полученных оценок \hat{r}_{0c} , \hat{V}_{0rc} , \hat{a}_{rc} , \hat{a}'_{rc} и (12) могут быть вычислены истинные параметры движения РЦ.

Рассмотрим далее трансформацию формы одиночного отраженного сигнала: изменение его длительности и закона модуляции. Временные задержки ОС по переднему и заднему фронту k -го импульса составят: $t_{1k} = \frac{2r_c(kT_r)}{c}$; $t_{2k} = \frac{2r_c(kT_r + T_0)}{c}$, а длительность k -го импульса пачки $T_k = t_k + T_0 + t_{2k} - (t_k + t_{1k}) = T_0 + \frac{2}{c} \left[V_{0rc} T_0 + \frac{1}{2} a_{rc} ((kT_r)^2 - (kT_r + T_0)^2) + \frac{1}{6} a'_{rc} ((kT_r)^3 - (kT_r + T_0)^3) \right]$.

Для всех характерных случаев можно принять $T_k = T_0$, т. е. не учитывать изменение длительности одиночного сигнала. Изменение закона модуляции может иметь место, если за время T_0 цель перемещается на расстояние, большее, чем разрешающая способность по дальности $|V_{0r} T_0 + a_r T_0^2 / 2 + a'_r T_0^3 / 6| > c / 2\Delta f_0$. Примем, что $|V_{0r}| \gg |a_r| T_0$, т. е. будем учитывать только начальную радиальную скорость. Запишем временное представление отраженного от одной блестящей точки сигнала при нулевом начальном времени задержки:

$$\dot{S}(t) = e^{j\pi\mu(t-t_{zc}(t))^2} = e^{j\pi\mu(t-V_\tau t)^2} = e^{j\pi\mu(1-V_\tau)^2 t^2} = e^{j\pi\mu_c t^2}, \quad (13)$$

где $V_\tau = 2V_{0rc} / c$ – скорость изменения времени задержки; $\tau_z(t) = V_\tau t$ – закон изменения времени задержки при нулевом временном сдвиге; $\mu_c = \mu(1-V_\tau)^2$ – скорректированная скорость изменения частоты ЛЧМ-сигнала.

Фаза ОС (с учетом приближений $(t_k + t_m)^2 \approx t_k^2 + 2t_k t_m$; $(t_k + t_m)^3 \approx t_k^3 + 3t_k^2 t_m$) составит $\varphi(m, k) = -4\pi \frac{f_0}{c} r_c(t_k + t_m) = -\psi_k - 4\pi \frac{f_0}{c} V_{dk} t_m$, где $\psi_k = 4\pi \frac{f_0}{c} \left(r_{0k} + V_{0rk} t_k + \frac{1}{2} a_{rc} t_k^2 + \frac{1}{6} a'_{rc} t_k^3 \right)$;
 $V_{dk} = V_{0rc} + a_{rc} t_k + \frac{1}{2} a'_{rc} t_k^2$ (14)

– начальная фаза и доплеровская скорость цели для k -го импульса пачки.

Использованные приближения основаны на том, что даже при достаточно длинных импульсах (единицы миллисекунд) и физически реализуемых радиальных ускорениях (десятки г) перемещение цели за время длительности импульса, обусловленного ускорением, не превысит долей миллиметра. Например, при $a_r = 10g = 100$ м/с², $T_0 = 1$ мс получим $a_r T_0^2 / 2 = 0,05$ мм.

Таким образом, временное представление (модель) ОС может быть записано в виде

$$\dot{S}(t_m, t_k) = S_0 \text{rect} \left[\frac{1}{T_0} (t_m - \tau_k) \right] e^{j\pi\mu_c (t_m - \tau_k)} e^{-j\psi_k} e^{-j4\pi \frac{f_0}{c} V_{dk} t_m}, \quad (15)$$

где $\tau_k = t_{zc}(t_k)$ – время задержки k -го импульса пачки.

Выполним сжатие каждого из импульсов пачки с использованием согласованного фильтра (СФ) одиночного импульса со скоростью изменения частоты μ_c , постоянной задержки фильтра $t_{cf} = T_0$ [1, с. 144], настроенного на доплеровский сдвиг частоты F_{cf} . После СФ принимаемый сигнал с точностью до начальной фазы запишется в виде

$$\dot{S}_{сж}(t_m, t_k) = A_k \text{sinc} \left\{ \Delta f_0 \left[t_m - T_0 + \frac{F_{D_k} - F_{cf}}{\mu_c} - \tau_k \right] \right\} \times e^{-j\psi'_k} e^{-j\frac{4\pi f_0}{c} V_{d_k} t_m}, \quad (16)$$

где $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x) / \pi x$; $\psi'_k = \psi_k - 4\pi \frac{f_0}{c} r_{0k}$, $A_k = S_0 T_0 \Delta f_0 (1 - |F_{D_k} - F_{cf}| / \Delta f_0)$ – амплитуды отраженных импульсов после СФ с учетом доплеровского сдвига частоты $F_{D_k} = -2V_{d_k} / \lambda = F_{0D} - 2a_{rc} t_k / \lambda - a'_{rc} t_k^2 / \lambda$ – доплеровский сдвиг частоты k -го импульса пачки ОС; $F_{0D} = -2V_{0rc} / \lambda$ – начальный доплеровский сдвиг частоты; $\lambda = c / f_0$ – длина волны. Величина $(F_{D_k} - F_{cf}) / \mu_c$ в аргументе $\text{sinc}(x)$ отражает изменение положения максимума сжатого ЛЧМ-сигнала в зависимости от разницы доплеровского сдвига частоты и частоты настройки СФ.

Как видно из (16), положения t_k^{\max} максимумов огибающих сжатых сигналов составляют $t_k^{\max} = T_0 - \frac{F_{0D}}{\mu_c} + \frac{2r_{0c}}{c} + \frac{2}{c} (V_{0rc} + \frac{f_0}{\mu_c} a_{rc}) t_k + \frac{1}{c} (a_{rc} + \frac{f_0}{\mu_c} a'_{rc}) t_k^2 + \frac{1}{3c} a'_{rc} t_k^3 + \frac{c F_{cf}}{2\mu_c}$ и изменяются кубически в медленном времени, фазы максимумов изменяются по закону $-\psi_k - 4\pi \frac{f_0}{c} V_{d_k} t_k^{\max}$. Когерентное накопление ОС может быть достигнуто только при устранении миграций дальности и частоты.

Выполним преобразование Фурье $\text{FFT}\{\bullet\}$ над $\dot{S}_{сж}(t_m, t_k)$ по переменной t_m быстрого времени. В соответствии с теоремой о спектрах получим:

$$\dot{G}_{сж}(F, t_k) = A_k e^{-j\psi'_k} \text{FFT} \left\{ \text{sinc}(\Delta f_0 (t_m - t_k^{\max})) e^{-j\frac{4\pi f_0}{c} V_{d_k} t_m} \right\} = A_k e^{-j\psi'_k} e^{-j2\pi(F - F_{D_k}) t_k^{\max}}. \quad (17)$$

Спектры $\dot{G}_{сж}(F, t_k)$ отличны от нуля при $-\Delta f_0 / 2 \leq F + (F_{D_k} + F_{cf}) \leq \Delta f_0 / 2$. Выражение (17) для спектра сигналов на выходе СФ определяет возможный алгоритм обработки.

Базовый алгоритм когерентного накопления

С учетом линейности операций прямого и обратного преобразования Фурье при когерентном накоплении сигнала с заданными значениями скорости, ускорения и производной ускорения необходимо обеспечить синфазное сложение спектров с учетом коррекции миграций дальности и частоты и умножить результат на комплексную частотную характеристику согласованного фильтра:

$$\dot{G}_{\Sigma}(F) = \dot{G}_{cf}(F) \sum_{k=0}^{K-1} \dot{Q}(F, k) \dot{G}(F, t_k), \quad (18)$$

где $\dot{G}_{cf}(F) = F \left\{ S_{3c}^*(T_0 - t) e^{-j2\pi F_{cf}(T_0 - t)} \right\}$ – комплексная частотная характеристика (КЧХ) СФ, настроенного на доплеровский сдвиг частоты F_{cf} ;

$$\dot{Q}(F, k) = \underbrace{e^{j\frac{4\pi f_0}{c} V_{0s} t_k} e^{j\frac{2\pi f_0}{c} a_s t_k^2} e^{j\frac{2\pi f_0}{3c} a'_s t_k^3}}_{\text{компенсация МЧ}} \times e^{\underbrace{j\frac{4\pi}{c} \left(F + \frac{2f_0(V_{0s} + a_s t_k + \frac{1}{2} a'_s t_k^2) \right)}{c} \left(\left(V_{0r} + \frac{f_0}{\mu_c} a_s \right) t_k + \frac{1}{2} \left(a_s + \frac{f_0}{\mu_c} a'_s \right) t_k^2 + \frac{1}{6} a'_s t_k^3 + \frac{c F_{cf}}{2\mu_c} \right)}_{\text{компенсация МД}}} \quad (19)$$

– фазовая функция, обеспечивающая компенсацию миграции по дальности и частоте и выравнивание фаз спектров для k -го импульса пачки; V_{0s} , a_s , a'_s – опорные значения

начальной радиальной скорости цели, начального радиального ускорения и производной ускорения $V_{0s} \approx V_{0rc}$, $a_s \approx a_{rc}$, $a'_s \approx a'_{rc}$. Выходной сигнал канала дальности находится обратным (IFFT) преобразованием Фурье:

$$\dot{Y}(t) = \text{IFFT} \{ \dot{G}_\Sigma(F) \}. \quad (20)$$

Работоспособность алгоритма оценивалась методом компьютерного моделирования. На рис. 1 приведена иллюстрация процесса обработки принимаемого сигнала предлагаемым алгоритмом для одного из характерных случаев. Рис. 1, а соответствует результату внутрипериодной обработки импульсов ОС. Сжатые сигналы распределены по оси задержки неравномерно в соответствии с заданными параметрами движения цели. Рис. 1, б соответствует случаю устранения миграции дальности и частоты согласно (18) (без суммирования спектров) с последующей реализацией обратного преобразования Фурье. Видно, что положения максимумов всех сжатых импульсов на оси временных задержек совпадают. Кроме того, их фазы одинаковы. Результат когерентного сложения в число импульсов раз больше, чем амплитуда первого импульса пачки (рис. 1, в).

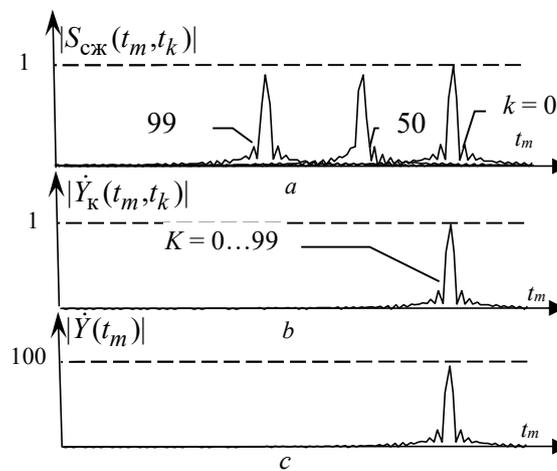


Рис. 1. Иллюстрация миграции по дальности, ее компенсации и когерентного накопления для базового алгоритма

Fig. 1. Illustration of range migration, its compensation and coherent accumulation for the basic algorithm

Выводы

Предлагаемые точная и приближенная модели позволяют воспроизвести и с требуемой точностью описать структуру отраженного сигнала во временной и спектральной области при длительном когерентном накоплении и ненулевых высших производных дальности до радиолокационной цели. Базовый алгоритм КН позволяет устранять миграцию дальности и ее производных в спектральной области и обеспечить накопление отраженного сигнала без потерь. Его основным недостатком является большое число каналов обработки. Для снижения числа каналов обработки необходимо обоснование быстрых процедур длительного КН с высоким естественным параллелизмом.

Список литературы

1. Охрименко А. Е. *Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч. 1. Основы радиолокации.* Москва: Военное издательство Министерства обороны СССР; 1983.
2. Чепкасов А.В., Сухоплюев А.В. Радиолокационный прием пачки импульсов большой длительности при обнаружении движущихся целей. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей».* 2019;1:30-34.
3. Ильчук А.Р., Синицын И.А., Цветков О.Е. Алгоритмы обработки сигналов, отраженных от высокоскоростных летательных аппаратов, в бортовых радиолокационных системах. *Информационно-измерительные и управляющие системы.* 2014;7:16-23.

4. Ильчук А.Р., Меркулов В.И., Юрчик И.А. Особенности обнаружения сигналов в бортовых РЛС при наблюдении интенсивно маневрирующих целей. *Радиотехника*. 2004;10:63-67.
5. Архипов М. Ю., Николаев А. П. Алгоритмы накопления радиолокационных сигналов, отраженных от высокоскоростной цели. *Антенны*. 2013;1:57-61.
6. Mark A. Richards. The Keystone transformation for correcting range migration in range-Doppler processing. Available at <http://users.ece.gatech.edu/mrichard/Keystone.pdf>; March 2014.
7. Jin K., Lai T., Wang Y., Li G., Zhao Y. Coherent Integration for Radar High-Speed Maneuvering Target Based on Frequency-Domain Second-Order Phase Difference. *Electronics*. 2019;8:287.
8. Саврасов Ю.С. *Алгоритмы и программы в радиолокации*. Москва: Радио и связь;1985.

References

1. Okhrimenko A. E. [*Fundamentals of radar and electronic warfare. Part 1. Basic of radar*]. Moscow: Military publishing house of the Ministry of Defense of the USSR;1983. (In Russ.)
2. Chepkasov A.V., Sukhoplyuev A.V. [Radar reception of a burst of pulses of long duration when moving targets are detected]. *Bulletin of the Concern ADS «Almaz - Antey»*. 2019;1:30-34. (In Russ.)
3. Ilchuk A.R., Sinitsyn I.A. [Algorithms for processing signals reflected from high-speed aircraft in on-board radar systems]. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2014;7:16-23. (In Russ.)
4. Ilchuk A.R., Merkulov V.I., Yurchik I.A. [Features of signal detection in airborne radars when observing intensively maneuvering targets]. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2004;10:63-67. (In Russ.)
5. Arkhipov M. Yu., Nikolaev A. P. [Algorithms for the accumulation of radar signals reflected from a high-speed target]. *Antenny = Antennas*. 2013;1:57-61. (In Russ.)
6. Mark A. Richards. The Keystone transformation for correcting range migration in range-Doppler processing. Available at <http://users.ece.gatech.edu/mrichard/Keystone.pdf>; March 2014.
7. Jin K., Lai T., Wang Y., Li G., Zhao Y. Coherent Integration for Radar High-Speed Maneuvering Target Based on Frequency-Domain Second-Order Phase Difference. *Electronics*. 2019;8:287
8. Savrasov Yu.S. [*Radar algorithms and programs*]. Moscow: Radio and communications; 1985. (In Russ.)

Вклад авторов

Козлов С.В. разработал постановку задачи и выполнил анализ полученных результатов.
Ле Ван Кыонг разработал модель отраженного сигнала, базовый алгоритм когерентного накопления и провел математическое моделирование.

Author's contribution

Kozlov S.V. developed a problem statement and performed an analysis of the results obtained.
Le Van Cuong developed a model of the reflected signal, a basic coherent accumulation algorithm and carried out mathematical modeling.

Сведения об авторах

Козлов С.В., д.т.н., доцент, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ле Ван Кыонг, аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Kozlov S.V., D.Sc., Associate professor, Professor at the Information Radioengineering Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Le Van Cuong, Postgraduate student at the Information Radioengineering Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-17-293-20-73;
e-mail: kozlov@bsuir.by

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-17-293-20-73;
e-mail: kozlov@bsuir.by

Козлов Сергей Вячеславович

Kozlov Sergei Vyacheslavovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-2-58-64>

Original paper

УДК 519.237

TOTAL PROBABILITY FORMULA FOR VECTOR GAUSSIAN DISTRIBUTIONS

VLADIMIR S. MUKHA, NANCY F. KAKO

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

Submitted 19 November 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The total probability formula for continuous random variables is the integral of product of two probability density functions that defines the unconditional probability density function from the conditional one. The need for calculation of such integrals arises in many applications, for instant, in statistical decision theory. The statistical decision theory attracts attention due to the ability to formulate the problems in a strict mathematical form. One of the technical problems solved by the statistical decision theory is the problem of dual control that requires calculation of integrals connected with the multivariate probability distributions. The necessary integrals are not available in the literature. One theorem on the total probability formula for vector Gaussian distributions was published by the authors earlier. In this paper we repeat this theorem and prove a new theorem that uses more familiar form of the initial data and has more familiar form of the result. The new form of the theorem allows us to obtain the unconditional mathematical expectation and the unconditional variance-covariance matrix very simply. We also confirm the new theorem by direct calculation for the case of the simple linear regression.

Keywords: total probability formula, vector Gaussian distribution, multivariate integrals, multivariate regression.

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

For citation. Mukha V.S., Kako N.F. Total probability formula for vector Gaussian distributions. Doklady BGUIR. 2021; 19(2): 58-64.

Introduction

The total probability formula for continuous random variables is the integral transformation that transforms the conditional probability density function to the unconditional. The integral transformations of the continuous probability distribution are used in the statistical decision theory [1, 2] and, particularly, in dual control theory [3]. To date, we do not have the required table integrals for multivariate probability distributions [4–6]. The multivariate (vector) normal or Gaussian distribution is of interest that is often used to describe, might approximately, different sets of random variables.

The random vector $\Xi^T = (\Xi_1, \Xi_2, \dots, \Xi_{k_\Xi})$ with k_Ξ components is distributed according to the normal or Gaussian law if its probability density function has the form

$$f(\xi) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_\Xi} |d_\Xi|}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\xi - v_\Xi)^T d_\Xi^{-1}(\xi - v_\Xi)\right), \quad \xi \in E^{k_\Xi}, \quad (1)$$

where $\xi^T = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{k_{\Xi}})$ is vector-row of the arguments of the probability density function $f(\xi)$, $v_{\Xi}^T = (v_{\Xi,1}, v_{\Xi,2}, \dots, v_{\Xi,k_{\Xi}})$ is the vector-row of the parameters of the probability density function $f(\xi)$, $d_{\Xi} = (d_{\Xi,i,j})$, $i, j = \overline{1, k_{\Xi}}$, is the symmetric positive-definite matrix of the parameters of the probability density $f(\xi)$, d_{Ξ}^{-1} is the matrix inverse to the matrix d_{Ξ} , $|d_{\Xi}|$ is the determinant of the matrix d_{Ξ} , $E^{k_{\Xi}}$ is the k_{Ξ} -dimensional Euclidean space, symbol T means transpose. The parameters v_{Ξ} and d_{Ξ} of the distribution (1) are mathematical expectation and variance-covariance matrix of the random vector Ξ respectively [7, 8].

In work [9] there was published the following theorem connected with the vector Gaussian distribution (1).

Theorem 1. (The total probability formula for vector Gaussian distributions). Let $\Xi^T = (\Xi_1, \Xi_2, \dots, \Xi_{k_{\Xi}})$ be a row random vector with k_{Ξ} components, $X^T = (X_1, X_2, \dots, X_{k_X})$ be a row random vector with k_X components, $f(\xi)$ be the probability density of the vector Ξ , $f(x/\xi)$ be the condition probability density of the vector X , $E^{k_{\Xi}}$ be the k_{Ξ} -dimensional Euclidean space. If in the total probability formula

$$f(x) = \int_{E^{k_{\Xi}}} f(x/\xi) f(\xi) d\xi, \quad (2)$$

the probability density $f(x/\xi)$ is represented in the form

$$f(x/\xi) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_X} |d_X|}} \exp\left(-\frac{1}{2} \xi^T S \xi + V^T \xi - \frac{1}{2} W\right) \quad (3)$$

and the probability density $f(\xi)$ is represented in the form

$$f(\xi) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_{\Xi}} |d_{\Xi}|}} \exp\left(-\frac{1}{2} \xi^T d_{\Xi}^{-1} \xi + v_{\Xi}^T d_{\Xi}^{-1} \xi - \frac{1}{2} v_{\Xi}^T d_{\Xi}^{-1} v_{\Xi}\right), \quad (4)$$

then integral (2) (the total probability formula) is defined by the following expression:

$$f(x) = \int_{E^{k_{\Xi}}} f(x/\xi) f(\xi) d\xi = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_X} |d_{\Xi}| |A| |d_X|}} \exp\left(\frac{1}{2} B^T A^{-1} B - \frac{1}{2} C\right), \quad (5)$$

where

$$A = d_{\Xi}^{-1} + S, \quad (6)$$

$$B = d_{\Xi}^{-1} v_{\Xi} + V, \quad (7)$$

$$C = v_{\Xi}^T d_{\Xi}^{-1} v_{\Xi} + W. \quad (8)$$

In addition to the theorem 1, we will prove the following theorem 2 which can be more useful in some application compared with the theorem 1.

The new theorem on the total probability formula for vector Gaussian distributions

Theorem 2. Let $\Xi^T = (\Xi_1, \Xi_2, \dots, \Xi_{k_{\Xi}})$ be a random row vector with k_{Ξ} components, $X^T = (X_1, X_2, \dots, X_{k_X})$ be a random row vector with k_X components, $f(\xi)$ be the probability density function of the vector Ξ , $f(x/\xi)$ be the condition probability density function of the vector X , $E^{k_{\Xi}}$ be the k_{Ξ} -dimensional Euclidean space. If in the total probability formula

$$f(x) = \int_{E^{k_{\Xi}}} f(x/\xi) f(\xi) d\xi, \quad (9)$$

the probability density function $f(x/\xi)$ has the form

$$f(x/\xi) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_X} |d_X|}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x-h\xi)^T d_X^{-1}(x-h\xi)\right), \quad (10)$$

where $h = (h_{i,j})$, $i = \overline{1, k_X}$, $j = \overline{1, k_{\Xi}}$, is the $(k_X \times k_{\Xi})$ -matrix, and the probability density function $f(\xi)$ has the form

$$f(\xi) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_{\Xi}} |d_{\Xi}|}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\xi^T - v_{\Xi}^T) d_{\Xi}^{-1}(\xi - v_{\Xi})\right),$$

then integral (9) (the total probability formula) is defined by the following expression:

$$f(x) = \int_{E^{k_{\Xi}}} f(x/\xi) f(\xi) d\xi = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_X} |D_X|}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x-hv_{\Xi})^T D_X^{-1}(x-hv_{\Xi})\right), \quad (11)$$

where $D_X = d_X + hd_{\Xi}h^T$.

Proof. We will use the theorem 1 and represent the functions $f(x/\xi)$ and $f(\xi)$ in the form (3), (4) respectively:

$$\begin{aligned} f(\xi) &= \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_{\Xi}} |d_{\Xi}|}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\xi^T - v_{\Xi}^T) d_{\Xi}^{-1}(\xi - v_{\Xi})\right) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_{\Xi}} |d_{\Xi}|}} \exp\left(-\frac{1}{2}\xi^T d_{\Xi}^{-1}\xi + v_{\Xi}^T d_{\Xi}^{-1}\xi - \frac{1}{2}v_{\Xi}^T d_{\Xi}^{-1}v_{\Xi}\right), \\ f(x/\xi) &= \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_X} |d_X|}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x-h\xi)^T d_X^{-1}(x-h\xi)\right) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_X} |d_X|}} \exp\left(-\frac{1}{2}x^T d_X^{-1}x + x^T d_X^{-1}h\xi - \frac{1}{2}\xi^T h^T d_X^{-1}h\xi\right). \end{aligned}$$

In accordance with the theorem 1 we have the following notations:

$$S = h^T d_X^{-1}h, \quad V^T = x^T d_X^{-1}h, \quad W = x^T d_X^{-1}x.$$

Then in the formulas (5)–(8)

$$\begin{aligned} A &= d_{\Xi}^{-1} + S = d_{\Xi}^{-1} + h^T d_X^{-1}h, \\ B &= d_{\Xi}^{-1}v_{\Xi} + V = d_{\Xi}^{-1}v_{\Xi} + h^T d_X^{-1}x, \quad B^T = v_{\Xi}^T d_{\Xi}^{-1} + x^T d_X^{-1}h, \\ C &= v_{\Xi}^T d_{\Xi}^{-1}v_{\Xi} + W = v_{\Xi}^T d_{\Xi}^{-1}v_{\Xi} + x^T d_X^{-1}x, \\ B^T A^{-1}B &= (v_{\Xi}^T d_{\Xi}^{-1} + x^T d_X^{-1}h)A^{-1}(d_{\Xi}^{-1}v_{\Xi} + h^T d_X^{-1}x) = \\ &= v_{\Xi}^T d_{\Xi}^{-1}A^{-1}d_{\Xi}^{-1}v_{\Xi} + 2x^T d_X^{-1}hA^{-1}d_{\Xi}^{-1}v_{\Xi} + x^T d_X^{-1}hA^{-1}h^T d_X^{-1}x = \\ &= v_{\Xi}^T d_{\Xi}^{-1}A^{-1}d_{\Xi}^{-1}v_{\Xi} + 2v_{\Xi}^T d_{\Xi}^{-1}A^{-1}h^T d_X^{-1}x + x^T d_X^{-1}hA^{-1}h^T d_X^{-1}x. \end{aligned}$$

Let us substitute the last expressions into the total probability formula (5) and perform some transformations. We will get:

$$\begin{aligned} f(x) &= \int_{E^{k_{\Xi}}} f(x/\xi) f(\xi) d\xi = M_X \exp\left(\frac{1}{2}B^T A^{-1}B - \frac{1}{2}C\right) = \\ &= M_X \exp\left(\frac{1}{2}(v_{\Xi}^T d_{\Xi}^{-1}A^{-1}d_{\Xi}^{-1}v_{\Xi} + 2x^T d_X^{-1}hA^{-1}d_{\Xi}^{-1}v_{\Xi} + x^T d_X^{-1}hA^{-1}h^T d_X^{-1}x) - \frac{1}{2}(v_{\Xi}^T d_{\Xi}^{-1}v_{\Xi} + x^T d_X^{-1}x)\right) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= M_X \exp\left(\frac{1}{2}x^T d_X^{-1} h A^{-1} h^T d_X^{-1} x + x^T d_X^{-1} h A^{-1} d_{\Xi}^{-1} v_{\Xi} + \frac{1}{2}v_{\Xi}^T d_{\Xi}^{-1} A^{-1} d_{\Xi}^{-1} v_{\Xi} - \frac{1}{2}v_{\Xi}^T d_{\Xi}^{-1} v_{\Xi} - \frac{1}{2}x^T d_X^{-1} x\right) = \\
 &= M_X \exp\left(-\frac{1}{2}x^T (d_X^{-1} - d_X^{-1} h A^{-1} h^T d_X^{-1})x + v_{\Xi}^T (d_{\Xi}^{-1} A^{-1} h^T d_X^{-1})x - \frac{1}{2}v_{\Xi}^T (d_{\Xi}^{-1} - d_{\Xi}^{-1} A^{-1} d_{\Xi}^{-1})v_{\Xi}\right), \quad (12)
 \end{aligned}$$

where $M_X = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_x} |d_{\Xi} \| A \| d_X|}}$.

Let us now reduce the expression (12) to the form (11). We will use for this the known identity [10]

$$(A \pm BCB^T)^{-1} = A^{-1} - A^{-1}B(B^T A^{-1}B \pm C^{-1})^{-1}B^T A^{-1}. \quad (13)$$

According this identity we have

$$A^{-1} = (d_{\Xi}^{-1} + h^T d_X^{-1} h)^{-1} = d_{\Xi} - d_{\Xi} h^T (d_X + h d_{\Xi} h^T)^{-1} h d_{\Xi}. \quad (14)$$

Substituting the right side of the expression (14) into the first summand in (12) instead of $A^{-1} = (d_{\Xi}^{-1} + h^T d_X^{-1} h)^{-1}$, we obtain the multiplier $(d_X^{-1} - d_X^{-1} h (d_{\Xi}^{-1} + h^T d_X^{-1} h)^{-1} h^T d_X^{-1})$ which, in accordance with the identity (13), is $D_X^{-1} = (d_X + h d_{\Xi} h^T)^{-1}$.

Substituting the right side of the expression (14) into the third summand in (12) instead of $A^{-1} = (d_{\Xi}^{-1} + h^T d_X^{-1} h)^{-1}$, we obtain the multiplier which is equal to $h^T D_X^{-1} h$:

$$\begin{aligned}
 (d_{\Xi}^{-1} - d_{\Xi}^{-1} A^{-1} d_{\Xi}^{-1}) &= d_{\Xi}^{-1} - d_{\Xi}^{-1} (d_{\Xi} - d_{\Xi} h^T (d_X + h d_{\Xi} h^T)^{-1} h d_{\Xi}) d_{\Xi}^{-1} = \\
 &= d_{\Xi}^{-1} - (d_{\Xi}^{-1} d_{\Xi} d_{\Xi}^{-1} - d_{\Xi}^{-1} d_{\Xi} h^T (d_X + h d_{\Xi} h^T)^{-1} h d_{\Xi} d_{\Xi}^{-1}) = \\
 &= d_{\Xi}^{-1} - (d_{\Xi}^{-1} - h^T (d_X + h d_{\Xi} h^T)^{-1} h) = d_{\Xi}^{-1} - d_{\Xi}^{-1} + h^T D_X^{-1} h = h^T D_X^{-1} h.
 \end{aligned}$$

Finally, we have to proof the following identity for the second summand in (12):

$$h^T D_X^{-1} = d_{\Xi}^{-1} A^{-1} h^T d_X^{-1},$$

or

$$h^T (d_X + h d_{\Xi} h^T)^{-1} = d_{\Xi}^{-1} (d_{\Xi}^{-1} + h^T d_X^{-1} h)^{-1} h^T d_X^{-1}.$$

Applying the formula (13) to the left side of the last equality, we get the following equality:

$$h^T d_X^{-1} - h^T d_X^{-1} h (d_{\Xi}^{-1} + h^T d_X^{-1} h)^{-1} h^T d_X^{-1} = d_{\Xi}^{-1} (d_{\Xi}^{-1} + h^T d_X^{-1} h)^{-1} h^T d_X^{-1}.$$

Multiplying this equality by the d_X on the right and transferring the right side to the left we get:

$$\begin{aligned}
 h^T - h^T d_X^{-1} h (d_{\Xi}^{-1} + h^T d_X^{-1} h)^{-1} h^T - d_{\Xi}^{-1} (d_{\Xi}^{-1} + h^T d_X^{-1} h)^{-1} h^T &= \\
 = h^T - (h^T d_X^{-1} h + d_{\Xi}^{-1}) (d_{\Xi}^{-1} + h^T d_X^{-1} h)^{-1} h^T &= h^T - h^T = 0.
 \end{aligned}$$

Therefore, we have the following expression

$$f(x) = \int_{E^{\xi}} f(x/\xi) f(\xi) d\xi = M_X \exp\left(-\frac{1}{2}x^T D_X^{-1} x + v_{\Xi}^T h^T D_X^{-1} x - \frac{1}{2}v_{\Xi}^T h^T D_X^{-1} h v_{\Xi}\right),$$

which is the expression (11). This completes the proof of the theorem 2.

It should be noted that the expression $h\xi$ in (10) is the conditional mathematical expectation of the random vector X (the regression function of X on Ξ). The result of the theorem 2 in the form of the expression (11) shows that the unconditional mathematical expectation of the random vector X is equal to $v_X = h v_{\Xi}$ and the unconditional variance-covariance matrix of the random vector X is equal to $D_X = d_X + h d_{\Xi} h^T$.

The total probability formula for scalar Gaussian distributions

Let ξ , x and h in the theorem 2 are scalars. This means that we consider a simple linear Gaussian regression of x on ξ in the form of $h\xi$. We will obtain for this case unconditional probability density function $f(x)$ by the direct calculation using the theorem 1. Then, in accordance with the theorem 1, we have

$$A = \frac{1}{d_{\Xi}} + \frac{h^2}{d_X} = \frac{d_X + h^2 d_{\Xi}}{d_{\Xi} d_X}, \quad A^{-1} = \frac{d_{\Xi} d_X}{d_X + h^2 d_{\Xi}},$$

$$f(x) = M_x \exp\left(-\frac{1}{2} x^T (d_X^{-1} - d_X^{-2} A^{-1} h^2) x + v_{\Xi}^T (d_{\Xi}^{-1} A^{-1} h d_X^{-1}) x - \frac{1}{2} v_{\Xi}^T (d_{\Xi}^{-1} - d_{\Xi}^{-2} A^{-1}) v_{\Xi}\right).$$

Substituting of the expression for A^{-1} into the expression for the $f(x)$ we get the multiplier in the first summand of the $f(x)$

$$(d_X^{-1} - d_X^{-2} A^{-1} h^2) = \frac{1}{d_X} - \frac{h^2 d_{\Xi}}{d_X (d_X + h^2 d_{\Xi})} = \frac{(d_X + h^2 d_{\Xi}) - h^2 d_{\Xi}}{d_X (d_X + h^2 d_{\Xi})} = \frac{1}{d_X + h^2 d_{\Xi}} = D_X^{-1}$$

and the multiplier in the second summand of the $f(x)$

$$(d_{\Xi}^{-1} A^{-1} h d_X^{-1}) = \frac{h}{d_{\Xi}} \frac{d_{\Xi} d_X}{(d_X + h^2 d_{\Xi}) d_X} = \frac{h}{(d_X + h^2 d_{\Xi})} = h D_X^{-1}$$

and the multiplier in the third summand of the $f(x)$

$$(d_{\Xi}^{-1} - d_{\Xi}^{-2} A^{-1} d_{\Xi}^{-1}) = \left(\frac{1}{d_{\Xi}} - \frac{1}{d_{\Xi}} \frac{d_{\Xi} d_X}{(d_X + h^2 d_{\Xi}) d_{\Xi}}\right) = \frac{1}{d_{\Xi}} - \frac{d_X}{(d_X + h^2 d_{\Xi}) d_{\Xi}} =$$

$$= \frac{d_X + h^2 d_{\Xi} - d_X}{(d_X + h^2 d_{\Xi}) d_{\Xi}} = \frac{h^2 d_{\Xi}}{(d_X + h^2 d_{\Xi}) d_{\Xi}} = \frac{h^2}{(d_X + h^2 d_{\Xi})} = h^2 D_X^{-1}$$

and normalization constant

$$M_x = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n |d_{\Xi}| |A| |d_X|}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi(d_X + h^2 d_{\Xi})}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_X}}.$$

Therefore

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_X}} \exp\left(-\frac{x^2}{2D_X} + \frac{h v_{\Xi} x}{D_X} - \frac{h^2 v_{\Xi}^2}{2D_X}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_X}} \exp\left(-\frac{1}{2D_X} (x - h v_{\Xi})^2\right).$$

We can see that the scalar case satisfies the theorem 2.

A simple example

We will consider some stochastic controlled object which is described by the conditional probability density function $f(x/\xi, u)$, where x is the output scalar variable of the object, u is the input vector variable of the object and ξ is the vector of the parameters of the object. As a rule, it is the Gaussian (normal) probability density function:

$$f(x/\xi, u) \sim N(\varphi(\xi, u), d_X), \quad (15)$$

where $\varphi(\xi, u)$ is the regression function of x on u , ξ is the vector of the parameters of the regression function, d_X is the variance of the internal noise of the object. The description (15) can be represented in the form

$$X = \varphi(\xi, u) + E, \quad (16)$$

where E is the random variable with Gaussian distribution $N(0, d_E)$ and $d_E = d_X$ is the variance of the random variable E . An object with description (15) or (16) is called a multiple regression object. The class of the functions represented in the form

$$\varphi(\xi, u) = \sum_{j=1}^m h_j(u) \xi_j, \quad (17)$$

where $h_j(u)$, $j=1,2,\dots,m$ are some functions called basis functions, that are usually used for description of the multiple regression function. The function (17) can be written in a vector form as a dot product of the vectors h and ξ :

$$\varphi(\xi, u) = h^T \xi = \xi h^T, \quad (18)$$

where $h^T = h^T(u) = (h_1(u), h_2(u), \dots, h_m(u))$ is the row vector of the basis functions and $\xi^T = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m)$ is the row vector of the parameters. Let us consider the regression function of two variables in the following form: $\varphi = \alpha + \beta u_1 + \gamma u_2 + \tau u_1^2$.

Then we will have this regression function in the form of (18) with

$$h^T = (1, u_1, u_2, u_1^2), \quad \xi^T = (\alpha, \beta, \gamma, \tau). \quad (19)$$

Now we suppose that the vector of the parameters $\xi^T = (\alpha, \beta, \gamma, \tau)$ is random vector with Gaussian probability density function $f(\xi) \sim N(v_{\Xi}, d_{\Xi})$ having mean value v_{Ξ} and variance-covariance matrix d_{Ξ} . The unconditional moments $v_{X,k}$ of the output variable of the controlled object are of interest:

$$v_{X,k} = \int_{E^k} x^k f(x/\xi) f(\xi) d\xi. \quad (20)$$

They can be easily defined by the theorem 2 as the moments of the Gaussian distribution $N(h^T v_{\Xi}, d_X + h^T d_{\Xi} h)$ [7]. For instance, in accordance with the theorem 2 we get:

$v_{X,1} = h^T v_{\Xi}$, $v_{X,2} = (h^T v_{\Xi})^2 + d_X + h^T d_{\Xi} h$, where h is defined as (19) and d_{Ξ} is the (4×4) variance-covariance matrix of the random vector ξ (19).

Conclusion

The results obtained in theorems 1 and 2 are aimed at solving the dual control problems formulated in works [11, 12]. The sequence of the control actions in dual control of the multivariate stochastic objects is defined by the functional equations of the dynamic programming which contain the integral like (20) subjected to calculation [11]. One of the practical examples is the task of the optimal allowance distribution as the task of the dual control considered in the work [12].

References

- Berger J.O. *Statistical decision theory and bayesian analysis*. New York: Springer-Verlag; 1985.
- Morris H. Degroot T. *Optimal statistical decisions*. MCGRAW-HILL INC.; 1970.
- Fel'dbaum A.A. *Optimal Control Systems*. New York, London: Academic Press; 1965.
- Prudnikov A.P., Brychkov Yu. A., Marichev O.I. *Integrals and Series. Translated from the Russian by N.M. Queen*. New York: Gordon and Breach Science Publ.; 1986.
- Alan Jeffrey, Hui-Hui Dai. *Handbook of Mathematical Formulas and Integrals*. Fourth edition.: Academic Pres; 2008.
- Zwillinger D. *CRC Standard Mathematical Tables and Formulae*. 33rd edition. CRC Press; 2021.
- Cramer H. *Mathematical Methods of Statistics (PMS-9)*. Princeton University Press; 1999.
- Rao C.S. *Linear Statistical Inference and its Applications*. 2nd ed. New York: Wiley; 1973.
- Mukha V.S., Kako N.F. Integrals and integral transformations connected with vector Gaussian distribution. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seryia fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*. 2019;55(4):457-466. DOI: org/10.29235/1561-2430-2019-55-4-457-466.
- Strejc V. *State Space Theory of Discrete Linear Control*. Prague: Academia; 1981.
- Mukha V.S., Kako N.F. Dual Control of Multidimensional-matrix Stochastic Objects. *Information Technologies and Systems 2019 (ITS 2019): Proceeding of the International Conference, BSUIR, Minsk, Belarus, 30th October 2019*. Minsk: BSUIR; 2019:236-237.

12. Mukha V.S., Kako N.F. Flat Problem of Allowance Distribution as Dual Control Problem. *Information Technologies and Systems 2020 (ITS 2020): Proceeding of the International Conference, BSUIR, Minsk, Belarus, 18th November 2020*. Minsk: BSUIR; 2020:195-196.

Authors' contribution

Mukha V.S. performed the work on the scientific supervision, set the statement of the problem and prepared the article for publication.

Kako N.F. performed the work on the scientific content of the article.

Information about the authors

Mukha V.S. – D.Sc., Professor, Professor at the Department of Information Technologies of Automated Systems of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kako N.F. – Postgraduate student of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus, Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-44-781-16-51; e-mail: mukha@bsuir.by
Mukha Vladimir Stepanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-2-65-73>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 534.23; 629.7

СИНТЕЗ АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО АКУСТИЧЕСКИМ ШУМАМ

А.Д. ПУЗАНОВ, Д.С. НЕФЁДОВ

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

Поступила в редакцию 25 января 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. В статье синтезирован алгоритм обнаружения акустического шума беспилотного летательного аппарата (БЛА) на фоне шумов, обусловленных ветром. Синтез алгоритма выполнен по критерию Неймана – Пирсона. Алгоритм предполагает сочетание этапов когерентной компенсации шума ветра с когерентным накоплением импульсов звукового давления акустического шума БЛА. Время когерентного накопления соответствует удвоенному времени корреляции флуктуаций, полученному в результате проведения экспериментальных исследований акустических шумов различных типов БЛА. Эффективность разработанного алгоритма обнаружения БЛА зависит от скорости полета, ракурса, количества лопастей и оборотов винта (винтов) БЛА, а также погодных условий. Для значения вероятности ложной тревоги 10^{-4} синтезированный алгоритм обнаружения обеспечивает вероятность правильного обнаружения БЛА 0,9 при отношении сигнал/шум 8 дБ, что соответствует дальности обнаружения БЛА 200...300 м. Полученные результаты позволяют говорить о перспективности применения акустических систем обнаружения БЛА.

Ключевые слова: акустическая система обнаружения, акустический шум, беспилотный летательный аппарат, дальность обнаружения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Пузанов А.Д., Нефёдов Д.С. Синтез алгоритма обнаружения беспилотных летательных аппаратов по акустическим шумам. Доклады БГУИР. 2021; 19(2): 65-73.

SYNTHESIS OF ALGORITHM OF UNMANNED AERIAL VEHICLE DETECTION BY ACOUSTIC NOISE

ALIAKSANDR D. PUZANAU, DENIS S. NEFEDOV

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

Submitted 25 January 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The algorithm of detection of acoustic noise provided by an unmanned aerial vehicle (UAV) in the noise background due to wind is synthesized in the article. Creation of the algorithm has been carried out using the Neyman – Pearson lemma. The algorithm assumes a combination of the stages of wind noise coherent compensation and coherent accumulation of UAV's acoustic noise sound pressure impulses. The coherent accumulation time matches doubled time of fluctuation correlation resulted by experimental research of acoustic noise of different types of UAVs. Efficiency of the developed algorithm of UAV detection depends on flight velocity, foreshortening, amount of blades and rotor turnovers of UAV as well as weather conditions. For the probability of a false alarm value of 10^{-4} , the probability of correct UAV detection value of 0.9 is provided wherein signal-to-noise ratio has a value of 8 dB. These indicators correspond the detection range of 200 to 300 meters. The obtained results allow discussions about perspective of acoustic UAVs detection systems adaptation.

Keywords: acoustic detection system, acoustic noise, unmanned aerial vehicle, detection range.

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

For citation. Puzanau A.D, Nefedov D.S. Synthesis of algorithm of unmanned aerial vehicle detection by acoustic noise. Doklady BGUIR. 2021; 19(2): 65-73.

Введение

Для обнаружения маловысотных винтовых беспилотных летательных аппаратов (БЛА) наибольшее распространение получили радиолокационные и оптикоэлектронные средства. Влияние подстилающей поверхности, неоднородность фона, малые геометрические размеры и низкая скорость полета БЛА ограничивают эффективность указанных средств обнаружения. Кроме того, существующие радиолокационные средства имеют ограниченную минимальную дальностью обнаружения 200...300 м. Расширить возможности системы разведки БЛА, особенно на предельно малых высотах и малых дальностях, позволяет включение в ее состав акустического устройства обнаружения. Малая дальность обнаружения БЛА акустическими средствами компенсируется пассивным режимом работы, возможностью функционирования в сложной электромагнитной обстановке и плохой видимости.

Целью данной статьи является синтез оптимального (квазиоптимального) алгоритма обнаружения маловысотных БЛА по акустическим шумам (АШ). Для достижения поставленной цели использована математическая модель АШ БЛА, разработанная авторами в [1, 2]. Предложенная модель учитывает корреляционные свойства АШ БЛА, ориентацию БЛА в пространстве, характеристики и параметры приемной аппаратуры (акустических микрофонов (АМ)). Учет данных параметров позволил определить время когерентного накопления принятых АШ и количество каналов обработки.

Постановка задачи и описание входных воздействий

На входе устройства акустического обнаружения БЛА наблюдается реализация случайного сигнала, зарегистрированного приемным АМ. Принятая реализация сигнала представляет собой совокупность внешних АШ и внутреннего шума приемной аппаратуры

при условии отсутствия или наличия АШ, создаваемого БЛА. Необходимо синтезировать оптимальный алгоритм обработки принятой реализации сигнала, на выходе которого принимается решение о наличии либо отсутствии БЛА в пространстве наблюдения (элементе разрешения).

Совокупность внешних АШ и внутреннего шума приемной аппаратуры при отсутствии АШ, создаваемого БЛА, в дискретном представлении описывается многомерной плотностью вероятности вида [3]

$$p_0(\xi) = \left[(2\pi)^N \text{Det} \|R_{kn}^h\| \right]^{-1} \exp \left(- \sum_{k,n} Q_{kn}^h \xi_k^* \xi_n \right), \quad (1)$$

где N – количество отсчетов принятой реализации случайного сигнала за время наблюдения T_N ; $\|R_{kn}^h\|$ – корреляционная матрица принятой реализации случайного сигнала при условии отсутствия АШ, создаваемого БЛА; $R_{kn}^h = \{\overline{\xi_k \xi_n^*}\}, k, n = \overline{1, N}$; $\|Q_{kn}^h\|$ – матрица, обратная корреляционной матрице $\|R_{kn}^h\|$; ξ_n – n -й дискретный отсчет принятой реализации случайного сигнала, зарегистрированного приемным АМ.

При отсутствии источников посторонних АШ, к которым в случае обнаружения БЛА отнесем разговорную речь, звуки птиц, работу двигательных установок и др., в качестве внешних АШ рассматривается только шум ветра, возникающий в результате удара воздушных потоков порывов ветра о твердые края АМ, создающих завихрения.

Акустический шум ветра является коррелированным и включает быстрые и медленные флуктуации скорости ветра (БФСВ и МФСВ) [3]. Условием разделения на медленные и быстрые флуктуации является $\tau_{кБФСВ} < \tau_{кМФСВ}$ (рис 1, а). Вид автокорреляционной функции и энергетического спектра (ЭС) БФСВ и МФСВ представлены на рис. 1.

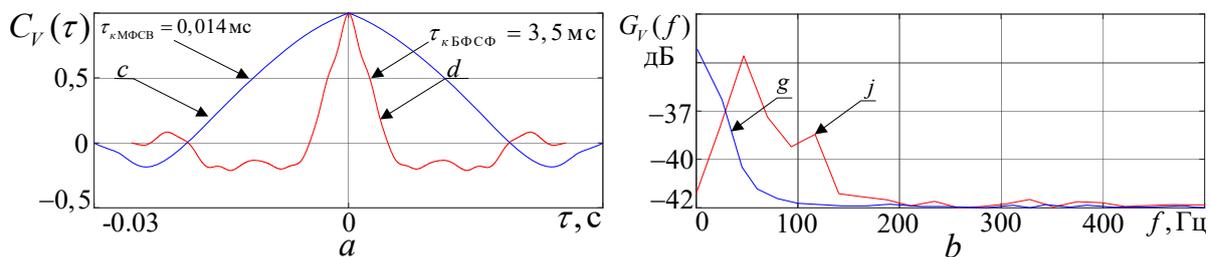


Рис. 1. Спектрально-временные характеристики АШ ветра: *a* – АКФ; *b* – ЭС; *c* – АКФ МФСВ; *d* – АКФ БФСВ; *g* – ЭС МФСВ; *j* – ЭС БФСВ
Fig. 1. Spectral-temporal characteristics of wind acoustic noise: *a* – ACF; *b* – PS; *c* – ACF SFWS; *d* – ACF FFWS; *g* – PS SFWS; *j* – PS FFWS

Анализируя рис. 1, *b*, можно сделать вывод, что основная мощность шума МФСВ сконцентрирована в диапазоне частот 0...50 Гц, а БФСВ – 0...150 Гц. Ширина ЭС обратно пропорциональна удвоенному времени корреляции флуктуаций.

Акустические шумы, создаваемые БЛА, с высокой степенью достоверности могут быть представлены флуктуирующей последовательностью треугольных импульсов с единичной скважностью, временная структура которой описывается выражением [1, 2]

$$U_{BLA} \left(\begin{matrix} t, N_V, N_L, \\ \theta, \phi, \psi, \varphi, \vartheta \end{matrix} \right) = \begin{cases} F(\theta, \phi) \sum_{i=1}^{N_V} \left\{ P_{Vij}(t) \sum_{j=1}^{N_L} U_L \left[(t - t_{ZVi}(\psi, \phi, \vartheta))(j-1) T_{PVi}(t) \right] \right\}, & 0 \leq t \leq T_N; \\ 0, & t > T_N, \end{cases} \quad (2)$$

где $F(\theta, \phi)$ – значение функции направленности приемного микрофона в направлении θ, ϕ , мВ/Па; θ – азимут БЛА относительно пункта приема, град; ϕ – угол места БЛА относительно пункта приема, град; $i = \overline{1, N_V}$; N_V – количество винтов БЛА; $j = \overline{1, N_L}$; N_L – количество

лопастей винта БЛА; $P_{Vij}(t)$ – случайная амплитуда звукового давления i -го винта БЛА с j -м количеством лопастей, Па; $U_L(t)$ – закон модуляции АШ одного оборота лопасти винта БЛА; $t_{zv_i}(\psi, \varphi, \vartheta)$ – время задержки прихода звука i -го винта БЛА, с; ψ, φ, ϑ – угол рысканья, тангажа и крена БЛА соответственно, град; $T_{PVi}(t)$ – случайный период повторения импульсов звукового давления, создаваемых i -м винтом с N_L количеством лопастей, с; T_N – время наблюдения, с.

В модели входного воздействия (2) учтены только АШ винтов БЛА, которые, согласно [1, 2], должны включать также АШ асинхронных электродвигателей (АЭД). Такое допущение принято для упрощения задачи обнаружения исходя из низкого уровня шумов АЭД, которые на дальностях менее 50 м значительно ниже уровня других источников шума. Вместе с этим АШ АЭД может быть использован в качестве одного из информативных признаков для решения задачи распознавания БЛА по АШ. На рис. 2 представлены АКФ и ЭС АШ БЛА.

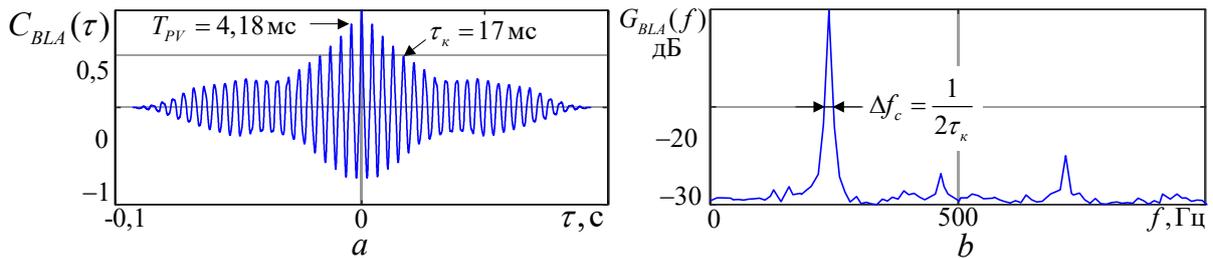


Рис. 2. Спектрально-временные характеристики АШ БЛА DJI Phantom 4 Pro: а – АКФ; б – ЭС
Fig. 2. Spectral-temporal characteristics of AN UAV : a – ACF; b – PS

Многомерную плотность вероятности принятого сигнала при условии наличия АШ, создаваемого БЛА, с высокой долей вероятности ($\sim 0,9$) [2] можно считать нормальной. Выражение для многомерной плотности вероятности принятого сигнала при условии наличия АШ, создаваемого БЛА, имеет вид

$$p_1(\xi) = \left[(2\pi)^N \text{Det} \|R_{kn}^{h+c}\| \right]^{-1} \exp \left(-\sum_{k,n} Q_{kn}^{h+c} \xi_k^* \xi_n \right), \quad (3)$$

где $\|Q_{kn}^{h+c}\|$ – матрица, обратная корреляционной матрице $\|R_{kn}^{h+c}\|$; $\|R_{kn}^{h+c}\|$ – корреляционная матрица принятой реализации случайного полезного сигнала (АШ БЛА) при условии наличия некоррелированного «белого» шума, элементы которой равны [4]:

$$R_{kn}^{h+c}(\theta, \phi, N_V, \psi, \varphi, \vartheta) = F(\theta, \phi) \sum_{i=1}^{N_V} M(P_{Vi})^2 r_{kni}^c U_L \left[(t - t_{zv_i}(\psi, \varphi, \vartheta)) (N_L - 1) T_{PVi} \right], k, n = \overline{1, N}, \quad (4)$$

где $r_{kni}^c = r_{ci} \left[(k-n)\Delta t \right]$ – элементы нормированной корреляционной матрицы флуктуаций АШ БЛА i -го винта; $r_{ci} = e^{-T_{PVi}/\tau_c}$ – коэффициент корреляции соседних значений огибающей АШ БЛА i -го винта; $M(P_V) = f_V N_L / V_{zv} r_{BLA} v(f_V) | -F_V \cos \phi + V_{zv} M_{kr} / 2\pi f_V r_V | J_{N_L} (2\pi f_V r_V N_L \sin \phi / V_{zv})$ – математическое ожидание случайной амплитуды звукового давления i -го винта с N_L количеством лопастей, Па, определяется согласно выражению [1], град; v – коэффициент затухания звука в атмосфере, дБ/м; r_V – эффективный радиус винта, м; r_{BLA} – расстояние между БЛА и пунктом приема, м; F_V – тяга винта, Н; V_{zv} – скорость распространения звука, м/с; M_{kr} – крутящий момент винта, Н·м.

Комплект априорных данных, представленных выражениями (1)–(4), является полным для синтеза устройства обнаружения маловысотных БЛА по АШ.

Разработка алгоритма обнаружения акустического шума маловысотных винтовых БЛА

Для принятия решения о наличии БЛА необходимо сформировать отношение правдоподобия и сравнить его с порогом [4]:

$$\Lambda(\xi) = p_1(\xi)/p_0(\xi) = \text{Det}\|R_{kn}^h\|/\text{Det}\|R_{kn}^{h+c}\| \exp\left[\sum_{k,n=1}^N (Q_{kn}^h - Q_{kn}^{h+c})\xi_k^*\xi_n\right] \geq \Lambda_*(F), \quad (5)$$

где $\Lambda_*(F)$ – порог обнаружения, сформированный по критерию Неймана – Пирсона для фиксированной вероятности ложной тревоги F [4].

Решение об обнаружении можно принимать на основании сравнения с порогом логарифма отношения правдоподобия (5). В этом случае оптимальное правило принятия решения об обнаружения БЛА имеет вид [4]:

$$\text{если } Z = \sum_{k,n=1}^N (Q_{kn}^h - Q_{kn}^{h+c})\xi_k^*\xi_n \geq Z_*, \text{ то } A_1^*, \text{ иначе } A_0^*, \quad (6)$$

где Z_* – порог решения; A_1^* , A_0^* – решения при наличии и отсутствии БЛА.

Обработку принятой реализации сигнала для получения выходной статистики Z можно разделить на этапы декорреляции фона и выделения полезного сигнала [4]. Этап декорреляции фона выполняется устройством, квадрат амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) которого $|K_1(f)|^2$ обратно пропорционален ЭС помехи [4]:

$$|K_1(f)|^2 = 1/G_r(f). \quad (7)$$

Для энергетического спектра АШ, представленного на рисунке 1, б, декорреляция фона может быть выполнена фильтром высоких частот с зоной режекции в области 0...120 Гц. Примечательно, что примерно такой АЧХ обладают современные АМ, предназначенные для работы на открытой местности. Частотной избирательности микрофонов добиваются выбором параметров элементов преобразования звукового давления в напряжение, а также применением специальных ветрозащитных устройств (выполняющих роль своеобразного фильтра), которые тормозят ветер перед АМ, препятствуя ударению воздуха о его прочные стенки, и никак не влияют на частоту и амплитуду полезного сигнала. В качестве примера на рис. 3 представлена АЧХ микрофона Rode NTG-5 (информация взята из технического описания изделия, согласно электронного ресурса <https://www.ode.com/microphones/ntg5>).

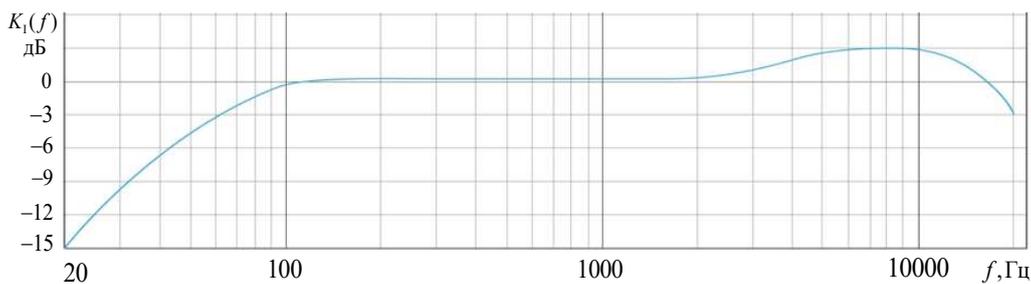


Рис. 3. Частотная характеристика акустического микрофона типа Rode NTG 5

Fig. 3. Frequency response of acoustic microphone type Rode NTG 5

Этап выделения полезного сигнала на декоррелированном фоне реализуется фильтром, импульсная характеристика которого согласована с ожидаемым полезным сигналом. Алгоритм обработки выходного сигнала устройства декорреляции фона с импульсными характеристиками (ИХ) устройства выделения полезного сигнала (УВПС) на выходе УВПС описывается выражением [4]

$$Z_m = \left| \sum_{n=1}^N \xi_n h_{m-n} \right|^2, \quad (8)$$

где $h_n, n = \overline{1, N}$ – дискретные отсчеты ИХ фильтра УВПС.

Фильтровая обработка в УВПС есть не что иное как когерентное накопление импульсов АШ, создаваемого БЛА на интервале T_{kn} . Интервал (время) когерентного накопления T_{kn} определяется шириной зубца АЧС флуктуаций Δf_c (рис 2, b) [2].

Проведенные авторами статьи экспериментальные исследования показали, что ширина зубца ЭС АШ для различных типов БЛА составляет 10...40 Гц. Ширина зубца ЭС зависит от времени корреляции флуктуаций АШ и количества винтов БЛА. Ширина гармоник ЭС АШ четырехвинтового БЛА примерно в два раза превосходит ширину гармоник ЭС АШ одновинтового БЛА, что обусловлено влиянием флуктуаций параметров акустического шума пары винтов [2].

Поскольку значение периода повторения импульсов T_{pv} АШ БЛА априорно неизвестно, от оптимального алгоритма выделения полезного сигнала можно перейти к квазиоптимальному многоканальному алгоритму вида

$$Z_{1m}^i = \left| \sum_{n=0}^{N-1} \xi_n h_{m-n}^{T_{pv i}} \right|^2, \quad (9)$$

где i – номер канала обработки; $h_{m-n}^{T_{pv i}}$ – дискретные отсчеты ИХ фильтра УВПС, настроенного на ожидаемый априорно неизвестный период повторения $T_{pv i}$, в i -м канале обработки.

В частотной области это эквивалентно использованию набора фильтров УВПС, АЧХ которых рассогласованы между собой на частоту ΔF_{II} и перекрывают возможный диапазон частот гармоник ЭС АШ БЛА. Количество каналов УВПС определяется рассогласованием ΔF_{II} и диапазоном значений частот гармоник ЭС АШ БЛА, который зависит от количества оборотов винта (винтов) и скорости полета БЛА. Для современных БЛА указанный диапазон частот составляет 150...500 Гц [2].

Потенциальная эффективность УВПС v_{kn} может быть рассчитана по выражению [4]

$$v_{kn} = (N_{ob} N_L) (V_{zv} \pm 2V_{BLA}) / \Delta F_{II} V_{zv}, \quad (10)$$

где V_{zv} – скорость распространения звуковой волны; V_{BLA} – скорость полета БЛА; N_{ob} – количество оборотов винта БЛА; $\Delta F_{II} = \Delta f_c$ – ширина зубца АЧХ фильтра.

Как видно из выражения (10) эффективность УВПС зависит от скорости полета, скорости звука, количества оборотов и числа лопастей винта (винтов) БЛА, ширины зубца ЭС флуктуаций и за время полета может изменяться. Структурная схема устройства обнаружения БЛА по АШ, реализующая алгоритмы (6), (7), (9), представлена на рис. 4.

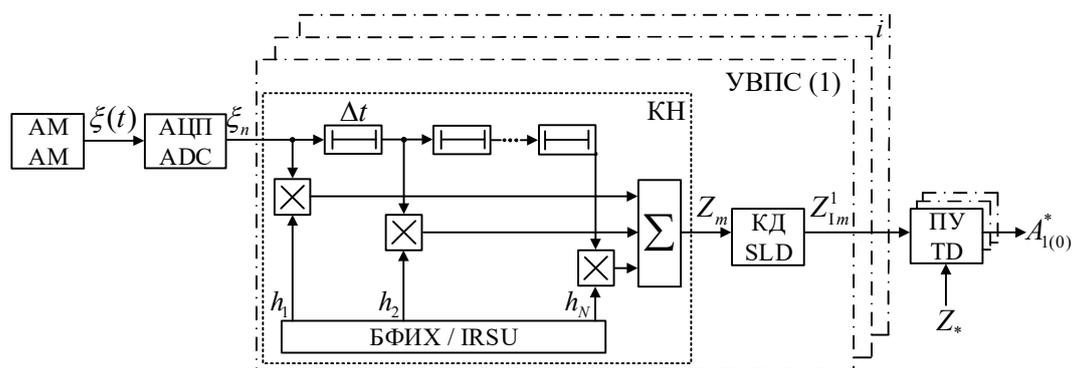


Рис. 4. Структурная схема разработанного устройства: АМ – акустический микрофон; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; КД – квадратичный детектор; ПУ – пороговое устройство; БФИХ – блок формирования импульсной характеристики

Fig. 4. Block diagram of the developed device: AM – acoustic microphone; ADC – analog to digital converter; SLD – square-law detector; TD – threshold device; IRSU – impulse response shaping unit

Акустический микрофон осуществляет преобразование АШ в напряжение и его декорреляцию. После этапа декорреляции и преобразования в цифровые отсчеты с помощью АЦП принятая реализация сигнала поступает на многоканальное УВПС. В каждом канале УВПС производится свертка отсчетов принятой реализации с отсчетами ИХ фильтра, настроенного на конкретное значение периода повторения АШ БЛА. Результат свертки после квадратичного детектирования сравнивается с порогом обнаружения. В случае превышения порога хотя бы в одном ПУ формируется решение об обнаружении БЛА.

Оценка эффективности разработанного алгоритма обнаружения БЛА

Эффективность разработанного алгоритма обнаружения можно охарактеризовать зависимостью вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум на выходе КД [4] (характеристика обнаружения), а также реализуемой дальностью обнаружения БЛА.

Характеристика обнаружения определяется законом распределения случайной величины на выходе УВПС. Для разработанного УВПС с учетом нормального распределения входной реализации выходная статистика имеет экспоненциальный закон распределения [4]. Для экспоненциального закона распределения характеристика обнаружения определяется по выражению

$$D = F^{1/1+\mu\nu_{kn}}, \quad (11)$$

где $F = \exp(-Z_*/\bar{Z}_0)$; \bar{Z}_0 – среднее значение мощности шума на выходе устройства обработки; μ – отношение сигнал/шум на выходе устройства декорреляции фона.

На рис. 5 представлены характеристики обнаружения, полученные теоретически с использованием выражения (11) и методом математического моделирования для следующих исходных данных: $\nu_{kn} = 1$; $N_{ob} = 105,55$ об/с; $N_L = 2$; $V_{BLA} = 20$ м/с; $V_{zv} = 330$ м/с; $\Delta f_c = 21$ Гц, при этом считается, что БЛА приближается по прямолинейной траектории к АМ.

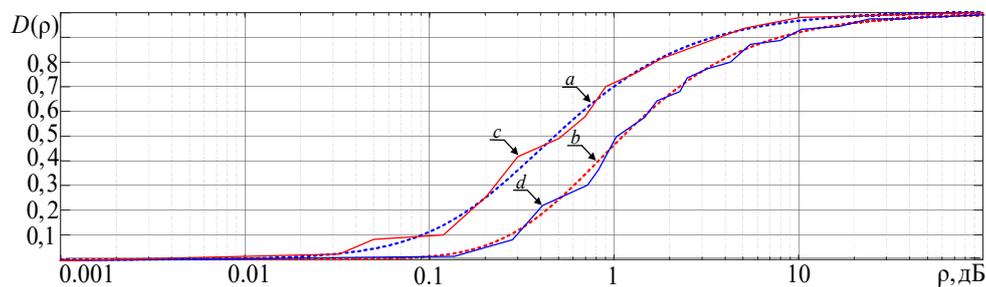


Рис. 5. Характеристики обнаружения разработанного устройства:

a, b – теоретическая кривая для $F_a = 10^{-2}$, $F_b = 10^{-4}$ соответственно;

c, d – результат математического моделирования для $F_c = 10^{-2}$, $F_d = 10^{-4}$ соответственно

Fig. 5. Detection characteristics of the developed device:

a, b – theoretical line for $F_a = 10^{-2}$, $F_b = 10^{-4}$ respectively;

c, d – the result of mathematical modeling for $F_c = 10^{-2}$, $F_d = 10^{-4}$ respectively

Как видно из рис. 5 для значений вероятности ложной тревоги 10^{-2} и 10^{-4} вероятность правильного обнаружения 0,9 достигается при значениях отношения сигнал/шум 4 и 8 дБ соответственно.

Оценка дальности обнаружения является обратной задачей к задаче определения отношения сигнал / шум, требуемого для обеспечения заданной вероятности правильного обнаружения при фиксированной вероятности ложной тревоги. Выражение для дальности обнаружения БЛА по АШ в зависимости от отношения сигнал/шум на выходе УВПС имеет вид [5]

$$R_{obn} = \sqrt{P_s G \nu_{kn} k_m / 10^{\frac{L_m}{20}} P_0 \alpha \mu(D, F)}, \quad (12)$$

где P_s – звуковое давление акустического шума, создаваемого винтами вращения БЛА, на расстоянии 1 м от акустического микрофона, Па; G – коэффициент направленного действия АМ; k_m – чувствительность АМ, мВ/Па; L_m – эквивалентный уровень собственных шумов АМ, дБ; P_0 – пороговый уровень слышимости, Па; a – коэффициент затухания звуковой волны в атмосфере, дБ/км.

На рис. 6 представлены зависимости дальности обнаружения, от интенсивности звукового давления P_s , создаваемого БЛА, для различных значений вероятности правильного обнаружения при вероятности ложной тревоги $F = 10^{-4}$. Кривые на рис. 6 получены для БЛА типа DJI Phantom 4 Pro и исходных данных, представленных в табл. 1.

Как видно из рис. 6, при уровне звукового давления АШ БЛА 70...75 дБ, характерного для малоразмерных БЛА коммерческого использования (типа DJI Phantom 4 Pro, Mavic и т. п.), дальность обнаружения составляет порядка 250...350 м.

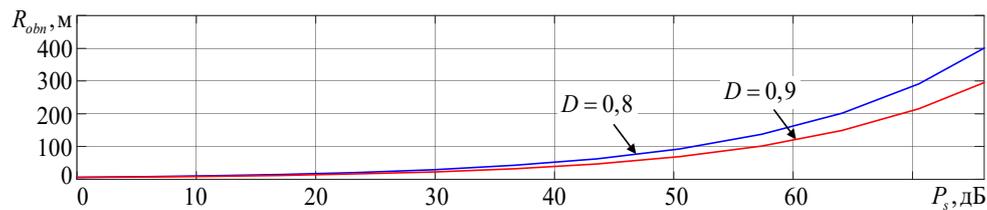


Рис. 6. Зависимости дальности обнаружения БЛА от интенсивности звукового давления
Fig. 6. Dependences of the detection range of an unmanned aerial vehicle on the intensity of sound pressure

Таблица 1. Исходные данные для расчета дальности обнаружения
Table 1. Initial data for calculating the detection range

Параметр	N_V	N_L	k_m , мВ/Па	L_m , дБ	G	$\nu_{кш}$	P_s , дБ	μ	P_0 , Па	a , дБ/км
Значение	4	2	66	10	1,25	11	0...75	0,4, 0,8	$2 \cdot 10^{-5}$	1,22

Заключение

Разработан алгоритм обнаружения БЛА по АШ, в соответствии с которым обработка принятой реализации сигнала включает этап декорреляции фона и выделения полезного сигнала. Декорреляция фона осуществляется АМ с АЧХ, обратной к ЭС АШ ветра. Полезный сигнал выделяется УВПС, реализующим свертку и квадратичное детектирование дискретных отсчетов, принятых АШ с отсчетами ИХ фильтра. Форма ИХ фильтра согласована с формой ожидаемого полезного сигнала.

Ввиду отсутствия априорных сведений о скорости полета БЛА $V_{БЛА}$, периода повторения импульсов T_{PV} (количества оборотов винта (винтов), лопастей) в пачке принятого АШ за время T_N , УВПС является многоканальным. Отличие времени корреляции флуктуаций АШ τ_c различных типов БЛА приводит к необходимости выбора квазиоптимального времени когерентного накопления T_m импульсов пачки АШ БЛА. Обоснованию выбора указанных параметров будет посвящена отдельная статья.

Разработанный алгоритм обнаружения позволяет обнаруживать маловысотные винтовые БЛА на дальностях до 250...400 м. Дальность обнаружения зависит от скорости полета, ракурса, количества винтов БЛА, линейных размеров лопастей, погодных условий, чувствительности АМ и характеристики его диаграммы направленности. Учет корреляционных характеристик АШ БЛА различных типов, позволяет определить структуру оптимального (квазиоптимального) фильтра (фильтров) когерентного накопления, вследствие чего повысить дальность автоматического обнаружения.

Список литературы

1. Пузанов А.Д., Нефёдов Д.С. Математическая модель временной структуры акустического шума беспилотного летательного аппарата. *Наука и военная безопасность*. 2020;1(63):32-36.

2. Пузанов А.Д., Нефёдов Д.С. Результаты экспериментальных исследований спектрально-временных характеристик акустических шумов беспилотных летательных аппаратов. *Наука и военная безопасность*. 2020;4(66):19-24.
3. Быков Р.В. *Статистический синтез акустических корреляционно-базовых устройств обнаружения – селекции для артиллерийского звукометрического вооружения*: дис. ...канд. техн. наук. Минск; 2008.
4. Охрименко А.Е. *Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба*. Минск: Воениздат; 1983.
5. Пузанов А.Д., Нефёдов Д.С. Оценка дальности обнаружения беспилотных летательных аппаратов акустической системой пассивной локации. *Milex Innovations*. 2019;133:63-66.

References

1. Puzanau A.D., Nefedov D.S. [Mathematic model of the temporal structure of the acoustic noise of an unmanned aerial vehicle]. *Nauka i voennaya bezopasnost'*. 2020;1(63):32-36. (In Russ.)
2. Puzanau A.D., Nefedov D.S. [Result of experimental studies of the spectral-temporal characteristics of acoustic noise from unmanned aerial vehicles]. *Nauka i voennaya bezopasnost'*. 2020;4(66):19-24. (In Russ.)
3. Bykov R.V. [*Statistical synthesis of acoustic correlation-basic detection devices – selection for artillery sound-metric weapons: dis. ...kand. tekhn. nauk*]. Minsk; 2008. (In Russ.)
4. Ohrimenko A.E. [*Radar basics and electronic warfare*]. Minsk: Voenizdat; 1983. (In Russ.)
5. Puzanau A.D., Nefedov D.S. [Assessment of the detection range of unmanned aerial vehicles by the acoustic passive location system]. *Milex Innovations*. 2019;133:63-66. (In Russ.)

Вклад авторов

Пузанов А.Д. произвел синтез алгоритма обнаружения БЛА по АШ и оценку эффективности его функционирования, разработал структурную схему устройства обнаружения БЛА по АШ.

Нефёдов Д.С. осуществил постановку задач и общее руководство исследованиями, предложил идею учета корреляционных характеристик акустического шума (АШ) БЛА при синтезе математической модели и алгоритма обнаружения маловысотных БЛА по АШ.

Authors' contribution

Puzanau A.D. fulfilled the synthesis of an algorithm for detecting UAVs by AN and an assessment of the effectiveness of its functioning, developed a block diagram of the device for detecting a UAVs by AN.

Nefedov D.S. carried out the formulation of tasks and the general management of the research, proposed the idea of taking into account the correlation characteristics of acoustic noise (AN) from unmanned aerial vehicles (UAVs) when synthesizing a mathematical model and an algorithm for detecting low-altitude UAVs by AN.

Сведения об авторах

Пузанов А.Д., адъюнкт научно-исследовательской части Военной академии Республики Беларусь.

Нефёдов Д.С., к.т.н., доцент, заместитель начальника научно-исследовательской части – начальник научно-исследовательской лаборатории роботизированных систем Военной академии Республики Беларусь.

Information about the authors

Puzanau A.D., Adjunct of the Research Department of Military Academy of the Republic of Belarus.

Nefedov D.S., PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Scientific-Research Department of Military Academy of the Republic of Belarus.

Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,
г. Минск, пр-т Независимости, 220
Военная академия Республики Беларусь;
тел. +375-44-516-10-83;
e-mail: alexandr.puzanov@my.com
Пузанов Александр Денисович

Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosty ave., 220,
Military Academy of the Republic of Belarus;
tel. +375-44-516-10-83;
e-mail: alexandr.puzanov@my.com
Puzanau Aliaksandr Denisovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-2-74-82>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396.62

ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ РАДИОПРИЕМНЫХ ТРАКТОВ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

П.В. ЗАЯЦ, И.Ю. МАЛЕВИЧ

*ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации»
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 28 декабря 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Актуальность исследования систем автоматической регулировки чувствительности (АРЧ) определяется их востребованностью при создании и модернизации радиоприемных трактов (РПТ) с повышенной помехозащищенностью для систем радиолокации, радионавигации и радиосвязи. В статье выполнен анализ типовых аттенюаторных АРЧ, которые традиционно широко используются для согласования динамического диапазона (ДД) РПТ с ДД группового радиосигнала, определяемого текущим состоянием электромагнитной обстановки в месте приема. Показана принципиальная возможность повышения помехозащищенности РПТ с аттенюаторными АРЧ на основе текущего анализа суммарного процесса в полосе фильтра основной селекции. Одновременно установлено, что процедура определения оптимального значения коэффициента передачи аттенюатора характеризуется низким быстродействием. Кроме того, повышение помехозащищенности в РПТ с такими АРЧ приводит к ощутимой потере чувствительности. Обойти недостатки аттенюаторных АРЧ позволяют структуры, реализующие размен коэффициента передачи РПТ на ДД и линейность. Исследования возможных вариантов таких АРЧ показали, что при пропорциональном размене коэффициента передачи на ДД обеспечивается улучшение помехозащищенности РПТ при сохранении высокой чувствительности системы. Предложена оригинальная система АРЧ, инвариантная к шагу дискретизации коэффициентов передачи регулируемых элементов с повышенным быстродействием. Рассмотренные структурные решения и алгоритмы позволяют оптимизировать технический облик РПТ радиолокации, радионавигации и радиосвязи с повышенной помехозащищенностью и адаптировать их характеристики к условиям нестационарной электромагнитной обстановки.

Ключевые слова: радиоприемный тракт, помехозащищенность, автоматическая регулировка чувствительности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Заяц П.В., Малевич И.Ю. Повышение помехозащищенности радиоприемных трактов с автоматической регулировкой чувствительности. Доклады БГУИР. 2021; 19(2): 74-82.

INCREASING THE NOISE IMMUNITY OF RADIO RECEIVING PATHS WITH AUTOMATIC SENSITIVITY CONTROL

PAVEL V. ZAYATS, IGOR Yu. MALEVICH

JSC “KB Radar” – Managing Company of “Radar Systems” Holding (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 28 December 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The relevance of the study of automatic sensitivity control systems (ASC) is determined by their demand for the creation and modernization of radio receiving paths (RRP) with increased noise immunity for radar systems, radio navigation and radio communication. The article analyzes typical attenuating ASCs, which are traditionally widely used to match the dynamic range (DR) of the RRP with the DR of a group radio signal, determined by the current state of the electromagnetic environment at the receiving system location. The fundamental possibility of increasing the noise immunity of RRP with attenuating ASCs is shown on the basis of the current analysis of the resulting output signal in the IF main filter band. At the same time, it was found that the procedure for determining the optimal value of the attenuator transmission coefficient is characterized by low response speed. In addition, an increase in noise immunity in a RRP with such ASC leads to a significant loss of sensitivity. To overcome the disadvantages of attenuating ASCs, structures that implement the exchange of the transmission coefficient of the RRP to DR and linearity are proposed. Studies of various possible ASC structures have shown that with a proportional exchange of the transmission coefficient for the DR, an improvement in the noise immunity of the RRP is provided while maintaining a high sensitivity of the system. An original ASC system is proposed, which is invariant to the sampling step of the transmission coefficients of controlled elements with increased performance. The considered structural solutions and algorithms make it possible to optimize the technical appearance of RRP for radar, radio navigation and radio communication with increased noise immunity and to adapt their characteristics to the conditions of non-stationary electromagnetic environment.

Keywords: radio receiving paths, noise immunity, automatic sensitivity control.

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

For citation. Zayats P.V., Malevich I.Yu. Increasing the noise immunity of radio receiving paths with automatic sensitivity control. Doklady BGUIR. 2021; 19(2): 74-82.

Введение

Современные условия работы радиоприемных трактов (РПТ) систем радиолокации, радионавигации и радиосвязи характеризуются сложной электромагнитной обстановкой (ЭМО). Это объясняется, с одной стороны, высокой чувствительностью РПТ, а с другой – большим числом и высокими уровнями различных помех, действующих как в диапазоне частот полезного сигнала, так и за его пределами.

Одно из известных направлений повышения помехозащищенности РПТ связано с оптимизацией структур и параметров систем управления коэффициентом передачи тракта, включая автоматическую регулировку чувствительности (АРЧ) [1–4].

Исследование АРЧ для повышения помехозащищенности РПТ

Широко распространенным способом реализации АРЧ является использование на входе главного тракта приема (ГТП) РПТ адаптивно управляемого аттенюатора (АТ). Исследуем помехозащищенность РПТ с такой АРЧ, представив ГТП функциональной моделью в виде цепочечного соединения широкополосного маломощного усилителя (МШУ), широкополосного усилительно-преобразовательного звена (УПЗ) и фильтра основной селекции (ФОС) (рис. 1).

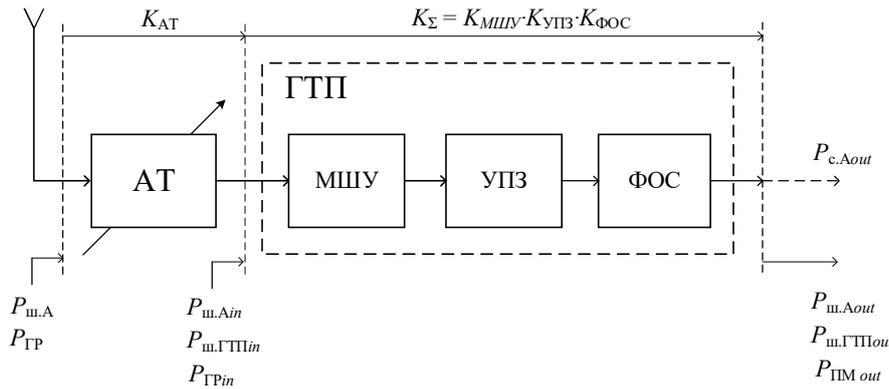


Рис. 1. Структура РПТ с простой аттенуаторной АРЧ
Fig. 1. RRP structure with a simple attenuator ASC

Для интегральной оценки качества РПТ с простой аттенуаторной АРЧ используем нормированный коэффициент помехозащищенности

$$\Pi_N = \Pi \cdot \frac{P_{ш.ГТПout} + P_{ш.Аout}}{P_{ш.Аout}}, \quad (1)$$

где Π – коэффициент помехозащищенности [1]:

$$\Pi = \frac{P_{ш.ГТПout} + P_{ш.Аout} + P_{ПМout}}{P_{ш.ГТПout} + P_{ш.Аout}}; \quad (2)$$

$P_{ш.ГТПout} = P_{ш.ГТПin} K_{\Sigma} = kT\Delta f_{ПЧ} (K_{ш} - 1)K_{\Sigma}$ – мощность собственных шумов на выходе ГТП (k – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T – температура окружающей среды (293 К); $\Delta f_{ПЧ}$ – ширина полосы пропускания ФОС; $K_{ш}$ – коэффициент шума ГТП; K_{Σ} – коэффициент передачи ГТП как цепи из звеньев УПЗ и ФОС);

$P_{ш.Аout} = P_{ш.А} \cdot K_{AT} \cdot K_{\Sigma} = P_{ш.Аin} \cdot K_{\Sigma} = kT_{ш.А} \cdot \Delta f_{ПЧ} \cdot K_{AT} \cdot K_{\Sigma}$ – мощность шумов, поступающих из антенны по основному каналу приема РПТ ($T_{ш.А}$ – шумовая температура антенны, которая определяется интенсивностью тепловых, атмосферных, космических, промышленных и др. шумов; K_{AT} – коэффициент передачи АТ системы АРЧ);

$P_{ПМout}$ – интегральная мощность помех (обусловленных наличием в составе группового сигнала ($P_{ГР}$), поступающего из антенны на вход РПТ с АРЧ, внеполосных помеховых компонент), проникающих в тракт по всем учитываемым внеполосным каналам приема [5]:

$$P_{ПМout} = \sum_{i=1}^n P_{ПМiout}, \quad (3)$$

где $P_{ПМiout}$ – мощность помехи, принятой РПТ по i -му внеполосному каналу приема. Как известно [1], $P_{ПМout}$ может быть представлена полиномом по степеням n от $P_{ГРi}$:

$$P_{ПМout} = \sum_{j=2}^n \alpha_j \cdot (P_{ГРi})^j, \quad (4)$$

где $P_{ГРin} = P_{ГР} \cdot K_{AT}$ – мощность группового сигнала на входе УПЗ, в котором происходит нелинейное преобразование внеполосных помех в полосу ФОС РПТ.

Перепишем выражение (1) для Π_N в виде функции от K_{AT} :

$$\Pi_N(K_{AT}) = \frac{P_{ш.ГТПout} + P_{ш.Аout} + P_{ПМout}}{P_{ш.Аout}} = \frac{(P_{ш.ГТПin} + P_{ш.А} \cdot K_{AT}) \cdot K_{\Sigma} + \varphi(K_{AT})}{P_{ш.А} \cdot K_{AT} \cdot K_{\Sigma}} = \frac{F(K_{AT})}{P_{ш.Аout}(K_{AT})}, \quad (5)$$

где $P_{ПМout} = \varphi(K_{AT})$ определяется нелинейной зависимостью (4) от $P_{ГРi}$.

Очевидно, чем меньше заметность $P_{ш.ГТПout}$ и $P_{ПМout}$, тем ближе $\Pi_N(K_{AT})$ к 1 и выше помехозащищенность РПТ. Тогда определим условие минимума Π_N по K_{AT} :

$$\frac{\partial \Pi_N(K_{AT})}{\partial K_{AT}} = \frac{P_{ш.А} \cdot K_{\Sigma} \left(\frac{\partial F(K_{AT})}{\partial K_{AT}} \cdot K_{AT} - F(K_{AT}) \right)}{[P_{ш.Аout}(K_{AT})]^2} = 0, \quad (6)$$

откуда для $K_{AT} = K_{ATopt}$:

$$\frac{\partial F(K_{AT})}{\partial K_{AT}} = \frac{F(K_{AT})}{K_{AT}}. \quad (7)$$

Геометрическая интерпретация (4) и (7) приведена на рис. 2.

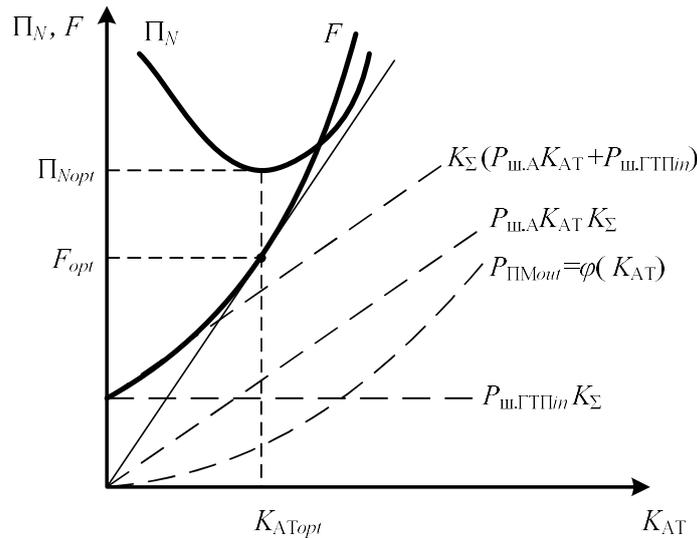


Рис. 2. Зависимости нормированного коэффициента помехозащищенности Π_N и уровня группового сигнала в ФОС F от коэффициента передачи аттенюатора K_{AT}

Fig. 2. Dependence of the normalized coefficient of noise immunity Π_N and the level of the group signal in the IF main filter band F on the transmission coefficient of the attenuator K_{AT}

Видно, что Π_N определяется функциональной зависимостью уровня группового сигнала в ФОС РПТ ($F(K_{AT})$) от коэффициента передачи входного аттенюатора K_{AT} . Π_{Nopt} соответствует точке оптимума [K_{ATopt} , F_{opt}], которая устанавливается касательной к функции $F(K_{AT})$, проходящей через начало системы координат. Таким образом, в заданной ЭМО выполнение условия (7) для тракта с простой аттенюаторной АРЧ позволяет обеспечить наилучшую помехозащищенность РПТ.

Однако полученное значение Π_{Nopt} РПТ с простой аттенюаторной АРЧ достаточно большое и, например, в метровом диапазоне для напряженной ЭМО [5] составляет 10...15. Кроме этого, для поиска Π_{Nopt} в соответствии с (7) в каждой точке требуется произвести два измерения $F(K_{AT})$, и количество таких точек при малом дискрете K_{AT} будет большим. Это может оказаться недопустимым для применения такой структуры АРЧ, например, в РПТ РЛС, поскольку временной интервал, отводимый для анализа внешней ЭМО (и, соответственно, адаптации) зачастую не превышает 100 мкс.

Улучшить значение Π_{Nopt} за счет снижения потери чувствительности позволяет перенос МШУ из состава ГТП на вход РПТ [6] (рис. 3). В таком случае $K_{\Sigma} = K_{УПЗ} \cdot K_{ФОС}$.

Выражение для Π_N такого РПТ имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \Pi_N(K_{AT}) &= \frac{P_{ш.ГТПout} + P_{ш.Аout} + P_{ш.МШУ}}{P_{ш.Аout}} = \\ &= \frac{(P_{ш.ГТПin} + (P_{ш.МШУ} + P_{ш.А} K_{МШУ}) \cdot K_{AT}) \cdot K_{\Sigma} + \varphi(K_{AT})}{P_{ш.А} K_{МШУ} K_{AT} K_{\Sigma}} = \frac{F^*(K_{AT})}{P_{ш.Аout}(K_{AT})}. \end{aligned} \quad (8)$$

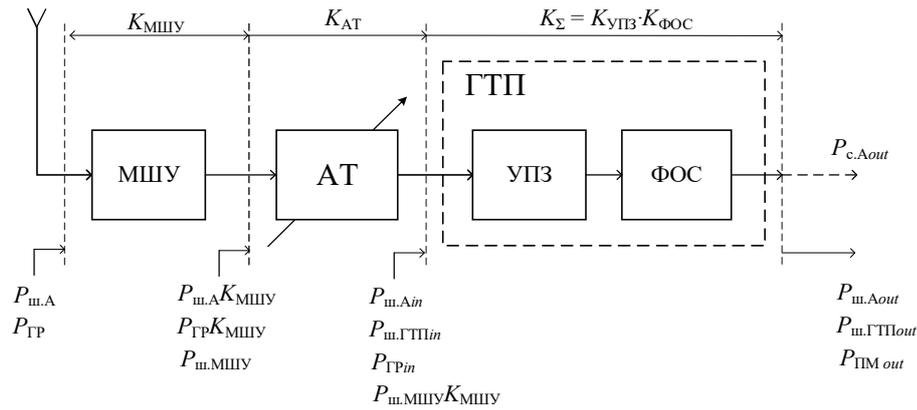


Рис. 3. Структура высокочувствительного РПТ с простой аттенуаторной АРЧ
Fig. 3. High sensitivity RRP structure with a simple attenuator ASC

Из сравнения (8) с (5) видно, что условие минимума Π_{Nopt} по-прежнему соответствует (7), однако помехозащищенность РПТ выше, так как его абсолютное значение ближе к 1, чем для простой аттенуаторной АРЧ.

В рассмотренной схеме важно использовать высоколинейные МШУ с большим порогом перегрузки. В противном случае, например, для типовых МШУ с коэффициентом усиления $K_{МШУ} = 18...25$ дБ, в сложной ЭМО возможно существенное возрастание вклада их нелинейных шумов в общую нелинейность РПТ. При этом включение АРЧ с затуханием АТ более 10 дБ может привести к ситуации, когда нелинейность УПЗ уже не будет вносить решающий вклад в общий уровень нелинейных помех на выходе РПТ.

Решение такой проблемы может быть получено, например, в структуре с эстафетной АРЧ (рис. 4) при многопараметровом регулировании [1, 4, 7].

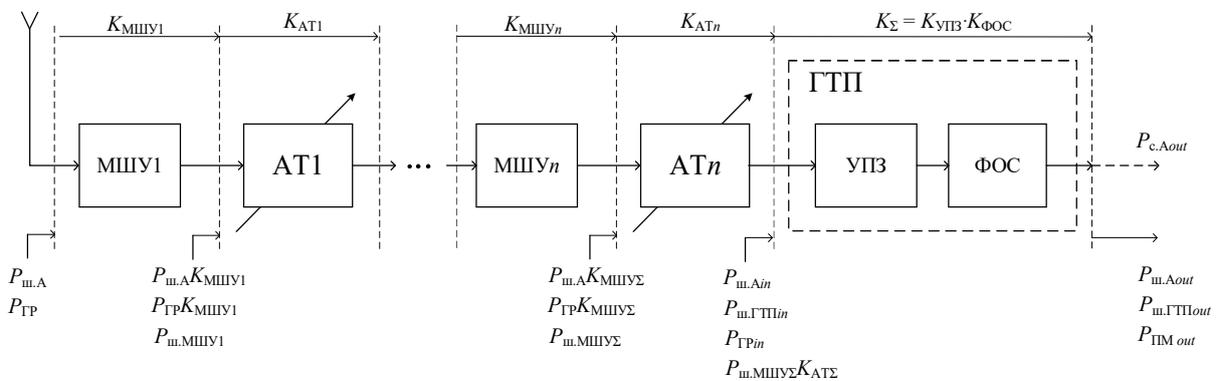


Рис. 4. Структура РПТ с эстафетной аттенуаторной АРЧ
Fig. 4. RRP structure with a multi cascaded attenuator ASC

Здесь в сложной ЭМО реализуется эффективная защита РПТ и усилительных звеньев структуры с минимальной потерей чувствительности. Однако, как и для ранее рассмотренных систем, в такой структуре невозможно избежать накопления линейных шумов в тракте при адаптации. Кроме того, уже для $n = 2$ (т. е. регулируемые АТ используются в двух сечениях тракта) время поиска оптимальной комбинации коэффициентов $K_{АТ1}$ и $K_{АТ2}$, очевидно, возрастает. Последнее обстоятельство существенно ограничивает возможность использования подобных структур АРЧ в нестационарной ЭМО.

Логичным шагом, позволяющим обойти недостатки аттенуаторных АРЧ, является переход к структурам, реализующим обмен коэффициента передачи РПТ на динамический диапазон (ДД) и линейность [8]. Возможный вариант такой АРЧ приведен на рис. 5.

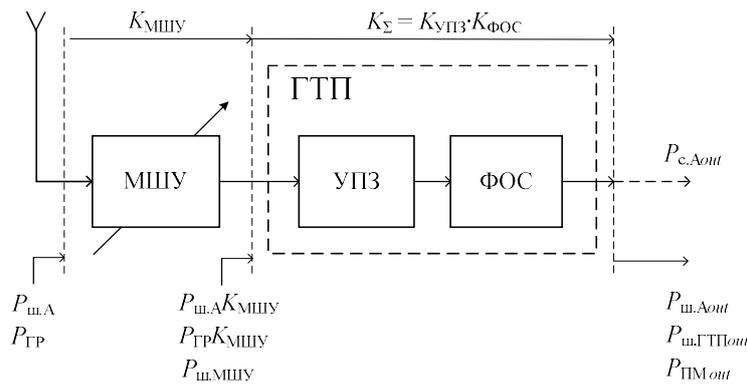


Рис. 5. Структура РПТ с АРЧ с регулируемым МШУ
Fig. 5. RRP structure with an adjustable LNA

Здесь регулируемый высоколинейный МШУ выполняет функцию уровневой защиты ГТП от нелинейного поражения. Например, в [9] рассмотрен адаптивный усилитель с дискретно управляемым коэффициентом передачи, в котором регулировка усиления производится посредством изменения глубины бесшумной (реактивной) отрицательной обратной связи. При снижении коэффициента передачи в такой системе коэффициент шума МШУ сохраняется практически неизменным, а верхняя граница ДД пропорционально увеличивается. Таким образом, структура РПТ с АРЧ на базе регулируемого высоколинейного МШУ в нестационарной ЭМО обладает ключевым преимуществом в сравнении с тремя предыдущими – при уменьшении коэффициента передачи регулятора минимизируется ухудшение чувствительности РПТ.

Наряду с поиском новых эффективных структур и технических решений АРЧ, важным вопросом является разработка быстродействующих алгоритмов уровневой адаптации, реализующих оптимальный размен чувствительности РПТ на линейность. Решение этой задачи связано с разработкой алгоритма поиска Π_{Opt} , в котором отсутствует необходимость реализации континуума малых приращений K_{AT} , существенно ограничивающих быстродействие АРЧ. Такая процедура может быть реализована в тракте с встречным (т. е. противоположным) синхронным изменением коэффициентов передачи АРЧ (например, на базе регулируемого МШУ) и УПЗ (рис. 6).

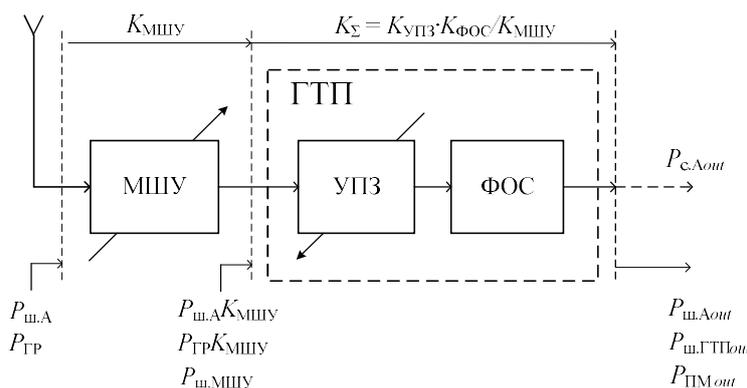


Рис. 6. Структура РПТ с АРЧ встречного регулирования
Fig. 6. RRP structure with a counter regulation ASC

Общий коэффициент передачи ГТП определяется выражением

$$K_{\Sigma} = K_{УПЗ} \cdot K_{ФОС} / K_{МШУ} \cdot$$

(9)

Тогда выражение для Π_N приобретает следующий вид:

$$\Pi_N(K_{\text{МШУ}}) = \frac{P_{\text{ш.ГТТ}} P_{\text{out}} + P_{\text{ш.А}} P_{\text{out}} + P_{\text{ш.МШУ}}}{P_{\text{ш.А}} K_{\text{МШУ}} K_{\Sigma}} = \frac{(P_{\text{ш.ГТТ}} P_{\text{in}} + P_{\text{ш.МШУ}} + P_{\text{ш.А}} K_{\text{МШУ}}) \cdot K_{\text{АТ}} + \varphi(K_{\text{МШУ}})}{P_{\text{ш.А}} K_{\text{МШУ}} K_{\Sigma}} = \frac{F^{**}(K_{\text{МШУ}})}{P_{\text{ш.А}}}. \quad (10)$$

Видно, что, поскольку $K_{\text{МШУ}} \cdot K_{\Sigma} = \text{const}$, знаменатель в (10) является величиной постоянной, не зависящей от $K_{\text{МШУ}}$. **

Нетрудно показать, что в такой системе условие минимума Π_N имеет вид

$$\frac{\partial F^{**}(K_{\text{МШУ}})}{\partial K_{\text{МШУ}}} = 0. \quad (11)$$

Геометрическая интерпретация (11) приведена на рис. 7, откуда видно, что минимум Π_N соответствует минимуму зависимости $F^{**}(K_{\text{МШУ}})$.

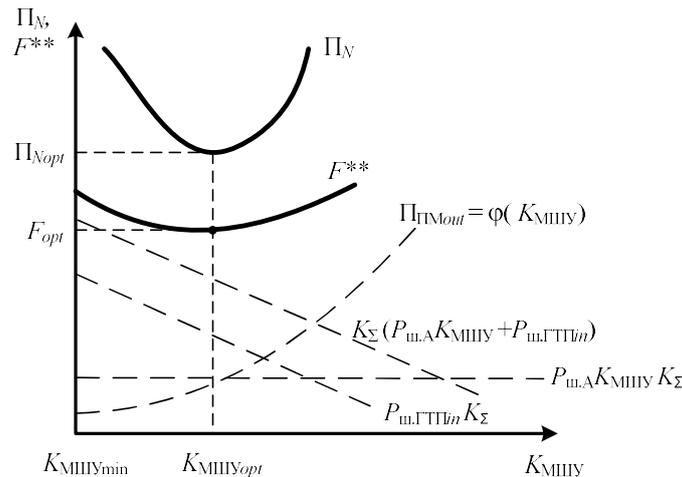


Рис. 7. Зависимости нормированного коэффициента помехозащитности Π_N и уровня группового сигнала в ФОС F^{**} от коэффициента передачи МШУ РПТ с АРЧ встречного регулирования

Fig. 7. Dependence of the normalized coefficient of noise immunity Π_N and the level of the group signal in the IF main filter band F^{**} on the LNA gain for RRP structure with a counter regulation ASC

Предложенная структура РПТ с АРЧ встречного регулирования позволяет вместо затратного алгоритма контроля условия (7) выполнять простой поиск минимального значения $F^{**}(K_{\text{МШУ}})$ при переключении $K_{\text{МШУ}}$. Такое свойство предложенной структуры дает существенное преимущество при аппаратной реализации – в качестве регулируемого МШУ могут использоваться простые схемы с дискретно переключаемым коэффициентом передачи [10, 11].

Заключение

Таким образом, исследованы вопросы повышения помехозащитности радиоприемных трактов методом уровневой параметрической адаптации. Проведен анализ характеристик радиоприемных трактов с различными типами систем автоматической регулировки чувствительности.

Показано, что требования низкого уровня собственных шумов, большого динамического диапазона и малой инерционности наилучшим образом удовлетворяются оригинальной системой автоматической регулировки чувствительности с регулируемыми элементами в виде МШУ с переключаемыми дискретными усилениями.

Доказана возможность определения строгих условий достижения максимума отношения сигнал/помеха без разделения шумовых и нелинейных составляющих на основе аппаратного анализа суммарного процесса в полосе фильтра основной селекции радиоприемного тракта при дискретном изменении усиления МШУ.

Разработана система автоматической регулировки чувствительности, инвариантная к шагу дискретизации коэффициентов передачи регулируемых элементов с повышенным быстродействием.

Рассмотренные структурные решения и алгоритмы позволяют оптимизировать технический облик радиоприемных трактов радиолокации, радионавигации и радиосвязи и адаптировать их характеристики к условиям нестационарной ЭМО.

Список литературы

1. Богданович Б.М. *Радиоприемные устройства с большим динамическим диапазоном*. М.: Радио и связь; 1984.
2. Сон Л.З. *Оптимизация радиоприемного устройства по критерию помехозащищенности: автореф. дис. доктора техн. наук: 05.12.17*. СПб; 1993.
3. Малевич И.Ю. *Радиоприемные устройства*. Мозырь: Белый ветер; 2000.
4. Малевич И.Ю. *Методы синтеза широкополосных усилительных трактов с контролируемыми параметрами динамического диапазона*. Минск: Тонпик; 2004.
5. Малевич И.Ю., Заяц П.В. Помехозащищенность радиоприемных трактов РЛС метрового диапазона и пути ее повышения. *Вестник Военной академии Республики Беларусь*. 2020;2(67):40-46.
6. Патент РФ № 2004104060/09, 11.02.2004. Цыпленков Ю.С., Рыжков Д.Е., Борисов А.А. Радиолокационный приемник с большим динамическим диапазоном по интермодуляции третьего порядка. *Патент России*. 2005; № 2254590. Бюл. №17.
7. Чердынцев В.А., Малевич И.Ю., Курочкин А.Е. *Методы и устройства приема и обработки радиосигналов*. Минск: БГУИР; 2010.
8. Малевич И.Ю. *Синтез высоколинейных радиочастотных усилительных трактов*. Минск: Бестпринт; 2009.
9. Малевич И.Ю., Заяц П.В. Адаптивный широкополосный малощумящий усилитель радиочастоты. *Доклады БГУИР*. 2020;18(6):66-74.
10. Малевич И.Ю., Солоневич Д.А. Широкополосный усилитель высокой частоты с коммутируемым коэффициентом передачи. *Наука и военная безопасность*. 2017;2(52):25-28.
11. Малевич И.Ю., Заяц П.В. Синтез широкополосного малощумящего усилителя с управляемым ступенчатым коэффициентом передачи. *Вестник Военной академии Республики Беларусь*. 2018;4(61):133-139.

References

1. Bogdanovich B. M. [*High dynamic range radio receivers*]. Moscow: Radio i Svyaz; 1984. (In Russ.)
2. Son L.Z. [*Optimization of a radio receiving device according to the criterion of noise immunity*]. St.Petersburg; 1993. (In Russ.)
3. Malevich I.Y. [*Radio receivers*]. Mozyr: Belyi Veter; 2000. (In Russ.)
4. Malevich I.Y. [*Methods for the synthesis of broadband amplifying paths with controlled parameters of the dynamic range*]. Minsk: Tonpik; 2004. (In Russ.)
5. Malevich I.Y., Zayats P.V. [Noise immunity of radio receiving paths of VHF radars and ways to improve it]. *Vestnik Voennoy Akademii Respubliki Belarus*. 2020;2(67):40-46. (In Russ.)
6. Patent RU № 2004104060/09, 11.02.2004. Tsyplenkov Ju.S., Ryzhkov D.E., Borisov A.A. [Radar receiver with large dynamic range by intermodulation of third order]. *Patent RU*. 2005; № 2254590. Бюл. №17.
7. Cherdyntsev V.A., Malevich I.Y., Kurochkin A.E. [*Methods and devices for receiving and processing radio signals*]. Minsk: BSUIR; 2010. (In Russ.)
8. Malevich I.Y. [*Synthesis of High-Linear RF Amplifier Paths*]. Minsk: Bestprint; 2009. (In Russ.)
9. Malevich I.Y., Zayats P.V. [Adaptive broadband low noise radio frequency amplifier]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2020;18(6):66-74. (In Russ.)
10. Malevich I.Y., Solonovich D.A. [High frequency broadband amplifier with switched gain]. *Nauka i voennaya bezopasnost'*. 2017;2(52):25-28. (In Russ.)
11. Malevich I.Y., Zayats P.V. [Synthesis of a wideband low noise amplifier with a controlled step gain]. *Vestnik Voennoy Akademii Respubliki Belarus*. 2018;4(61):133-139. (In Russ.)

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Заяц П.В., начальник отдела ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации».

Малевич И.Ю., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник службы фундаментальных и прикладных исследований ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации».

Information about the authors

Zayats P.V., Head of Department at JSC “KB Radar” – Managing Company of “Radar Systems” Holding.

Malevich I.Y., D.Sc., Professor, Senior Resercher of the Fundamental and Applied Research Division of JSC “KB Radar” – Managing Company of “Radar Systems” Holding.

Адрес для корреспонденции

220026, Республика Беларусь,
г. Минск, Партизанский пр-т, 64 а,
ОАО «КБ Радар» – управляющая компания
холдинга «Системы радиолокации»;
тел. +375-17-295-30-91;
e-mail: p.zayats@kbradar.by
Заяц Павел Владимирович

Address for correspondence

220026, Republic of Belarus,
Minsk, Partizanski ave., 64 a,
JSC “KB Radar” – Managing Company
of “Radar Systems” Holding;
tel. +375-17-295-30-91;
e-mail: p.zayats@kbradar.by
Zayats Pavel Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-2-83-90>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 681.142.2

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА НЕЧЕТКИХ АНТИКРИЗИСНЫХ УПРАВЛЕНИЙ

О.В. GERMAN, М.В. КУЗНЕЦОВ

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

Поступила в редакцию 28 января 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. В статье содержится описание модели и подхода для численной оценки нечетких управлений при реализации антикризисной стратегии в так называемой «серой области», под которой понимается множество переходных состояний системы между условно нормальными и угрожающими банкротством. Поведение экономической (финансовой) системы описывается многомерным вектором, например, пятифакторной моделью Альтмана. Оценки, даваемые этой моделью, распределены по трем диапазонам, соответствующим устойчивому состоянию системы, негативному состоянию и «серой области», в которой намечается траектория движения к зоне банкротства, а состояния в серой области могут быть оценены с помощью нечетких переменных, характеризующих степень близости к зоне банкротства. Соответственно значениям этих переменных должны быть реализованы управления для вывода системы в устойчивую благоприятную зону. Достаточно развит общий аппарат определения антикризисных стратегий управления, в то же время определение числовых характеристик этих управлений как самостоятельная задача требует дальнейшей формализации и разработки численных методов. Данная статья содержит один возможный вариант формализации и его реализацию с помощью аналитической библиотеки языка Python. Приведенная модель и алгоритм являются достаточно универсальными и могут быть сравнительно просто адаптированы с учетом конкретной специфики задачи. Отличительной чертой предложенного в статье подхода, например в сравнении с нейросетевыми моделями, является снижение степени субъективности в выборе правил управления. Эта степень здесь определяется не функцией соответствующей нечеткой меры, а весовыми коэффициентами значимости антикризисных управлений и реальными ресурсами для их реализации.

Ключевые слова: антикризисное управление, модель управления с нечеткими переменными, оптимальное управление в многокритериальной системе.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Герман О.В., Кузнецов М.В. Количественная оценка нечетких антикризисных управлений. Доклады БГУИР. 2021; 19(2): 83-90.

QUANTITATIVE ESTIMATION OF FUZZY CRISIS MANAGEMENT

OLEG V. GERMAN, MIKHAIL V. KUZNETSOV

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

Submitted 28 January 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The model and the description of the numerical assessment of uncertain (fuzzy) controls in the implementation of the crisis management in the so-called "gray area", combining transient states of the system, is presented in the article. The behavior of the economic (financial) system is described by a multidimensional vector, for example, the Altman five-factor model. The estimates given by this model are distributed over three ranges, corresponding to the stable state of the system, the negative state, and the "gray area" in which the trajectory of movement towards the bankruptcy zone is outlined and consisting of the states which can be evaluated by means of fuzzy variables, characterizing proximity to the bankruptcy zone. According to the values of these state variables, controls must be implemented to bring the system into a stable favorable zone. The general apparatus for determining crisis management strategies is sufficiently developed, at the same time, the determination of the numerical characteristics of these controls, as an independent task, requires further formalization and development of numerical methods. This article contains one possible formalization and its implementation using the analytical library of the Python language. The presented model and algorithm are quite universal and can be relatively simply adapted taking into account the specific features of the problem. A distinctive feature of the approach proposed in the article, for example in comparison with neural network models, is a decrease in the degree of subjectivity in the choice of the control rules. This degree is determined here not by the function of the corresponding fuzzy measure, but by the weight coefficients of the significance of crisis management options and the real resources for their implementation.

Keywords: crisis management, control model with fuzzy variables, optimal control in a multicriteria system.

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interests.

For citation: German O.V., Kuznetsov M.V. Quantitative estimation of fuzzy crisis management. Doklady BGUIR. 2021; 19(2): 83-90.

Введение

Управление предприятием в условиях кризиса и проблемы, связанные с оценкой риска банкротства и его предупреждением, привлекают серьезное внимание [1–4]. Банкротство является следствием неэффективной финансово-экономической политики, отсутствием инноваций и технологических модернизаций, слабостью маркетинговых исследований, невыгодных договоров, неблагоприятных внешне конъюнктурных условий и др. Сложность задач антикризисного (антирискового) менеджмента связана с неполнотой, неопределенностью, возможно, отсутствием четких проявлений кризисных данных и др. В теоретико-прикладном плане эти задачи сводятся к следующим: выявлению и оценке критериев банкротства или риска банкротства; построению модели для получения интегральной оценки риска банкротства на основе используемых критериев; вычислению вероятностей или иных величин, характеризующих риск банкротства и доводке модели с учетом специфики местных финансово-экономических условий; определению превентивных управленческих решений для противодействия риску банкротства.

В статье нас интересует последняя задача из указанного списка. Некоторые общие принципы моделирования антикризисных управлений представлены в работе [5]. В [6] приведены правила нечеткого регулирования антикризисных процессов. Однако усматривается два недостатка. Во-первых, нет критерия оптимальности используемой системы правил; во-вторых, функции нечетких мер для нечетких управлений построены без объективного

обоснования, причем этот недостаток универсальный – экспертные способы построения функций нечетких мер характеризуются высокой степенью субъективности. Данная работа опирается на следующую методологическую концепцию: имеется некоторый реестр антикризисных стратегий. Для оцифровки этих стратегий (т.е. получения количественных оценок на основании некоторой шкалы) строится оптимизационная задача с нечеткими переменными, решение которой дает ответ на вопрос, какие управления реализовывать в зависимости от степени выраженности кризисных явлений и в какой мере их реализовывать.

Обоснование и описание модели

Стратегии антикризисного управления варьируют на разных предприятиях, но в целом их можно свести к следующим [7]:

- увеличение финансирования основного производства (финансовые вливания) $(0,2) - U_1$;
- сокращение численности работающих $(0,51) - U_2$;
- изменение условий труда и организации производственного процесса $(0,38) - U_3$;
- создание интегрированной информационной системы предприятия или модернизация имеющейся $(0,3) - U_4$;
- сокращение заработной платы $(0,28) - U_5$;
- изменения в структуре руководства $(0,28) - U_6$;
- изменение структуры выпуска продукции (диверсификация) $(0,13) - U_7$;
- изменение в ценообразовании выпускаемой продукции $(0,22) - U_8$;
- снижение затрат (себестоимости) $(0,88) - U_9$;
- сокращение размеров бизнеса $(0,16) - U_{10}$;
- покупка новых технологий $(0,16) - U_{11}$;
- заключение новых кредитных договоров $(0,11) - U_{12}$;
- слияние со стратегическим партнером $(0,05) - U_{13}$;
- создание и совершенствование системы управления качеством $(0,28) - U_{14}$.

Здесь в скобках указаны численные оценки w_i важности соответствующих управлений U_i .

Очевидно, что приведенные виды управляющих воздействий трудно поддаются оцифровыванию (получению численных значений). Поэтому для целей настоящего исследования используем диапазон $[0...1]$, где 0 означает отсутствие управления, 1 – максимальный уровень управляющего воздействия. Вторым важным моментом заключается в выборе антикризисного управления или группы управляющих воздействий. Например, покупку новых технологий невозможно осуществить без наличия финансовых средств, площадей, специалистов, обоснованности технологических инноваций, состояния парка оборудования в текущий момент и пр. Слияние со стратегическим партнером затруднительно в условиях конкуренции, при этом существенно состояние дел партнера, его заинтересованность в объединении. Из сказанного следует, что необходимо учитывать предпосылки (условия) для реализации антикризисного управления. С математической точки зрения, наличие условий для управления можно передать импликацией

$$U_i \rightarrow r_{i1} \& r_{i2} \& \dots \& r_{im}, \quad (1)$$

где r_{ik} обозначают предусловия (ресурсы) для осуществления управления.

Рассмотрим упрощение (1) вида $U_i \rightarrow r_{i1}$. Эта импликация эквивалентна выражению $U_i = 0 \vee r_{i1} \geq c_{i1}$, где условие $r_{i1} \geq c_{i1}$ означает, что для реализации управления U_i нужен запас ресурса r_{i1} в размере не менее c_{i1} единиц. Далее условие $r_{i1} \geq c_{i1}$ заменим на нечеткую переменную μ_{i1} . Тогда выражение $U_i \rightarrow r_{i1}[\mu_{i1}]$ заменяем на

$$U_i = 0 \vee (r_{i1} \geq \mu_{i1} \geq U_i). \quad (2)$$

Это выражение передает следующий смысл: либо управление U_i не реализуется вовсе, либо реализуется с мерой истинности, не большей величины μ_{i1} , при этом логический эквивалент потребления ресурса r_{i1} не ниже значения μ_{i1} . Управление реализуется в той мере, в какой оно обеспечено ресурсом r_{i1} , но не выше. С другой стороны, реализуемая модель должна обеспечивать по возможности более высокий уровень μ_{i1} . Выражение (2) упростим до

$$r_{i1} \geq \mu_{i1} \geq U_i, \quad (3)$$

которое не исключает $U_i = 0$.

На основании (2, 3) получаем систему:

$$\begin{aligned} r_{i1} &\geq \mu_{i1} \geq U_i, \\ r_{i2} &\geq \mu_{i2} \geq U_i, \\ &\dots\dots\dots \\ r_{in} &\geq \mu_{in} \geq U_i. \end{aligned} \quad (4)$$

Исходя из условий (4), следует определить степень истинности (строгости) управлений U_i . Проблема выбора группы управляющих воздействий требует далее ввести целевой функционал, например, в форме линейной аддитивной функции

$$\sum_k w_k \cdot U_k \rightarrow \max, \quad (5)$$

где w_k – вес (оценка важности) управляющего воздействия U_k .

Наконец, следует иметь в виду, что некоторые ресурсы являются разделяемыми (т. е. требуются для реализации нескольких управляющих воздействий. Для таких ресурсов и использующих их управлений вводим неотрицательные а priori известные квоты α_{ik} , определяющие, сколько ресурса r_k требуется управлению U_i относительно других управлений, использующих этот же ресурс. При этом

$$\sum_k \alpha_{ik} = 1, \quad k = 1, K. \quad (6)$$

В связи с этим следует дополнительно рассматривать ограничения для затратных управлений вида

$$\sum_k \alpha_{ik} \cdot \mu_{ik} \leq \mu_i \leq 1, \quad i = 1, n_1, \quad (7)$$

$$\sum_k \alpha_{ik} \cdot r_{ik} = 1, \quad r_{ik} \geq \mu_{ik}, \quad (8)$$

и для управлений, связанных с прибылью

$$\sum_k \alpha_{ik} \cdot \mu_{ik} \geq \mu_i, \quad i = 1, n_2, \quad (9)$$

причем величины μ_i заданы. В (9) должен быть обеспечен уровень дохода не ниже μ_i .

Итак, задача свелась к распределению ограниченных ресурсов для реализации управляющих воздействий с учетом целевого функционала (5). Потребуем, наконец, чтобы степень строгости (истинности) принимаемого управления была не ниже некоторой величины η , оцениваемой как $\eta = \max(0, 5, \tau)$ (τ устанавливается, как показано ниже), в противном случае управление не реализуется вовсе. Это дает дополнительные ограничения вида

$$U_k = 0 \vee U_k \geq \eta. \quad (10)$$

Ограничения (10) называются дизъюнктивными.

Наконец, следует сделать последнее замечание. Если текущее состояние производственной системы попадает в «серый» кластер, то это также накладывает ограничение на управление, принимаемое для этого состояния. Если состояние классифицировано как «серое негативное» с оценкой τ , то каждое управляющее воздействие должно иметь уровень

не ниже τ , т. е. удовлетворять (10). Если состояние системы определяется как «серое позитивное», то требуем лишь выполнения условия $U_k \leq \tau$.

Итак, мы обозначили некоторую предварительную формализацию задачи принятия управленческого решения для «серой» области. Очевидно, что решению задачи выбора управления должна предшествовать задача распознавания ситуации в серой области. Эту задачу можно формализовать в терминах кластерного анализа [8].

Реализация модели на примере

Сформулируем общий подход к решению рассматриваемого типа задач. Для ясности изложения будем ориентироваться на следующий пример.

$$G = 0,2 \cdot U_1 + 0,5 \cdot U_2 + 0,38 \cdot U_3 + 0,3 \cdot U_4 + 0,28 \cdot U_5 + 0,28 \cdot U_6 + 0,13 \cdot U_7 + 0,22 \cdot U_8 + 0,88 \cdot U_9 + 0,16 \cdot U_{10} + 0,16 \cdot U_{11} + 0,11 \cdot U_{12} + 0,05 \cdot U_{13} + 0,28 \cdot U_{14} \rightarrow \max. \quad (11)$$

Будем рассматривать только два типа ресурсов (условий), связанных с реализацией управлений: μ_ϕ – затраты на финансирование; $\mu_{пр}$ – объем прибыли (доход).

Очевидно, затраты на управление связаны с потреблением ресурса (-ов), что отражено в (7)–(9). Что касается прибыли, то здесь управление должно обеспечить определенную долю получения прибыли. Обозначим через $\mu_{\phi i}(\mu_{пр i})$ долю финансовых затрат (объема прибыли) на реализацию управления U_i (ожидаемую от реализации управления U_i). Имеем следующие ограничения:

$$\begin{aligned} r_{\phi 1} &\geq \mu_{\phi 1} \geq U_1, & \mu_{пр 8} &\geq U_8, \\ \mu_{пр 2} &\geq U_2, & r_{\phi 9} &\geq \mu_{\phi 9} \geq U_9, \\ r_{\phi 3} &\geq \mu_{\phi 3} \geq U_3, & \mu_{пр 9} &\geq U_9, \\ \mu_{пр 3} &\geq U_3, & \mu_{пр 10} &\geq U_{10}, \\ r_{\phi 4} &\geq \mu_{\phi 4} \geq U_4, & r_{\phi 11} &\geq \mu_{\phi 11} \geq U_{11}, \\ \mu_{пр 5} &\geq U_5, & r_{\phi 12} &\geq \mu_{\phi 12} \geq U_{12}, \\ r_{\phi 6} &\geq \mu_{\phi 6} \geq U_6, & r_{\phi 13} &\geq \mu_{\phi 13} \geq U_{13}, \\ r_{\phi 7} &\geq \mu_{\phi 7} \geq U_7, & r_{\phi 14} &\geq \mu_{\phi 14} \geq U_{14}. \end{aligned} \quad (12)$$

Далее, примем заданными величины наличия ресурсов: $\mu_\phi = 0,7$, $\mu_{пр} = 0,6$, а также квоты на использования ресурсов:

$$\alpha_{\phi 1} = 0,06, \alpha_{\phi 3} = 0,12, \alpha_{\phi 4} = 0,07, \alpha_{\phi 6} = 0,07, \alpha_{\phi 7} = 0,04, \alpha_{\phi 9} = 0,3, \alpha_{\phi 11} = 0,08, \alpha_{\phi 12} = 0,08, \alpha_{\phi 13} = 0,09, \alpha_{\phi 14} = 0,09; \alpha_{пр 2} = 0,08, \alpha_{пр 3} = 0,12, \alpha_{пр 5} = 0,1, \alpha_{пр 8} = 0,1, \alpha_{пр 9} = 0,5, \alpha_{пр 10} = 0,1.$$

Это дает нам следующие ограничения:

$$0,06 \cdot \mu_{\phi 1} + 0,12 \cdot \mu_{\phi 3} + 0,07 \cdot \mu_{\phi 4} + 0,07 \cdot \mu_{\phi 6} + 0,04 \cdot \mu_{\phi 7} + 0,3 \cdot \mu_{\phi 9} + 0,08 \cdot \mu_{\phi 11} + 0,08 \cdot \mu_{\phi 12} + 0,09 \cdot \mu_{\phi 13} + 0,09 \cdot \mu_{\phi 14} \leq 0,7, \quad (13)$$

$$0,08 \cdot \mu_{пр 2} + 0,12 \cdot \mu_{пр 3} + 0,1 \cdot \mu_{пр 5} + 0,1 \cdot \mu_{пр 8} + 0,5 \cdot \mu_{пр 9} + 0,1 \cdot \mu_{пр 10} \geq 0,6. \quad (14)$$

$$0,06 \cdot r_{\phi 1} + 0,12 \cdot r_{\phi 3} + 0,07 \cdot r_{\phi 4} + 0,07 \cdot r_{\phi 6} + 0,04 \cdot r_{\phi 7} + 0,3 \cdot r_{\phi 9} + 0,08 \cdot r_{\phi 11} + 0,08 \cdot r_{\phi 12} + 0,09 \cdot r_{\phi 13} + 0,09 \cdot r_{\phi 14} = 1. \quad (15)$$

Допустим, оценка текущего состояния в серой области для принятия решения по управлению $\tau = 0,6$ (кластер негативный серый). Тогда получаем еще дополнительно следующую систему дизъюнктивных неравенств:

$$U_i = 0 \vee U_i \geq 0,6, \quad i = 1, 14. \quad (16)$$

Итак, имеем задачу линейного программирования с дизъюнктивными неравенствами (16).
Общая формализованная постановка имеет следующий вид.

Заданы: $\mu_i, w_i, \tau_j, \alpha_{ik}$ ($i = 1, N; j = 1, J; k = 1, K$).

$$\begin{aligned} \sum_i w_i \cdot U_i &\rightarrow \max, \\ r_{ik} &\geq \mu_{ik} \geq U_i, \quad k = 1, K, \\ \mu_{jt} &\geq U_j, \quad t = 1, T, \\ U_i &\geq \eta_i \vee U_i = 0, \\ \sum_i \alpha_{ik} &= 1, \end{aligned} \tag{17}$$

для затратных управлений:

$$\begin{aligned} \sum_k \alpha_{ik} \cdot \mu_{ik} &\leq \mu_i, \quad i = 1, n_1, \\ \sum_k \alpha_{ik} \cdot r_{ik} &= 1, \quad r_{ik} \geq \mu_{ik}, \quad i = 1, n, \quad 0 \leq r_{ik}, \mu_{ik} \leq 1, \end{aligned}$$

для прибыльных управлений:

$$\begin{aligned} \sum_k a_{ik} \cdot \mu_{ik} &\geq \mu_i, \quad i = 1, n_2, \\ \eta_j &= \max(0, 5, \tau_j). \end{aligned}$$

Определить: U_i .

Для решения системы (17) заменяем дизъюнктивные неравенства по следующим правилам: $U_i \geq \eta_i \vee U_i = 0$,

$$\begin{aligned} (U_i - \eta_i) \cdot U_i &\geq 0, \\ U_i &\geq 0. \end{aligned}$$

Таким образом, задача (17) может быть сформулирована как нелинейная оптимизационная задача. Воспользуемся языком Python для решения этой задачи. Код программы представлен ниже. Управления закодированы переменными $x[0] - U_1, x[1] - U_2, \dots, x[13] - U_{14}$. Для оптимизации используется метод `opt.minimize` пакета `scipy`. Функция оптимизации записана с помощью `lambda`-конструкции. Ограничения заданы параметром `cons`. Все ограничения по умолчанию имеют смысл \geq . Диапазоны изменения переменных задаются параметром `bnds`. Нечеткие переменные μ_{ϕ_i} определены в ячейках $x[14]$ (μ_{ϕ_1}), ..., $x[23]$ ($\mu_{\phi_{14}}$). Нечеткие переменные $\mu_{\text{пр}i}$ определены в ячейках $x[25]$ ($\mu_{\text{пр}2}$), ..., $x[30]$ ($\mu_{\text{пр}10}$). Нечеткие переменные r_{ϕ_i} определены в ячейках $x[33]$ (r_{ϕ_1}), ..., $x[40]$ ($r_{\phi_{14}}$). Для констант $\mu_{\phi}, \mu_{\text{пр}}$ используются ячейки $x[24]$ и $x[31]$ соответственно. Скрипт имеет следующий вид:

```
import numpy as np
import scipy.optimize as opt
import matplotlib.pyplot as plt

import numpy as np
import scipy.optimize as opt
import matplotlib.pyplot as plt

fun = lambda x: (-0.2*x[0] - 0.5*x[1] - 0.38*x[2]-0.3*x[3]-0.28*x[4]-0.28*x[5]-0.13*x[6]-
0.22*x[7]-0.88*x[8]-0.16*x[9]-0.16*x[10]-0.11*x[11]-0.05*x[12]-28*x[13])
cons = (({'type': 'ineq', 'fun': lambda x: (x[0] - 0.6) * x[0]},
{'type': 'ineq', 'fun': lambda x: (x[1] - 0.6) * x[1]},
{'type': 'ineq', 'fun': lambda x: (x[2] - 0.6) * x[2]},
{'type': 'ineq', 'fun': lambda x: (x[3] - 0.6) * x[3]},
{'type': 'ineq', 'fun': lambda x: (x[4] - 0.6) * x[4]},
{'type': 'ineq', 'fun': lambda x: (x[5] - 0.6) * x[5]},
{'type': 'ineq', 'fun': lambda x: (x[6] - 0.6) * x[6]},
{'type': 'ineq', 'fun': lambda x: (x[7] - 0.6) * x[7]},
{'type': 'ineq', 'fun': lambda x: (x[8] - 0.6) * x[8]},
{'type': 'ineq', 'fun': lambda x: (x[9] - 0.6) * x[9]},
{'type': 'ineq', 'fun': lambda x: (x[10] - 0.6) * x[10]},
{'type': 'ineq', 'fun': lambda x: (x[11] - 0.6) * x[11]},
{'type': 'ineq', 'fun': lambda x: (x[12] - 0.6) * x[12]},
```


Список литературы

1. Афанасьев Г.Л. *Crisis Management*. Москва; CMG; 1998.
2. Nescordieva I., Megits N. The methodical approach of bankruptsy probability estimation in an anti-crisis management system of enterprise. *Journal of Eastern European and Central Asian Research*. 2019;6(2):24-34.
3. Tarasova H., Zaharov S., Vereskun M., Kolosok V. Preventive anticrisis strategy for development of industrial enterprise. *Independent journal of management and production*. 2018;10(5):1405-1420.
4. Помазанов М.В., Колоколова О.В. Оценка вероятности банкротства предприятия по финансовым показателям. *Оперативное управление и стратегический менеджмент в коммерческом банке*. 2004;6(22):65-84.
5. Syllkin O., Kryshchanovich M., Zachepa A., Bilous S., Krasko A. Modeling the process of applying anti-crisis management in the system of ensuring financial security of the enterprise. *Business: Theory and practice*. 2019;20:446-455.
6. Balanovska T., Drahnieva N., Trojan A. Using of fuzzy modelling in anti-crisis management of agricultural enterprises. *Proceedings of the 2019 International Scientific Conference "Economic Sciences for Agribusiness and Rural Economy"*, Warsaw, 5-7 June 2019. 2019;3:22-30.
7. Starosta A. Anti-crisis Management Strategies. The case of companies in the Greater Poland Voivodeship. *Management*. 2014;18(1):256-265.
8. Герман О.В., Герман Ю.О., Кузнецов М.В. Подход к выбору управления в системе кластеров. *Труды БГТУ. Сер. 3. Физико-математические науки и информатика*. 2020;1(230):63-68.

References

1. Afanasjev G.L. [*Crisis Management*]. Moscow: CMG; 1998. (In Russ.)
2. Nescordieva I., Megits N. The methodical approach of bankruptsy probability estimation in an anti-crisis management system of enterprise. *Journal of Eastern European and Central Asian Research*. 2019;6(2):24-34.
3. Tarasova H., Zaharov S., Vereskun M., Kolosok V. Preventive anticrisis strategy for development of industrial enterprise. *Independent journal of management and production*. 2018;10(5):1405-1420.
4. Pomazanov M.V., Kolokolova O.V. [Bankruptsy probability estimation by financial criteria]. *Operative control and strategic management*. 2004;6(22):65-84. (In Russ.)
5. Syllkin O., Kryshchanovich M., Zachepa A., Bilous S., Krasko A. Modeling the process of applying anti-crisis management in the system of ensuring financial security of the enterprise. *Business: Theory and practice*. 2019;20:446-455.
6. Balanovska T., Drahnieva N., Trojan A. Using of fuzzy modelling in anti-crisis management of agricultural enterprises. *Proceedings of the 2019 International Scientific Conference "Economic Sciences for Agribusiness and Rural Economy"*, Warsaw, 5-7 June 2019. 2019;3:22-30.
7. Starosta A. Anti-crisis Management Strategies. The case of companies in the Greater Poland Voivodeship. *Management*. 2014;18(1):256-265.
8. German O.V., German J.O., Kuznetsov M.V. [An approach to control choice in the system of clusters]. *Proceedings of Belarussian technological university*. 2020;1(230):63-68. (In Russ.)

Вклад авторов / Author's contribution

Авторы внесли одинаковый совместный вклад в данную публикацию.
The authors made equal joint contribution to the paper.

Сведения об авторах

Герман О. В., к.т.н., доцент кафедры информационных технологий автоматизированных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Кузнецов М. В., аспирант кафедры информационных технологий автоматизированных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220600, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;

Герман Олег Витольдович

Information about the authors

German O.V., PhD, Associate Professor at the Information Technologies in Automated Systems Department of the Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kuznetsov M.V., Postgraduate student at the Information Technologies in Automated Systems Department of the Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220600, Republic of Belarus,
Minsk, P.Brovki str. 6,
Belarussian State University
of Informatics and Radioelectronics;

German Oleg Vitoldovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-2-91-99>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.492.3

ОБНАРУЖЕНИЕ DGA ДОМЕНОВ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ BOTNET СРЕДСТВАМИ Q-ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ POMDP

Я.В. БУБНОВ, Н.Н. ИВАНОВ

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

Поступила в редакцию 29 января 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Предлагается эффективный метод предотвращения эксплуатации узлов компьютерной сети для организации botnet. Под botnet подразумевается совокупность устройств, объединенных через сеть Интернет с целью организации DDoS-атак, кражи данных, рассылки спама и других вредоносных действий. Описанный метод подразумевает детектирование сгенерированных доменных имен в DNS-запросах с помощью нейронной сети с параллельной организацией сверточных и двунаправленных рекуррентных слоев. Эффективность метода базируется на предположении, что для создания botnet используют генерируемые доменные имена для объединения. Эксперименты подтверждают, что предлагаемая нейронная сеть превосходит точность существующих аналогов на наборе данных UMUDGA. Вычисляется оценка качества распознавания сгенерированных доменных имен с помощью ROC-анализа для обученной нейронной сети. В статье также формулируется модель управления детекторами с помощью частично наблюдаемого марковского процесса принятия решений для блокировки зараженных узлов компьютерной сети. Предлагается поиск оптимальной политики для сформулированной модели средствами Q-обучения ценностных агентов. Производится сравнительный анализ по средней, минимальной и максимальной ценности принимаемых агентами действий в процессе взаимодействия с окружением.

Ключевые слова: алгоритм генерирования доменов, защита компьютерных сетей, рекуррентная нейронная сеть, частично наблюдаемый марковский процесс принятия решений, Q-обучение.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Бубнов Я.В., Иванов Н.Н. Обнаружение DGA доменов и предотвращение botnet средствами Q-обучения для POMDP. Доклады БГУИР. 2021; 19(2): 91-99.

DGA DOMAIN DETECTION AND BOTNET PREVENTION USING Q-LEARNING FOR POMDP

YAKOV V. BUBNOV, NICK N. IVANOV

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

Submitted 29 January 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. An effective method for preventing the operation of computer network nodes for organizing a botnet is proposed. A botnet is a collection of devices connected via the Internet for the purpose of organizing DDoS attacks, stealing data, sending spam and other malicious actions. The described method implies the detection of generated domain names in DNS queries using a neural network with parallel organization of convolutional and bidirectional recurrent layers. The effectiveness of the method is based on the assumption that generated domain names are used to create a botnet for merging. Experiments confirm that the proposed neural network is superior to the accuracy of existing counterparts on the UMUDGA dataset. The estimation of the quality of recognition of generated domain names using ROC analysis is calculated for a trained neural network. The article also formulates a model for controlling detectors using a partially observable Markov decision-making process to block infected nodes of a computer network. The search for the optimal policy for the formulated model by means of Q-learning of value agents is proposed. A comparative analysis of the average, minimum and maximum value of actions taken by agents in the process of interacting with the environment is carried out.

Keywords: domain generation algorithm, computer network security, recurrent neural network, partially observable Markov decision process, Q-learning.

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

For citation. Bubnov Y.V., Ivanov N.N. DGA domain detection and botnet prevention using Q-learning for POMDP. Doklady BGUIR. 2021; 19(2): 91-99.

Введение

Предотвращение вредоносной активности узлов корпоративной компьютерной сети является одной из важных прикладных задач. Ее решение позволяет устранить целевые кибератаки, направленные как на отказ системы в целом, так и на кражу конфиденциальной информации. Кража данных может носить катастрофические последствия, приводящие к потере доверия у пользователей, утрате конкурентного преимущества на рынке, а также снижению стоимости акций компании.

Как отмечается в работе [1], помимо кражи информации, с помощью туннелирования системы доменных имен узлы компьютерной сети могут использоваться для организации DDoS-атак. В такой схеме зараженный узел получает команды для начала атаки от центрального сервера злоумышленника. Как отмечается в работе [2], стандартной методологией для организации botnet стало использование алгоритмов генерации доменных имен (Domain Name Generation Algorithms, DGAs). То есть вредоносное программное обеспечение использует генератор псевдослучайных чисел для создания доменных имен. Созданные доменные имена в дальнейшем используются для поиска центрального сервера, который может изменять свое месторасположение динамически. По этой причине блокировка центральных серверов на практике затруднена: множество возможных комбинаций огромно.

В данной работе предлагается архитектура сверточно-рекуррентной нейронной сети с параллельным размещением слоев и двунаправленными LSTM-ячейками для детектирования DGA-имен в DNS-запросах. Также в работе рассматривается POMDP-модель оптимального управления DGA-детекторами в компьютерной сети.

Сверточно-рекуррентная нейронная сеть для обнаружения DGA-имен в DNS запросах

Сформулируем задачу обнаружения DGA-имен следующим образом: пусть $\mathbf{X} = \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$ – запрашиваемое доменное имя, с которым ассоциирована метка $y \in \mathbf{Y}$ с вероятностью p_y . Тогда стоит задача нахождения функции

$$y: \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{Y}. \quad (1)$$

Так как входы нейронной сети представляют собой вектор действительных чисел, требуется определить отображение символического множества \mathbf{X} в пространство R^k . Для этого воспользуемся модифицированным механизмом встраивания слов (англ. word embedding), предложенным в [3], где вместо словаря слов используется алфавит символов \mathbf{A} . Пусть дана функция $I(\mathbf{X})$, которая задает упорядочение множества \mathbf{A} . Тогда встраивание – это преобразование вектора символов в вектор целых чисел, где каждому символу $x \in \mathbf{X}$ в соответствие поставлен индекс из алфавита \mathbf{A} :

$$I: \mathbf{A} \rightarrow \{0, \dots, |\mathbf{A}|\}; \text{cemb}(\mathbf{X}) = [I(x_1), I(x_2), \dots, I(x_n)]. \quad (2)$$

Для краткости дальнейших выкладок определим полносвязный слой выражением

$$\Delta(\mathbf{h}) = D_{0,5}(a_{relu}(\mathbf{h})), \quad (3)$$

где $D_{0,5}$ – оператор прореживания связей, а a_{relu} – линейная функция ректификации.

В работе [4] рассматривается использование нейронных сетей с двунаправленными LSTM-ячейками для улучшения качества классификации в решении задачи выделения ключевых фраз – фраз, определяющих основную тему анализируемого текстового документа. Авторы отмечают, что при использовании двух рекуррентных слоев, состоящих из LSTM-ячеек, где один слой обучается на последовательности символов в прямом направлении, а второй – в обратном, наблюдается улучшение точности определения контекста фраз в тексте. В общем виде двунаправленный LSTM-слой формируется следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{h}}^{(t)} &= H(\mathbf{W}_{x\bar{h}}\mathbf{x}^{(t)} + \mathbf{W}_{\bar{h}\bar{h}}\bar{\mathbf{h}}^{(t-1)} + \mathbf{b}_{\bar{h}}); \tilde{\mathbf{h}}^{(t)} = H(\mathbf{W}_{x\tilde{h}}\mathbf{x}^{(t)} + \mathbf{W}_{\tilde{h}\tilde{h}}\tilde{\mathbf{h}}^{(t-1)} + \mathbf{b}_{\tilde{h}}), \\ \mathbf{z}_{\text{bi-lstm}}^{(t)} &= \mathbf{W}_{\bar{h}z}\bar{\mathbf{h}}^{(t)} + \mathbf{W}_{\tilde{h}z}\tilde{\mathbf{h}}^{(t)} + \mathbf{b}_z, \end{aligned} \quad (4)$$

т. е. производится объединение рекуррентных слоев, осуществляющих распространение в прямом и обратном направлениях, где \mathbf{W} – матрица весов, а \mathbf{b} – вектор смещений для каждой пары сопряженных слоев.

Воспользуемся данным подходом для усовершенствования архитектуры нейронной сети для классификации DGA-запросов. Для удобства определим двунаправленный слой, состоящий из N ячеек, следующим образом:

$$[a_{\text{bi-lstm}}]^{N} = \bigcup_t^N \mathbf{z}_{\text{bi-lstm}}^{(t)}. \quad (5)$$

Выражение (5) описывает композицию двунаправленных LSTM-ячеек, предназначенных для представления доменного имени. Таким образом, архитектура комбинированной сверточно-рекуррентной нейронной сети со 128 двунаправленными LSTM-ячейками будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{h}^{(1)} &= D_{0,5}\left(\bigcup_{k=2}^6 \text{conv1d}(\text{cemb}(\mathbf{X}); k)\right), \\ \mathbf{h}^{(1*)} &= D_{0,5}([a_{\text{bi-lstm}}]^{128}(\text{cemb}(\mathbf{X}))), \\ y(\mathbf{X}) &= a_{\text{softmax}}([\Delta]^3(\mathbf{h}^{(1)} \cup \mathbf{h}^{(1*)})), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\text{conv1d}(\mathbf{H}; k)$ – одномерная свертка с ядром размера k .

ПОМДР-модель для блокировки зараженных узлов

Сформулируем математическую модель POMDP относительно узла компьютерной сети, для которого принимается решение о блокировке. Условимся, что данное решение принимается на основании присутствия DGA-имен в запросах, отправляемых с узла. Для этого на пограничном DNS-сервере производится накопление информации о вредоносной активности. Для обеспечения оптимальной доступности системы DNS проверяются не все проходящие DNS-запросы, а только некоторая их часть. Таким образом, стоит оптимизационная задача обеспечить наиболее эффективное использование ресурсов DNS-сервера для определения узлов, требующих блокировки. Здесь и далее под блокировкой узла будем понимать отключение узла от внешней сети.

Определим POMDP-модель как кортеж $(\mathbf{S}, \mathbf{A}, T, \Omega, O, R)$, где \mathbf{S} – конечное множество состояний системы; \mathbf{A} – конечное множество действий, доступных из состояния $s \in \mathbf{S}$; $T(s' | s, a)$ – функция условных вероятностей перехода из одного состояния в другое; Ω – конечное множество наблюдений; $O(o | s', a)$ – функция условных вероятностей наблюдений; R – функция вознаграждения.

Введем понятие степени внимания детектора к узлу ρ , и определим его как отношение запросов, анализируемых детектором, к общему числу запросов от узла.

В контексте данной модели для каждого DNS-запроса может быть произведено одно из действий: получение состояния детектора a_{acc} ; увеличение степени внимания к детектору a_{inc} ; понижение степени внимания к детектору a_{dec} ; изоляция узла для предотвращения организации botnet a_{blk} ; продолжение функционирования системы без изменений a_{ulk} . Таким образом, конечное множество действий можно задать множеством $\mathbf{A} = \{a_{acc}, a_{inc}, a_{dec}, a_{blk}, a_{ulk}\}$.

Блокировка и разблокировка являются конечными действиями, при которых система завершает работу. Каждый узел сети находится либо в состоянии «заражен» – s_{inf} , либо в состоянии «здоров» – s_{hlt} , множество состояний $\mathbf{S} = \{s_{inf}, s_{hlt}\}$.

Так как состояние POMDP-модели для агента неизвестно, анализировать систему возможно только благодаря наблюдениям, образованным непрерывным векторным пространством: $\Omega = \mathbf{P} \times \mathbf{M}$, где $\mathbf{P} = [0, 1]$ – вектор, определяющий диапазон допустимых значений для степени внимания детектора к узлу ρ , а $\mathbf{M} = [0, 1]$ – вектор, определяющий диапазон допустимых значений оценки вредоносной активности μ . Оценка μ формируется DGA-детектором. То есть наблюдение системы представлено парой значений: $o = \{\rho, \mu\}$.

Функцию условных вероятностей переходов из одного состояния в другое определим так, что при доступе к детектору туннелирования, увеличении или уменьшении степени внимания к детектору система не меняет свое состояние. Изменение состояния происходит только при применении действия по блокировке или разблокировке узла:

$$T(s' | s, a) = \begin{cases} 1, & a \in \{a_{blk}, a_{ulk}\}, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (7)$$

то есть система детерминирована относительно переходов из состояния в состояние.

Функция условных вероятностей наблюдений определяется исходя из степени точности детектора q . Тогда вероятность наблюдения вредоносной активности в состоянии s_{inf} будет составлять q , а в состоянии s_{hlt} : $1 - q$:

$$O(o | s', a) = \begin{cases} q, & s' = s_{inf}; a = a_{acc} \\ 1 - q, & s' = s_{hlt}; a = a_{acc} \\ 1, & a \in \{a_{inc}, a_{dec}\} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (8)$$

В случае увеличения или уменьшения степени внимания детектора к узлу, наблюдение всегда детерминировано. При выполнении одного из конечных действий окружение не наблюдается.

Функцию вознаграждения определим таким образом, что агент получает негативное вознаграждение за доступ к детектору и изменение степени внимания, т. е. чем больше агент проводит времени за попытками получить дополнительную информацию об узле, тем меньше будет финальное вознаграждение. Также при ошибке системы введем дополнительный штраф. Функцию вознаграждения представим матрицей $\mathbf{R} = \mathbf{S}^T \times \mathbf{A}$, где $\mathbf{R}_{i,j}$ определяет вознаграждение за a_i действие в состоянии s_j . Функция вознаграждения R , таким образом, задается следующим выражением:

$$R(s, a) = \begin{cases} \mathbf{R}_{s,a}, & s \in \mathbf{S}, a \in \mathbf{A} \\ 0 & \text{иначе} \end{cases}. \quad (9)$$

Для эксперимента будем рассматривать следующие вознаграждения за действия агента:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -0,2 & -0,8 & -1,0 & 1,0 & -1,0 \\ -0,2 & -0,8 & -1,0 & -1,0 & 1,0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Агент для поиска оптимальной политики POMDP-модели

Проведем сравнительный анализ моделей поиска оптимальной политики для описанной POMDP-проблемы $(\mathbf{S}, \mathbf{A}, T, \mathbf{\Omega}, O, R)$.

Первая рассматриваемая модель – DQN (англ. Deep Q-Network) – впервые предложена в работе [5] для марковского процесса принятия решения (MDP). Сформулируем данную модель для решения POMDP-проблемы. Исходя из того, что агент взаимодействует с окружением $\xi = (\mathbf{S}, \mathbf{A}, T, \mathbf{\Omega}, O, R)$ путем выполнения действий $a \in \mathbf{A}$, ставится задача нахождения оптимальной политики для максимизации вознаграждения с учетом того, что вознаграждение на каждом шаге дисконтируется величиной $\gamma < 1$:

$$Q^*(s, a) = E_{s' \sim \xi} \left[r + \gamma \max_{a'} Q^*(s', a') \mid s, a \right]. \quad (11)$$

Для решения уравнения (11) предлагается использовать глубокую нейронную сеть, обученную для максимизации вознаграждения $Q^*(s, a)$.

Воспользуемся данным подходом для нахождения оптимальной политики действий для выявления зараженных узлов в компьютерной сети. Для этого определим нейронную сеть, которую обучим по методике, предложенной в [5]. На входы \mathbf{X} такой нейронной сети подается множество наблюдений системы $\mathbf{\Omega}$, а на выходе $\mathbf{Y} = \mathcal{Y}(\mathbf{X})$ формируется действие \mathbf{A} , которое должен выполнить агент системы для максимизации вознаграждения. Тогда нейронная сеть описывается следующим образом:

$$\mathcal{Y}_{dqn}(\mathbf{X}) = [\Delta]^4(\mathbf{X}), \quad (12)$$

где для каждого скрытого полносвязного слоя используется оператор прореживания $D_{0,5}$ для регуляризации нейронной сети.

Вторая рассматриваемая модель – DDQN (англ. Dueling Deep Q-Network) – описана в работе [6], где предлагается подход, позволяющий бороться с чрезмерной оптимистичностью модели DQN-агента. Авторы предлагают использовать две модели: первая обучается функции $V(s; \theta)$, оценивающей текущее состояние агента; вторая обучается функции $A(s, a; \theta)$, оценивающей преимущество принимаемого действия в текущем состоянии.

Опишем нейронную сеть для оценки преимущества действий агента, в которую на вход подается вектор наблюдений $\mathbf{\Omega}$ окружения ξ таким образом, что на последнем слое производится усреднение по количеству выходов:

$$\text{Avg}(\mathbf{z}) = \mathbf{z}_{:,0} + \mathbf{z}_{:,1} - \text{avg}(\mathbf{z}_{:,1:}); \mathcal{Y}_{ddqn}(\mathbf{X}) = \text{Avg}([\Delta]^4(\mathbf{X})). \quad (13)$$

Для обучения функции $y_{ddqn}(\mathbf{X})$, оценивающей состояние агента, используется ранее сформулированная нейронная сеть (12).

Третья рассматриваемая модель – DDPG (англ. Deep Deterministic Policy Gradient) – предложена в работе [7]. Суть модели заключается в использовании двух нейронных сетей для обучения оптимальной политике: актора и критика. Причем акторная нейронная сеть обучается параметризованной функции $\mu(s, \theta)$, определяющей текущую политику взаимодействия с окружением, путем отображения состояний к конкретным действиям. Результат данной функции используется при обновлении весов акторной нейронной сети в рамках алгоритма градиентного спуска.

В качестве архитектуры нейронной сети для критика используется модель (12), а для актора используется модель, на вход которой подается объединенный вектор действий и наблюдений. Поскольку модель формулируется относительно непрерывного пространства действий, применим функцию argmax к выходам сети:

$$y^*(\mathbf{X}_A \cup \mathbf{X}_\Omega) = \arg \max([\Delta]^4(\mathbf{X}_A \cup \mathbf{X}_\Omega)). \quad (14)$$

Результаты и обсуждение

Все описываемые далее результаты получены в среде Google Colab, где PODMP-модель описана с помощью библиотеки OpenAI Gym, а нейросетевые модели определены средствами библиотеки TensorFlow и Keras-RL.

Обучение предложенной нейросети (6) для обнаружения DGA-имен производится на обучающем наборе данных UMUDGA [8], содержащем сгенерированные доменные, доменные имена популярных сервисов сети Интернет, а также доменные имена, используемые в сети распространения контента. Оценка качества обученной модели осуществляется на тестовом наборе данных UMUDGA, после чего строятся ROC-кривые для класса безопасных и DGA доменных имен. Результаты оценки качества классификации представлены на рис. 1, где диагональной штриховой линией изображен график эфемерной модели, для которой классификация представляет собой процесс угадывания.

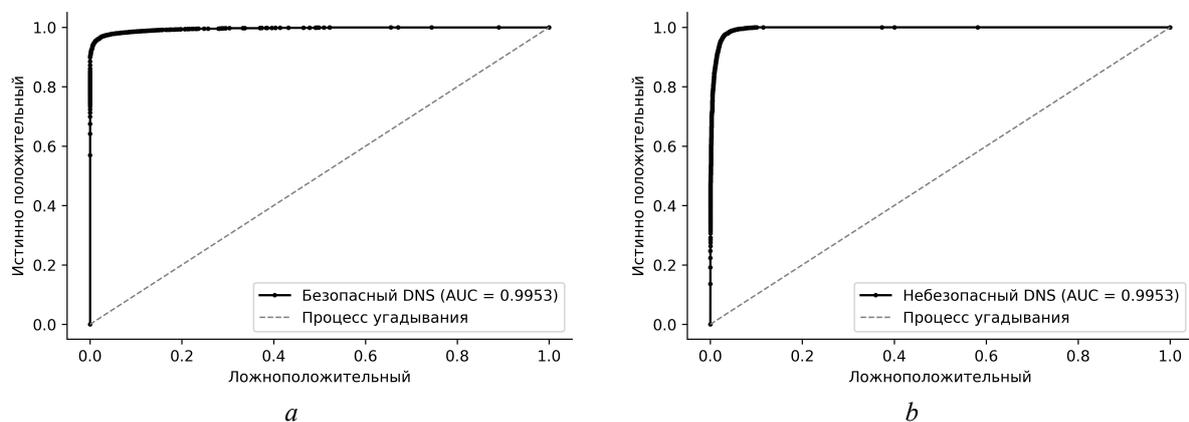


Рис. 1. ROC-кривые обученной нейронной сети для DNS-запросов: a – безопасных; b – DGA
Fig. 1. ROC curves of trained neural network for DNS queries: a – safe; b – DGA

Для оценки качества классификации DGA-имен используется точность, чувствительность, специфичность, а также F_1 -метрика. Помимо предложенной модели (6), включим в сравнение существующие модели: рекуррентную нейронной сеть [9]; сверточно-рекуррентную сеть с последовательным размещением слоев [10]; сверточно-рекуррентную сеть с параллельным размещением слоев [11].

Результаты оценки моделей на тестовом наборе UMUDGA приведены в табл. 1. Из результатов видно, что предложенная модель превосходит сразу по нескольким параметрам модель, предложенную в [11], считавшуюся лучшим на данный момент способом определения DGA-имен.

Таблица 1. Метрики бинарной классификации определения DGA-имен для набора UMUDGA
Table 1. Binary classification metrics of DGA-name detection for UMUDGA dataset

Модель (model)	Точность (accuracy)	Чувствительность (precision)	Специфичность (recall)	F ₁
Woodbridge et al. [9]	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000
Vosoughi et al. [10]	0,9599	0,9441	0,9777	0,9606
Highnam et al. [11]	0,9643	0,9486	0,9818	0,9645
Предложенная модель (6)	0,9654	0,9581	0,9734	0,9657

Обучение Q-нейросетей агентов: для оптимизации используется алгоритм Adam. Для предотвращения влияния начальных наблюдений окружения на результаты обучения нейронной сети вводится 1000 шагов разогрева, в рамках которых происходит лишь накопление исторических результатов для последующего использования при обучении. Результаты обучения Q-нейросетей представлены на рис. 2. Серым цветом на рисунках обозначен график средней ценности действий $Q(s,a)$, а черным – значение скользящего среднего ошибки обучения с окном в 50 значений.

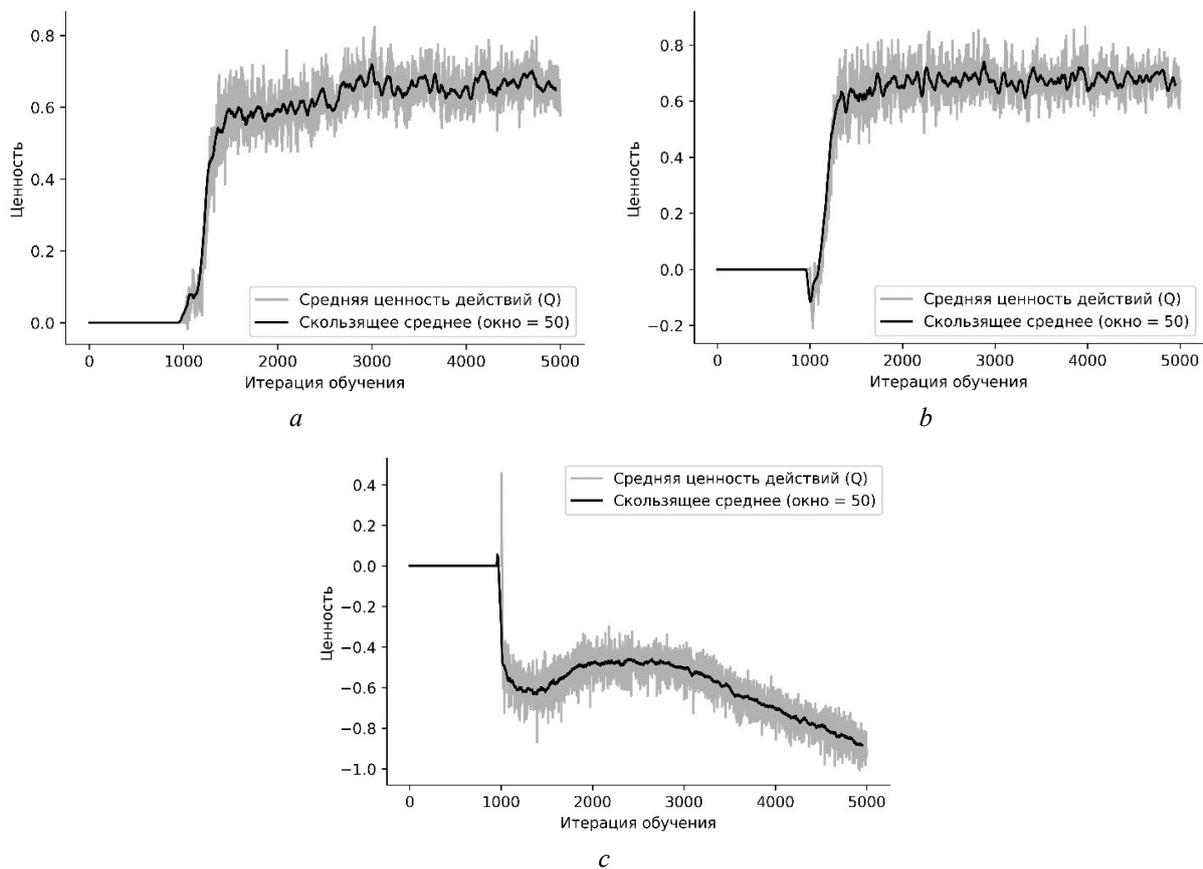


Рис. 2. Ценность действий агентов в процессе обучения: *a* – DQN; *b* – DDQN; *c* – DDPG
Fig. 2. Mean value of actions of agents during training: *a* – DQN; *b* – DDQN; *c* – DDPG

Из рис. 2, *a, b* видно, что для DQN- и DDQN-агента рост средней ценности принимаемых действий $Q(s,a)$ происходит практически сразу после итераций разогрева. Для DDPG-агента (см. рис. 2, *c*) наблюдается снижение средней ценности действий по мере обучения нейронной сети.

Для определения оптимальной политики определения зараженных узлов в компьютерной сети сравнивается среднее, минимальное и максимальные вознаграждение. Вознаграждение рассчитывается для 1000 эпизодов взаимодействия с окружением. Результаты сравнения рассмотренных агентов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты взаимодействия агентов с окружением
Table 2. Results of interaction of agents with environment

Агент (agent)	Среднее вознаграждение (mean reward)	Минимальное вознаграждение (minimum reward)	Максимальное вознаграждение (maximum reward)
DQN	0,6140	-1,0000	1,0000
DDQN	0,6160	-1,0000	1,0000
DDPG	-19,9999	-19,9999	-19,9999

Как видно из табл. 2, лучшие результаты демонстрируют агенты DQN и DDQN, тогда как агент DDPG не научился взаимодействовать с окружением, в результате среднее, минимальное и максимальное вознаграждение мало. Исходя из метрик оценки эффективности политик агентов, наиболее эффективным агентом является DDQN, использующий дуэльную архитектуру нейронной сети для выбора последующего действия.

Выводы

В работе представлен метод обнаружения сгенерированных доменных имен с помощью нейронной сети с параллельной организацией слоев свертки и рекуррентных слоев с двунаправленными LSTM-ячейками. Данная архитектура превосходит существующие аналоги по точности детектирования DGA-имени на наборе данных UMUDGA. Также сформулирована POMDP-модель окружения компьютерной сети с детекторами DGA-имен для блокирования зараженных узлов. Для POMDP-модели предложен метод поиска оптимальной политики взаимодействия с окружением агентным подходом. Показано, что DDQN-агент позволяет добиться максимизации ценности принимаемых действий при управлении детекторами.

Список литературы / References

1. Koliass C., Kambourakis G., Stavrou A., Voas J. DDoS in the IoT: Mirai and Other Botnets. *Computer*. 2017;50:80-84.
2. Patsakis C., Casino F., Katos V. Encrypted and covert DNS queries for botnets: Challenges and countermeasures. *Computers & Security*. 2020;88:101614.
3. Watson D., Zalmout N., Habash N. Utilizing Character and Word Embeddings for Text Normalization with Sequence-to-Sequence Models. *Proceedings of the 2018 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*. Brussels, Belgium: Association for Computational Linguistics; 2018: 837-843 DOI:10.18653/v1/D18-1097.
4. Basaldella M., Antolli E., Serra G., Tasso C. Bidirectional LSTM Recurrent Neural Network for Keyphrase Extraction. *Digital Libraries and Multimedia Archives* (eds. Serra, G. & Tasso, C.) Cham: Springer International Publishing; 2018: 180-187. DOI:10.1007/978-3-319-73165-0_18.
5. Mnih V., Kavukcuoglu K., Silver D., Rusu A.A., Veness J., Bellemare M.G., Graves A., Riedmiller M., Fidjeland A.K., Ostrovski G., Petersen S., Beattie C., Sadik A., Antonoglou I., King H., Kumaran D., Wierstra D., Legg S., Hassabis D. Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*. 2015;518:529-533.
6. Wang Z., Schaul T., Hessel M., Van Hasselt H., Lanctot M., De Freitas N. Dueling network architectures for deep reinforcement learning. *Proceedings of the 33rd International Conference on International Conference on Machine Learning*. Vol. 48. New York, NY, USA: JMLR.org; 2016: 1995-2003.
7. Lillicrap T.P., Hunt J.J., Pritzel A., Heess N., Erez T., Tassa Y., Silver D., Wierstra D. Continuous control with deep reinforcement learning. *Proceedings of the 4th International Conference on Learning Representations*. San Juan, Puerto Rico; 2016.
8. Zago M., Gil Pérez M., Martínez Pérez G. UMUDGA: A dataset for profiling DGA-based botnet. *Computers & Security*. 2020;92:101719.
9. Woodbridge J., Anderson H.S., Ahuja A., Grant D. Predicting Domain Generation Algorithms with Long Short-Term Memory Networks. *Computing Research Repository*. 2016; 1-13 arXiv:1611.00791.
10. Vosoughi S., Vijayaraghavan P., Roy D. Tweet2Vec: Learning Tweet Embeddings Using Character-level CNN-LSTM Encoder-Decoder. *Proceedings of the 39th International ACM SIGIR conference on Research and Development in Information Retrieval*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery; 2016: 1041-1044. DOI:10.1145/2911451.2914762.
11. Highnam K., Puzio D., Luo S., Jennings N.R. Real-Time Detection of Dictionary DGA Network Traffic using Deep Learning. *Computing Research Repository*. 2020; 1-12 arXiv:2003.12805.

Вклад авторов

Бубнов Я.В. сформулировал нейросетевую модель детектора, модель частично наблюдаемого марковского процесса принятия решений.

Иванов Н.Н. выполнил постановку научной проблематики и обобщение результатов исследования.

Authors' contribution

Bubnov Y.V. formulated neural network model of the detector, the model of partially observable Markov decision process.

Ivanov N.N. completed the formulation of scientific problems and generalization of the research results.

Сведения об авторах

Бубнов Я.В., магистр технических наук, аспирант кафедры электронных вычислительных машин Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Иванов Н.Н., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры электронных вычислительных машин Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Bubnov Y.V., M.Sc., Postgraduate student at the Electronic Computing Machines Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Ivanov N.N., PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Electronic Computing Machines Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-29-757-28-23;
e-mail: girokompass@gmail.com
Бубнов Яков Васильевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-29-757-28-23;
e-mail: girokompass@gmail
Bubnov Yakov Vasil'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-2-100-106>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.385.6

КЛИНОТРОН НА ОТКРЫТОМ РЕЗОНАТОРЕ С СИММЕТРИЧНЫМИ КОНИЧЕСКИМИ ГОФРИРОВАННЫМИ ЗЕРКАЛАМИ – ГОРАТРОН

А.А. КУРАЕВ, В.В. МАТВЕЕНКО

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

Поступила в редакцию 3 февраля 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. В настоящей статье представлено дальнейшее развитие идеи радиального клиноорotronа – клинотрон с симметричными коническими радиально гофрированными зеркалами резонатора – горатрон (ГОфрированные РАдиально зеркала, ТРОН – прибор). В таком приборе образуется сильная связь объемного поля и поверхностных резонансных полей сдвоенных конических зеркал, благодаря чему поле синхронной гармонике присутствует во всем межзеркальном пространстве. Это делает возможным использование широкого электронного потока (ЭП). Коническая же геометрия зеркал обеспечивает клинотронный эффект. В результате повышается не только допустимая мощность прибора, но его КПД по сравнению с обычным радиальным клиноорotronом. В статье приведены результаты расчета варианта горатрона при $\beta_0 = 0,51$. Решение двумерной краевой задачи для потенциала $V(r, z) = rB_\varphi(r, z)$, определяющего осесимметричное колебание резонатора горатрона E_{m01} , проводилось с использованием стандартных пакетов для решения общих дифференциальных уравнений в частных производных с использованием конечных элементов. Анализ распределений $E_r(r, z)$, $E_z(r, z)$, $B_\varphi(r, z)$ показывает, что периодическая компонента поля существует во всем пространстве между гребенчатыми зеркалами. Такая особенность позволяет использовать широкий (до $\lambda/4$) ЭП. Модель ЭП горатрона содержала 16 слоев по z , уравнения движения – релятивистские. Средний по всем слоям электронный КПД составил более 30 %, что в 1,5 раза выше, чем получено в расчетах КПД радиального клинотрона.

Ключевые слова: клиноорotron, открытый резонатор, гофрированные конические зеркала, радиальный электронный поток, терагерцы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Кураев А.А., Матвеев В.В. Клинотрон на открытом резонаторе с симметричными коническими гофрированными зеркалами – горатрон. Доклады БГУИР. 2021; 19(2): 100-106.

KLYNOTRON WITH USING THE OPEN RESONATOR AND SYMMETRIC CONICAL CORRUGATED MIRRORS – GORATRON

ALEXANDER A. KURAYEV, VLADIMIR V. MATVEYENKA

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

Submitted 3 February 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. A further development of the radial klynoorotron idea – klynotron with symmetric conical radial corrugated resonator mirrors, is presented in the article. Strong coupling volume and surface resonance fields in the double conical mirrors in such a device is formed due to which the synchronous harmonic field is in the entire intermirror space. All saying above makes it possible to use a wide electronic flow. The conical mirror geometry provides a klynotron effect. As a result, not only the permissible device power is increased, but also its efficiency in comparison with a conventional radial klynoorotron. The article presents the calculating results of the Goratron at $\beta_0 = 0.51$. The solution of the two-dimensional boundary value problem for the potential $V(r, z) = rB_\phi(r, z)$, which determines Goratron resonator axisymmetric oscillation E_{m01} , was carried out by standard packages for solving general partial differential equations using finite elements. The distribution analysis $E_r(r, z)$, $E_z(r, z)$, $B_\phi(r, z)$ shows that the field periodic component exists in the entire space between the comb mirrors. Given feature allows to use a wide (up to $\lambda/4$) electron flow. Goratron electron flow model contains 16 layers along z , the equations of motion were relativistic. The electronic efficiency averaged over all layers is more than 30 %, which is 1.5 times higher than that obtained in the radial klynotron efficiency calculations.

Keywords: klynoorotron, open resonator, corrugated conical mirrors, radial electron flow, terahertz.

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

For citation. Kurayev A.A., Matveyenka V.V. Klynotron with using the open resonator and symmetric conical corrugated mirrors – goratron. Доклады БГУИР. 2021; 19(2): 100-106.

Введение

Оротроны – генераторы на открытом резонаторе с дифракционной решеткой на одном из зеркал – сыграли определенную роль на первоначальном освоении миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн благодаря их разработке в ИРЭ АН СССР (Москва) и ИРЭ АН УССР (Харьков) [1]. Однако оротроны имели невысокую эффективность (КПД), и поэтому к 1980 году появились их улучшенные модификации: с двойной решеткой (ИРЭ АН СССР) и двойной гребенкой, нормальной к плоскости нижнего зеркала (орботрон – ИРЭ АН УССР). Введение дополнительного ступенчатого трансформатора на нижнем зеркале перед сдвоенной гребенкой значительно улучшило КПД орботрона [2]. Оставалась, однако, еще одна проблема – жесткое ограничение на толщину электронного потока: она должна быть значительно меньше четверти длины волны. Для преодоления этого ограничения были предложены и рассчитаны оротроны с использованием клинотронного эффекта: коаксиальный клинотрон [3] и радиальный клиноорotron [4].

Клинотронный эффект был обнаружен в ИРЭ АН УССР Г. Я. Левиным в 1956 году. Этот эффект состоит в том, что при наклонном падении под малым углом на периодическую замедляющую систему (ПЗС) все слои электронного потока (ЭП) конечной толщины последовательно вступают во взаимодействие с интенсивным полем на поверхности ПЗС. Благодаря этому повышается как мощность генератора (относительно широкий ЭП), так и его эффективность (интенсивное взаимодействие всех слоев ЭП). Клинотронный эффект нашел широкое применение в клинотронах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Обзор работ (экспериментальных и теоретических), содержащий ссылки на 101 публикацию, приведен в [5].

В настоящей статье представлено дальнейшее развитие идеи радиального клиноорotronа – клинотрон с симметричными коническими радиально гофрированными зеркалами резонатора – горатрон (ГОфрированные РАдиально зеркала, ТРОН – прибор). В таком приборе образуется сильная связь объемного поля и поверхностных резонансных полей сдвоенных конических зеркал, благодаря чему поле синхронной гармоникой присутствует во всем межзеркальном пространстве. Это делает возможным использование широкого ЭП. Коническая же геометрия зеркал обеспечивает клинотронный эффект. В результате повышается не только допустимая мощность прибора, но его КПД по сравнению с обычным радиальным клиноорotronом.

Принципиальная схема горатрона

Схема поперечного сечения горатрона в плоскости r, z приведена на рис. 1. Здесь: 1 – кольцевая электронная пушка, формирующая радиально сходящийся плоский электронный поток 2; 3 – конические гребенки открытого резонатора (ОР) горатрона (h – глубина азимутальных канавок, a – ширина канавок, b – ширина зуба гребенок. $a+b$ – радиальный период гребенок); 4 – магнитопровод фокусирующего ЭП электромагнита; 5 – катушка питания электромагнита; r_0 – начальный радиус гребенчатых зеркал, r_1 – конечный радиус, z_0 – начальное расстояние зеркал от плоскости симметрии ($r=0$) ОР при r_0 , z_1 – конечное расстояние при $r=r_1$. Таким образом, длина области взаимодействия по r равна $L=r_1-r_0$. Все приведенные величины представлены в безразмерной форме: $r=r'k$, $z=z'k$. Здесь $k=2\pi/\lambda$, λ – длина волны генератора, величины со штрихом – размерные. На схеме для упрощения рисунка изображено только 4 периода гребенок. На самом деле их должно быть 20–80. Выводы энергии и каналы водяного охлаждения на схеме не указаны.

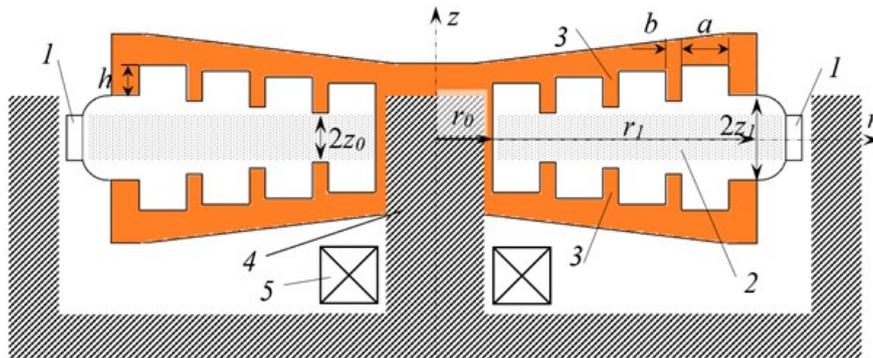


Рис. 1. Поперечное сечение горатрона в плоскости r, z
Fig. 1. Cross section for plane r, z of goratron

Электродинамическая задача

Электромагнитное поле электродинамической системы радиального клиноорotronа-горатрона представляет собой связанное колебание азимутально-симметричного типа колебаний открытого резонатора E_{m01} и синфазного колебания T_{01} мод коаксиальных ячеек двух решеток.

Ввиду азимутальной симметрии искомого E -поля краевая задача для него оказывается скалярной. В качестве скалярной переменной можно выбрать z – составляющую электрического вектора Герца $\vec{\Pi}_z^e$ или B_ϕ (единственная составляющая магнитного поля колебания). Последнее предпочтительнее, поскольку составляющие электрического поля (по второму уравнению Максвелла) находятся через однократное дифференцирование B_ϕ – $rot(\vec{\phi}_0 B_\phi)$, а через $\vec{\Pi}_z^e$ необходимо двукратное дифференцирование $\vec{\Pi}_z^e$ [6].

Однако и выбор B_ϕ в качестве потенциала краевой задачи неоптимален: дифференцирование в $rot(\vec{\phi}_0 B_\phi)$ производится не от B_ϕ , а от rB_ϕ . Таким образом, за потенциал краевой задачи следует принять $V(r, z) = rB_\phi(r, z)$.

Уравнение Гельмгольца для B_φ имеет вид $\nabla^2 B_\varphi + k^2 B_\varphi - B_\varphi/r'^2 = 0$, $k = \omega/c$.

В соответствии с ним уравнение для V в безразмерных переменных записывается как

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial z} \right) + W^2 V = 0. \quad (1)$$

Здесь $r = k_0 r'$, $z = k_0 z'$, $k_0 = \omega_0/c$, $W = \omega/\omega_0$, ω_0 – резонансная частота, c – скорость света в пустоте, штрихованные координаты – размерные.

Компоненты электромагнитного поля выражаются через $V(r, z)$ следующим образом:

$$\dot{E}_r = \frac{j}{W} \frac{\partial V}{r \partial z}, \quad \dot{E}_z = -\frac{j}{W} \frac{\partial V}{r \partial r}, \quad \dot{B}_\varphi = \frac{V}{r}. \quad (2)$$

Граничные условия к (1) в соответствии с (2) задаются следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} \text{на металлических поверхностях } \frac{\partial V}{\partial n} = 0, \quad (\vec{E}_r = 0); \\ \text{на открытой границе резонатора } V = 0, \quad (\vec{B}_\varphi = 0); \\ \text{на оси симметрии } z (r = 0) \frac{V}{r} = 0, \quad (\vec{B}_\varphi = 0). \end{array} \right\} \quad (3)$$

Выражения (2) относятся к безразмерным компонентам поля: $\dot{E} = \frac{\dot{E}'}{E_m}$, $\dot{B} = \frac{\dot{B}'c}{E_m}$, $E_m = m_0 \omega_0 c/e$; e , m_0 – заряд и масса покоя электрона. Штрихованные компоненты размерные.

Уравнения движения электронов

Безразмерные релятивистские уравнения движения крупных частиц-электронов, моделирующих ЭП, имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{rli}}{d\theta} &= - \left(\frac{\gamma_{li} \beta_{\varphi li}^2}{r} - E_r + \beta_{zli} B_\varphi \right), \\ \frac{dP_{\varphi li}}{d\theta} &= - \left(\frac{\gamma_{li} \beta_{rli} \beta_{\varphi li}}{r} - \beta_{zli} F_r \right), \\ \frac{dP_{zli}}{d\theta} &= - \left(-E_z - \beta_{rli} B_\varphi + \beta_{\varphi li} F_z \right), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{dz_{li}}{d\theta} &= -\beta_{zli}, \quad \frac{dr_{li}}{d\theta} = -\beta_{rli}, \quad \vec{P}_{li} = \gamma_{li} \vec{\beta}_{li}, \quad \vec{\beta}_{li} = \frac{\vec{v}_{li}}{c}, \\ \gamma_{li} &= \sqrt{1 + P_{rli}^2 + P_{\varphi li}^2 + P_{zli}^2}, \quad \theta = \omega t. \end{aligned}$$

Начальные условия для слоя ЭП с индексом l и электронов этого слоя с фазовым номером i имеют вид:

$$r_{li}(0) = r_1, \quad z_{li}(0) = l \Delta z, \quad l = \overline{1, N_s}, \quad \theta_i(0) = \frac{2\pi i}{N}, \quad i = \overline{1, N} \quad (5)$$

Безразмерные компоненты полей в (4) записываются как $F_r = \frac{F_0}{r}$, $F_0 = r_1 \frac{B_0(r_1)e}{m_0 \omega}$, $\dot{E} = \frac{e \dot{E}'}{m_0 \omega_0 c} = A \cdot \vec{E}^0 e^{j\theta}$, $A = \frac{e E'_{\max}}{m_0 \omega_0 c}$, $\vec{E}^0 = \frac{\vec{E}'}{E_{\max}}$, $\vec{E} = \text{Re } \dot{E} = A \vec{E}^0(r, z) \cos \theta$, $\dot{B} = -jA \cdot \vec{B}^0 e^{j\theta}$, $\vec{B}^0 = \frac{\vec{B}'}{B_{\max}}$, $\vec{B} = \text{Re } \dot{B} = A \vec{B}^0(r, z) \sin \theta$, $\theta = \omega t$.

Конец интегрирования траектории электрона с индексами (li) определяется условиями: z_{li} и r_{li} попадают на границу гребенки (Q_{\perp} или Q_{\parallel}), т. е. на торец или боковую поверхность зуба гребенки, или достигают $r = r_0$.

Как показано в [5], поле пространственного заряда ЭП несущественно в клинотронах из-за большого сечения ЭП и, соответственно, малой плотности заряда. В рассматриваемом случае горатрона – тем более, поскольку поле резонатора значительно интенсивнее, чем поле бегущей волны в клинотроне. По этим причинам поле пространственного заряда в модели горатрона не учитывается.

Электронный КПД слоя l определяется как $\eta_l^e = \frac{1}{N_{es}} \sum_{k=1}^{N_{es}} \frac{\gamma_0 - \gamma_{li}(k)}{\gamma_0 - 1}$, $\gamma_{li}(k)$ – значение γ_{li} в конечной точке, т. е. в точке оседания на поверхность зуба гребенки. Суммарный по слоям КПД равен:

$$\eta^e = \frac{1}{N_s} \sum_{l=1}^{N_s} \eta_l^e. \quad (6)$$

Нагруженная добротность резонатора, при которой достигается полученное в расчете и оптимизации значение A , определяется как

$$Q_H = \frac{\omega_0 W_v}{\eta^e I_0 V_0} \approx \frac{2 \cdot 10^8 A^2}{\eta^e I_0 V_0} \int_D B_{\phi}^0 r dr dz, \quad (7)$$

где D – область вертикального сечения (r, z) резонатора, W – запасаемая энергия в резонаторе, I_0 – ток ЭП в амперах, V_0 – напряжение пучка в вольтах.

Результаты расчета горатрона

Рассчитаем вариант горатрона при $\beta_0 = 0,51$ (ускоряющее напряжение ЭП $V_0 = 83$ кВ) со следующими параметрами резонатора: $r_0 = 20$, $r_1 = 225$, $z_0 = 0,85$, $z_1 = 0,95$, $h = \pi/4$, $a = 1,875$, $b = 0,625$. Число ячеек гребенок зеркал $n = 80$. Тип объемного поля открытого резонатора E_{m01} , $m = 25$. Относительная фазовая скорость обратной волны гребенки при указанных параметрах составляет $\beta_{\phi} = v_{\phi}/c = 0,47$. Таким образом, режим работы соответствует отстройке от синхронизма: $\beta_0 > \beta_{\phi}$.

Функция $V(r, z)$, как результат решения краевой задачи (1), (3), получена на основе стандартных пакетов для решения общих дифференциальных уравнений в частных производных с использованием конечных элементов. Поля E_r , E_z , B_{ϕ} вычислялись по формулам (2). Распределения нормированной E_z на двух уровнях z : а) $z = \pm 0,2$ и б) $z = \pm 0,8$ приведены на рис. 2.

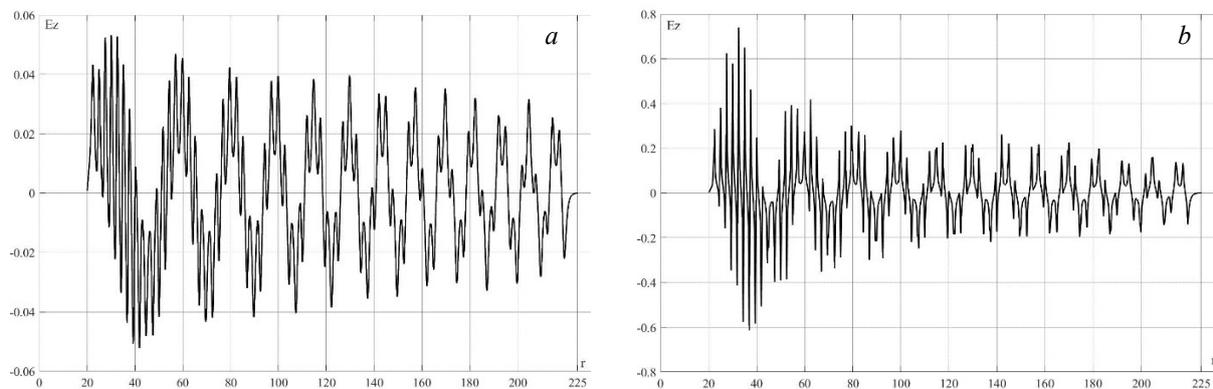


Рис. 2. Распределение $E_z^{\circ}(r, z)$: а – $z = \pm 0,2$, б – $z = \pm 0,8$
Fig. 2. Distribution $E_z^{\circ}(r, z)$: а – $z = \pm 0,2$, б – $z = \pm 0,8$

Из рисунка видно, что на обоих уровнях объемное поле резонатора промодулировано периодическим полем гребенок, т. е. существует сильная связь этих полей во всем пространстве взаимодействия.

На рис. 3 представлено распределение нормированной компоненты E_r° при $z = \pm 0,8$. Здесь также видна сильная связь полей решеток и объемного поля.

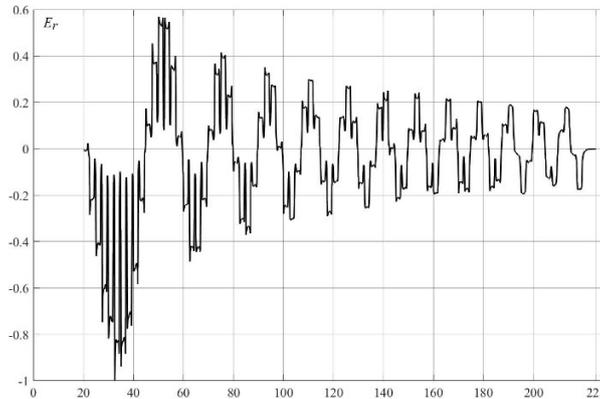


Рис. 3. Распределение $E_r^\circ(r, z): z = \pm 0,8$

Fig. 3. Distribution $E_r^\circ(r, z): z = \pm 0,8$

При решении уравнений движения электронов (4) ЭП разбивался на $l = 16$ слоев при $r = r_1: z = \{0,05 \div 0,8\}$ с шагом 0,05. При $F_0 = 0,178$ и $A = 0,045$ КПД горотрона составил свыше 30 %. График прироста $\eta^e(r)$ при $l = 16$ в пространстве взаимодействия по r представлен на рис. 4. Просматриваются участки медленного и быстрого роста КПД. Такое чередование обусловлено периодичностью группирования электронов в сложном комбинированном поле резонатора горотрона при отстройке от синхронизма ($\beta_0 > \beta_\phi$). Рабочая нагруженная добротность резонатора для этого варианта горотрона $Q = 738/I_0 [A]$ в соответствии с формулой (7).

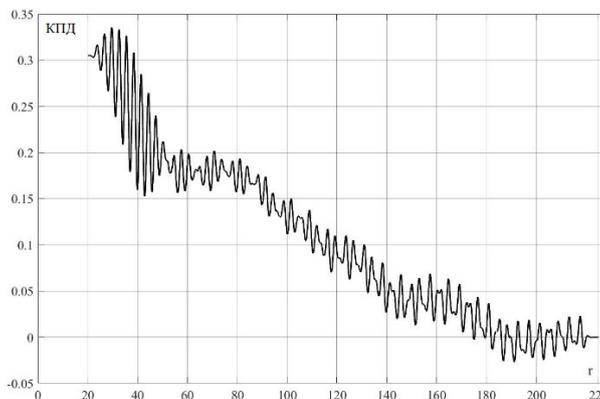


Рис. 4. Распределение $\eta^e(r)$ при $l = 16$

Fig. 4. Distribution $\eta^e(r)$ at $l = 16$

Заключение

Горотрон, как развитие идеи радиального клиноорotronа, представляется перспективной конструкцией, обеспечивающий повышение КПД клиноотронов и их мощности за счет пространственно развитого электронного пучка. Пучок имеет большой начальный радиус ($r_1 \approx 225$) и относительно большую толщину (порядка $\lambda/4$). КПД горотрона превосходит КПД радиального клиноорotronа в 1,5 раза. При этом надо иметь в виду, что полная оптимизация по КПД конструкции горотрона может существенно повысить его величину. Следует также отметить особенность режима работы горотрона при отстройке от синхронизма ($\beta_0 > \beta_\phi$).

Список литературы

1. Мясин Е.А. *Оротрон и его модификации*. В сб. «Генерация и усиление сигналов терагерцового диапазона». Саратов: Издательство СРТУ; 2016:160-194.
2. Кравченко В.Ф., Кураев А.А., Матвеев В.В. Орбитроны-генераторы субмиллиметрового и миллиметрового диапазонов. Ч. I. *Физические основы приборостроения*. 2016;5(2):102-115.
3. Кураев А.А., Синицын А.К. Клинооротрон на коаксиальном резонаторе. *Доклады БГУИР*. 2010;47(7):12-18.
4. Кураев А.А., Синицын А.К. Радиальный клинооротрон. *Доклады БГУИР*. 2012;65(3):98-104.
5. Еремка В.Д., Пишко О.Ф. Применение клинотронного эффекта в вакуумных источниках терагерцовых электромагнитных колебаний. *Радиофизика и электроника*. 2018;23(3):8-39.
6. Кураев А.А., Попкова Т.Л., Синицын А.К. *Электродинамика и распространение радиоволн*. Москва: ИНФРА-М; 2016.

References

1. Myasin E.A. [*Orotron and its modifications. In the collection. "Generation and amplification of terahertz signals"*]. Saratov: Publishing house SRTU; 2016:160-194. (In Russ.)
2. Kravchenko V.F., Kurayev A.A., Matveyenka V.V. [Orbitrons-generators of submillimeter and millimeter ranges. Part I]. *Physical Foundations of Instrumentation*. 2016;5(2):102-115. (In Russ.)
3. Kurayev A.A., Sinitsyn A.K. [Klynoorotron on a coaxial resonator]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2010;47(7):12-18. (In Russ.)
4. Kurayev A.A., Sinitsyn A.K. [Radial klynoorotron]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2012;65(3):98-104. (In Russ.)
5. Eremka V.D., Pishko O.F. [Application of the klynotron effect in vacuum sources of terahertz electromagnetic oscillations]. *Radiophysics and Electronics*. 2018;23(3):8-39. (In Russ.)
6. Kurayev A.A., Popkova T.L., Sinitsyn A.K. [*Electrodynamics and propagation of radio waves*]. Moscow: INFRA-M; 2016. (In Russ.)

Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.
All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Кураев А.А., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Матвеев В.В., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Kurayev A.A., D.Sc., Professor, Professor at the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Matveyenka V.V., PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Computational Methods and Programming Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-17-293-89-56;
e-mail: kurayev@bsuir.by
Кураев Александр Александрович

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: kurayev@bsuir.by
Kurayev Alexander Alexandrovich

