

ВЕСТНИК

НОВГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА



НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ ЖУРНАЛ

ISSN 2076-8052

Серия «ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2(123)/2021

Главный редактор
Ю.С.БОРОВИКОВ, д.т.н., профессор
Зам. гл. редактора
В.И.МАКАРОВ, к. филол. н., доцент

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

М.И.БИЧУРИН, д.ф.-м.н., проф.,
гл. редактор научного направления,
А.Ю.ЗАХАРОВ, д.ф.-м.н., проф.,
(зам. гл. редактора научного направления),
В.М.ПЕТРОВ, д.т.н., проф.,
(ответственный секретарь),
А.С.БУГАЁВ, д.ф.-м.н., проф.,
академик РАН (Москва),
Н.Е.БЫСТРОВ, д.т.н., проф.,
Ю.Б.ВЫСОЦКИЙ д.ф.-м.н., проф.,
(Донецк, Украина),
В.В.ГАВРУШКО, д.т.н., проф.,
Ю.А.ГЕНЕНКО, д.ф.-м.н., проф.,
(Дармштадт, Германия)
Ю.В.ГУЛЯЕВ, д.ф.-м.н., проф.,
академик РАН (Москва),
Б.Ф.КИРЬЯНОВ, д.т.н., проф.,
А.В.КОЛНОГОРОВ, д.ф.-м.н., доцент,
В.В.КРАСИЛЬНИКОВ, д.ф.-м.н., проф.,
(Белгород)
Э.В.ЛИВЕРЦ, к.ф.-м.н., доцент, (Израиль)
В.В.МАЛАШЕНКО, д.ф.-м.н., проф.,
(Донецк, Украина),
Н.Ф.МОРОЗОВ, д.ф.-м.н., проф.,
академик РАН (Санкт-Петербург),
Е.Ф.ПАНАРИН, д.хим.н., член-корр. РАН
(Санкт-Петербург),
Б.И.СЕЛЕЗНЕВ, д.т.н., проф.,
В.О.ЧЕРАНОВСКИЙ, д.ф.-м.н., проф.,
(Харьков, Украина),
В.А.ЧЕРЕПЕНИН, д.ф.-м.н., проф.,
член-корр. РАН (Москва)

Учредитель и издатель —
Федеральное государственное бюджетное образова-
тельное учреждение высшего образования
Новгородский государственный университет
имени Ярослава Мудрого

Адрес редакции и издателя:
173003, Россия, Великий Новгород,
ул. Большая Санкт-Петербургская, 41, ауд. 1216
Факс: +7(8162) 974526
E-mail: vestnik@novsu.ru
<http://www.novsu.ru/vestnik>
E-mail редколлегии научного направления:
Mirza.Bichurin@novsu.ru

**ВЕСТНИК НОВГОРОДСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**
Сер.: Технические науки. 2021. №2(123).

Ведущий редактор О.В.Базаева
Компьютерный набор и верстка О.В.Базаева
Художественное оформление В.В.Попович
Дизайн обложки И.А.Чижикова

Оригинал-макет подготовлен редакцией
журнала «Вестник НовГУ»
Свидетельство ПИ №77-17766 от 10.03.2004 г.
Министерства Российской Федерации
по делам печати, телерадиовещания
и средств массовых коммуникаций

Выходит не менее четырех раз в год

Подписано в печать 31.05.2021 г.
Дата выхода 15.06.2021 г.
Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 11,16. Уч.-изд. л. 10,7. Тираж 500 экз.

Отпечатано в ИП Копыльцов П.И.
394052, Воронежская область, г.Воронеж,
ул.Маршала Неделина, д.27, кв.56
Тел. 89507656959, e-mail: Kopyltsow_Pavel@mail.ru

(16+)

© Вестник НовГУ, 2021



Chief Editor

Yu.S.BOROVIKOV, Dr of Engineering, Prof.

Deputy Chief Editor

V.I.MAKAROV, Candidate of Philological Sciences,
Assistant Prof.

EDITORIAL BOARD:

M.I.BICHURIN, Dr of Physics and Mathematics, Prof.
(Editor-in-Chief of the series),

A.Yu.ZAKHAROV, Dr of Physics and Mathematics, Prof.
(Deputy Chief Editor of the series),

V.M.PETROV, Dr of Engineering, Prof.
(Executive Editor),

A.S.BUGAYOV, Dr of Physics and Mathematics, Prof.,
Member of Russian Academy of Sciences (RAS) (Moscow),

N.E.BYSTROV, Dr of Engineering, Prof.,

Yu.B.VYSOTSKY, Dr of Chemistry, Prof., (Donetsk,
Ukraine),

V.V.GAVRUSHKO, Dr of Engineering, Prof.,

Yu.A.GENENKO, Dr of Physics and Mathematics, Prof.,
(Darmstadt, Germany)

Yu.V.GULYAEV, Dr of Physics and Mathematics, Prof.,
Member of Russian Academy of Sciences (RAS) (Moscow),

B.F.KIR'YANOV, Dr of Engineering, Prof.,

A.V.KOLNOGOROV, Dr of Physics and Mathematics,
Assistant Prof.,

V.V.KRASIL'NIKOV, Dr of Physics and Mathematics,
Prof. (Belgorod);

E.V.LIVERTZ, Candidate of Physics and Mathematics,
(Negev, Israel);

V.V.MALASHENKO, Dr of Physics and Mathematics,
Prof. (Donetsk, Ukraine);

N.F.MOROZOV, Dr of Physics and Mathematics, Prof.,
Member of Russian Academy of Sciences (RAS) (Saint
Petersburg);

E.F.PANARIN, Dr of Chemistry, Corresponding Member
of Russian Academy of Sciences (RAS) (Saint Petersburg);

B.I.SELEZNEV, Dr of Engineering, Prof.;

V.O.CHERANOVSKY, Dr of Physics and Mathematics,
Prof., (Kharkiv, Ukraine);

V.A.CHEREPNIN, Dr of Physics and Mathematics, Prof.,
Corresponding Member of Russian Academy of Sciences
(RAS) (Moscow)

Founder and Publisher — Federal State Budgetary
Educational Institution of Higher Education
"Yaroslav-the-Wise Novgorod State University"

Postal address:

Russia, 173003, Velikiy Novgorod, Yaroslav-the-Wise
Novgorod State University, B.Sankt-Peterburgskaya St.,
41 Bldg., of. 1216

Fax: +7(8162) 974526; Tel.: (8162) 33-88-30

E-mail: vestnik@novsu.ru

<http://www.novsu.ru/vestnik>

E-mail of Editor-in-Chief of the series:

Mirza.Bichurin@novsu.ru

VESTNIK OF NOVGOROD STATE UNIVERSITY

Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123).

Editor O.V.Bazaeva

Layout O.V.Bazaeva

Art work V.V.Popovich

Cover design I.A.Chizhikova

Camera-ready copy is prepared by the journal
Vestnik NovSU editorial staff.

Printed publication license no. 77-17766

of 10 March, 2004, issued by Ministry of the Russian
Federation for Affairs of the Press, Television and
Radio Broadcasting and Mass Communication Media

The journal is published quarterly.

Signed to print on 31.05.2021.

Publication date 15.06.2021.

Sheet size 60×84 1/8. Offset printing.

Number of printed copies: 500.

Conventionally printed sheet 11.16.

Printed by IP Kopyltsov P.I.

27, Marshala Nedelina St., bld. 56, Voronezh Region,
394052

Tel. +79507656959, e-mail: Kopyltsov_Pavel@mail.ru

(16+)

© Vestnik NovSU, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Обращение к читателям	5
-----------------------------	---

Электроника

<i>В.А.Абрамовский, В.С.Сандул, Г.А.Феофилов</i> Взаимодействие кварковых трубок в ядро-ядерном рассеянии при энергиях ускорителя NICA.....	6
<i>Д.Я.Бурцева, М.Ю.Луков, Е.А.Менделеев, Р.В.Петров</i> Нейротехнологии и VR. Принципы совместимости	9
<i>В.В.Гаврушко, А.С.Ионов</i> Двухспектральный восьмиканальный фотоприемник для видимого и ближнего инфракрасного диапазона	14
<i>С.В.Гарбарь</i> Влияние оценки неизвестной дисперсии дохода на потери при использовании стратегии UCB для гауссовского двурукого бандита	17
<i>А.В.Желаннов, Б.И.Селезнев, Д.Г.Федоров</i> Плазменное травление структур GaN/AlGaIn в хлорсодержащей среде Cl ₂ /Ar/O ₂	21
<i>Ю.В.Килиба, В.А.Киселев, Р.В.Петров, А.С.Татаренко</i> Электрический осмос в тепловых трубах.....	27
<i>Е.В.Кузьмин, В.С.Леонтьев, А.Р.Петрова, Л.А.Немцев, Р.В.Петров</i> Исследование магнитоэлектрической структуры Метглас/GaAs/Метглас для применения в источниках энергии.....	31
<i>В.В.Малащенко, А.Д.Гладкая, Т.И.Малащенко</i> Особенности твердорастворного упрочнения металлов и сплавов при высокоскоростной деформации	36
<i>O.V.Sokolov, S.N.Ivanov, D.A.Petrov, M.I.Bichurin</i> Exploratory development of the longitudinal and thickness modes of the magnetoelectric effect in a magnetostrictive-piezoelectric two-layer structure Metglas/silicon carbide.....	39
<i>В.В.Учайкин</i> Автомодельность как характеристическое свойство нелокальной аномальной диффузии	43

Радиотехника и связь

<i>В.А.Едемский, А.В.Иванов</i> Симметричная 2-адическая сложность бинарных последовательностей с периодом $4q$ и оптимальной автокорреляционной магнитудой	47
<i>М.А.Калитов, Н.П.Корнышев</i> Преобразование сигналов в телевизионной спектральной системе, имеющей перекрывающиеся участки зон регистрации лучистых потоков	52
<i>Д.Ю.Коновалов, К.П.Масюков, А.А.Семенов</i> Алгоритм оптимизации системы оценки и прогнозирования функциональной готовности радиоэлектронных средств	60
<i>Н.П.Корнышев, Д.А.Серебряков</i> Адаптация метода селекции изображения малоразмерного объекта на неоднородном фоне к условиям видеонаблюдения	66
<i>М.Ю.Кузнецов, А.А.Шаталов, В.А.Шаталова</i> Адаптивный алгоритм распознавания сигналов на фоне помех в многочастотной РЛС	71
<i>Г.М.Сидельников</i> Помехоустойчивость демодулятора сигнала КАМ-16 при трансформации границ сигнального созвездия в канале с многолучевостью	76
<i>А.А.Шерстнева</i> Прогнозирование надежности инфокоммуникационных систем на основе моделей авторегрессии	82

Краткие сообщения

<i>Я.И.Грановский</i> К расчету движения периастра.....	87
---	----

Педагогика

<i>Г.А.Уланова, О.В.Пополитова, Г.Ю.Панарина</i> Работа с управленческой командой по формированию психолого-педагогического климата в контексте задачи повышения образовательных результатов.....	89
---	----

CONTENTS

Address to readers	5
--------------------------	---

Electronics

<i>V.A.Abramovsky, V.S.Sandul, G.A.Feofilov</i> Interaction of quark tubes in nuclear-nuclear scattering with energies of the NICA accelerator	6
<i>D.Y.Burtseva, M.Yu.Lukov, E.A.Mendelev, R.V.Petrov</i> Neurotechnologies and VR. Principles of compatibility	9
<i>V.V.Gavrushko, A.S.Ionov</i> Two-spectral eight-channel photo receiver for visible and near infrared range	14
<i>S.V.Garbar</i> Relation between reward variance estimation and losses for UCB strategy for Gaussian two-armed bandit	17
<i>A.V.Zhelannov, B.I.Seleznev, D.G.Fedorov</i> Plasma etching of GaN/AlGaIn structures in a chlorine-containing medium $\text{Cl}_2/\text{Ar}/\text{O}_2$	21
<i>Yu.V.Kiliba, V.A.Kiselev, R.V.Petrov, A.S.Tatarenko</i> Electric osmosis in heat pipes	27
<i>E.V.Kuzmin, V.S.Leontiev, A.R.Petrova, L.A.Nemtsev, R.V.Petrov</i> Investigation of the magnetoelectric structure of Metglas/GaAs/Metglas for use in energy sources	31
<i>V.V.Malashenko, A.D.Gladkaya, T.I.Malashenko</i> Specific features of solid solution hardening of metals and alloys under high-strain-rate deformation	36
<i>O.V.Sokolov, S.N.Ivanov, D.A.Petrov, M.I.Bichurin</i> Exploratory development of the longitudinal and thickness modes of the magnetoelectric effect in a magnetostrictive-piezoelectric two-layer structure Metglas/silicon carbide	39
<i>V.V.Uchaikin</i> Automodelity as a characteristic property of nonlocal anomalous diffusion	43

Radiotechnics and telecommunications

<i>V.A.Edemskiy, A.V.Ivanov</i> Symmetric 2-adic complexity of binary sequences with period $4q$ and optimal autocorrelation magnitude	47
<i>M.A.Kalitov, N.P.Kornyshev</i> Signals transformation in the multispectral television system with overlapping spectral ranges	52
<i>D.Yu.Konovalov, K.P.Masyukov, A.A.Semenov</i> Algorithm for assessment and forecasting of functional readiness of radio electronic equipment	60
<i>N.P.Kornyshev, D.A.Serebryakov</i> Adaptation of the selection method for the image of a small-sized object on a non-uniform background to the conditions of video surveillance	66
<i>M.Y.Kuznetsov, A.A.Shatalov, V.A.Shatalova</i> Adaptive signal recognition algorithm in multi-frequency radars against background noise	71
<i>G.M.Sidelnikov</i> Noise stability of the KAM-16 signal demodulator when transforming the boundaries of the signal constellation in a channel with multipath	76
<i>A.A.Sherstneva</i> Reliability forecasting on the base of autoregression models for infocommunication systems	82

Short reports

<i>Ya.I.Granovsky</i> On the calculation of the periastron's motion	87
---	----

Pedagogics

<i>G.A.Ulanova, O.V.Popolitova, G.Yu.Panarina</i> Working with the school management to ensure the wellbeing of children and improve academic achievement	89
---	----

ОБРАЩЕНИЕ К ЧИТАТЕЛЯМ

Дорогие коллеги, читатели и авторы статей журнала «Вестник НовГУ. Технические науки»!

В настоящее время усиливается роль Новгородского университета по повышению конкурентоспособности выпускников на рынке труда, в социально-экономическом, научно-техническом и социальном развитии Новгородской области и Северо-Западного региона России, обеспечении устойчивости развития во взаимодействии общества с окружающей средой через открытость, научно-образовательную, консалтинговую и экспертную деятельность, а также просветительскую работу.

У любого университета существует три основные базовые роли: обеспечение студентов высоким уровнем образования и воспитания; развитие науки; социальная функция, заключающаяся в содействии социальному развитию региона, инновациям и развитию технологий, переподготовке кадров и повышению квалификации. Повышение эффективности различных видов деятельности университета в последние годы становятся все более актуальным. Среди инструментов по развитию базовых ролей университета особое значение имеют научные журналы, учредителем которых является университет.

Задача научного журнала — распространение научного знания. Цели университета, являющегося учредителем издания, — продвижение научных результатов своих сотрудников и поддержание репутации университета в научном сообществе.

Журнал «Вестник НовГУ» — рецензируемый, включен в Реферативный журнал и базы данных ВИНТИ. Издание индексируется в международных научных базах данных Ulrich's Periodicals Directory, EBSCO. Для оценки качества публикуемых статей по каждой серии созданы институты рецензирования. Журнал размещается на сайте научной электронной библиотеки (НЭБ «eLIBRARY.ru»), при которой создан Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Кроме того, журнал имеет собственную страницу на сайте НовГУ со свободным полнотекстовым доступом к публикациям. «Вестник НовГУ. Технические науки» с 2004 г. включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

05.12.04 — Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (технические науки),

05.12.07 — Антенны, СВЧ устройства и их технологии (технические науки),

05.12.13 — Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки),

05.12.14 — Радиолокация и радионавигация (технические науки),

05.27.01 — Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах (технические науки),

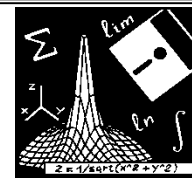
05.27.03 — Квантовая электроника (технические науки),

05.27.06 — Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники (технические науки).

«Вестник НовГУ. Технические науки» публикует результаты научно-исследовательской, научно-практической и инновационной деятельности коллективов и отдельных авторов, отвечающие современному развитию электроники и радиотехники. Учреждение журнала содействует развитию научного потенциала, росту конкурентоспособности НовГУ в сфере публикационной деятельности, укреплению имиджа университета в научном и образовательном обществе, привлечению к сотрудничеству отечественных и иностранных учебных заведений и организаций, талантливых российских и зарубежных ученых с целью активного вхождения в систему науки и образования.

В редакцию поступило около 20 статей, отражающих результаты перспективных исследований в области современной физики, полупроводниковой и функциональной электроники и радиотехники. Значительная часть статей представляет собой совместные исследования по радиоэлектронике сотрудников Новгородского университета и новгородских предприятий. Положительным фактором является расширение географии авторов научных статей: кроме НовГУ, имеются публикации из организаций Санкт-Петербурга, Ульяновска и Донецка. Выражаю уверенность, что работы данного выпуска будут интересны широкому кругу читателей.

М.И.Бичурин,
д.ф.-м.н., профессор,
заслуженный деятель науки РФ



ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КВАРКОВЫХ ТРУБОК В ЯДРО-ЯДЕРНОМ РАССЕЯНИИ ПРИ ЭНЕРГИЯХ УСКОРИТЕЛЯ NICA

В.А.Абрамовский, В.С.Сандул*, Г.А.Феофилов*

INTERACTION OF QUARK TUBES IN NUCLEUS-NUCLEUS SCATTERING WITH ENERGIES OF THE NICA ACCELERATOR

V.A.Abramovsky, V.S.Sandul*, G.A.Feofilov*

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Victor.Abramovsky@novsu.ru

* Санкт-Петербургский государственный университет, grigory-feofilov@yandex.ru

В протон-протонном рассеянии при обмене помероном соответствующие ему кварковые трубки цветного хромоэлектрического поля направлены противоположно друг к другу и отталкиваются. В ядро-ядерном взаимодействии обменов померонами несколько, кварковые трубки начинаются на валентных кварках и заканчиваются на валентных дикварках. Дикварки несут в среднем в два раза больший импульс, чем валентный кварк. Соответственно, длина части трубки дикварка больше конца трубки кварка и распадается позже кварковой. Оставшиеся части дикварковых трубок направлены в одну сторону и притягиваются. Поэтому в быстрой части спектра в ядро-ядерном рассеянии произойдет смена режима. Для ускорителя NICA существенны и невакуумные реджионы, трубки которых направлены так же, как и дикварковые трубки. Это приводит к усилению эффекта притяжения.

Ключевые слова: глюон, кварк, кварковая трубка, померон, невакуумный реджион

Для цитирования: Абрамовский В.А., Сандул В.С., Феофилов Г.А. Взаимодействие кварковых трубок в ядро-ядерном рассеянии при энергиях ускорителя NICA // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С.6-8. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).6-8](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).6-8)

In proton-proton scattering during pomeron exchange, the corresponding quark tubes of a colored chromoelectric field are directed oppositely to each other and repel. In the nucleus-nucleus interaction, there are several pomeron exchanges; quark tubes begin at valence quarks and end at valence diquarks. Diquarks carry, on average, twice as much momentum as a valence quark. Accordingly, the length of a part of the diquark tube is longer than the end of the quark tube and decays later than the quark tube. The remaining parts of the diquark tubes are directed in one direction and are attracted. Therefore, a regime change will occur in the fast part of the spectrum in nucleus-nucleus scattering. For the NICA accelerator, nonvacuum regions are also important, the tubes of which are directed in the same way as diquark tubes. This leads to an increase in the attraction effect.

Keywords: gluon, quark, quark tube, pomeron, nonvacuum regions

For citation: Abramovsky V.A., Sandul V.S., Feofilov G.A. Interaction of quark tubes in nuclear-nuclear scattering with energies of the NICA accelerator // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.6-8. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).6-8](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).6-8)

1. В настоящее время основными картинками, описывающими сильное взаимодействие адронов и ядер, являются реджевская теория и квантовая хромодинамика (КХД). Обмен померонами характеризуется глюонным обменом между кварками адронов и ядер с последующим образованием ряда пар хромоэлектрических кварковых трубок. Разрыв этих трубок, растягивающихся при разлете образовавшихся цветных состояний, дает конечное многочастичное состояние [1].

Обмену невакуумным реджионом соответствует уход одного из валентных кварков из волновой функции налетающего адрона и взаимодействию его с кварком из другого сталкивающегося адрона. При этом образуется одна хромоэлектрическая трубка,

которая впоследствии также разваливается на вторичные адроны.

2. Кварковые трубки имеют конечный радиус $r_0 \sim 1$ Фм, поперечные состояния между ними также порядка 1 Фм. Поэтому они перекрываются и могут взаимодействовать. Точная форма взаимодействия неизвестна. Однако, рассматривая взаимодействие трубок на решетке, можно показать [2,3], что в $SU(3_c)$ калибровочной теории трубки с одинаковым направлением хромоэлектрического поля притягиваются, а с противоположным направлением — отталкиваются.

Из-за отталкивания или притяжения трубок с момента их образования и до распада на адроны трубки приобретут поперечный импульс, который, сложившись со «случайными» поперечными им-

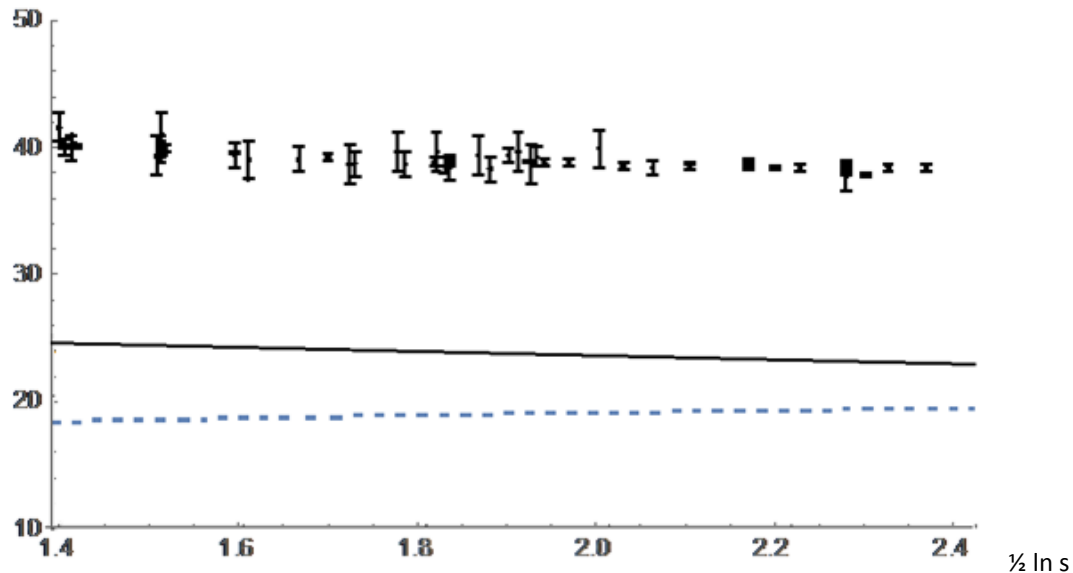


Рис.1. Сечение протон-протонного рассеяния в интервале энергий NICA. По оси абсцисс отложена энергия пары. По оси ординат — сечение в мб. Штриховая линия изображает вклад померона, сплошная — вклад невакуумных реджионов, в сумме 42,03 мб

пульсами адронов, возникших от распада трубки, анизотропно исказит поперечное угловое распределение. Поскольку плотность этого поперечного импульса одинакова по всей длине трубки (т. е. при всех быстротах вторичных адронов), то искажение спектра данной трубки сводит к его сдвигу на одинаковый для всех вторичных адронов поперечный импульс $\vec{q}$.

3. В интервале энергий NICA (4-11 ГэВ на нуклонную пару) вклады невакуумных реджионов и померона примерно одинаковы. Поэтому при столкновении ядер (^{197}Au) примерно одинаковым будет число обмениваемых померонов и реджионов (рис.1).

В дуально-топологической модели невакуумный реджион вводится в процессе мезон-мезонного рассеяния, где валентный кварк одного мезона аннигилирует с валентным антикварком другого мезона.

Между оставшимися кварком и антикварком образуется хромозлектрическая кварковая трубка, начинающаяся от кварка в одном мезоне и заканчивающаяся на антикварке в другом мезоне.

В случае протон-протонного (нуклон-нуклонного) рассеяния ситуация другая. В этом случае роль антикварка играет дикварк (см. рис.2). Замедление дикварка менее вероятно, чем замедление кварка. Поэтому взаимодействие медленных кварка и дикварка дает более низкие дочерние невакуумные траектории. Обратим внимание, что при обмене невакуумным реджионом кварковые трубки (рис.2b) для протон-протонного рассеяния разрываются на медленных кварках в системе центра инерции и концы трубок заканчиваются на быстрых дикварках протонов.

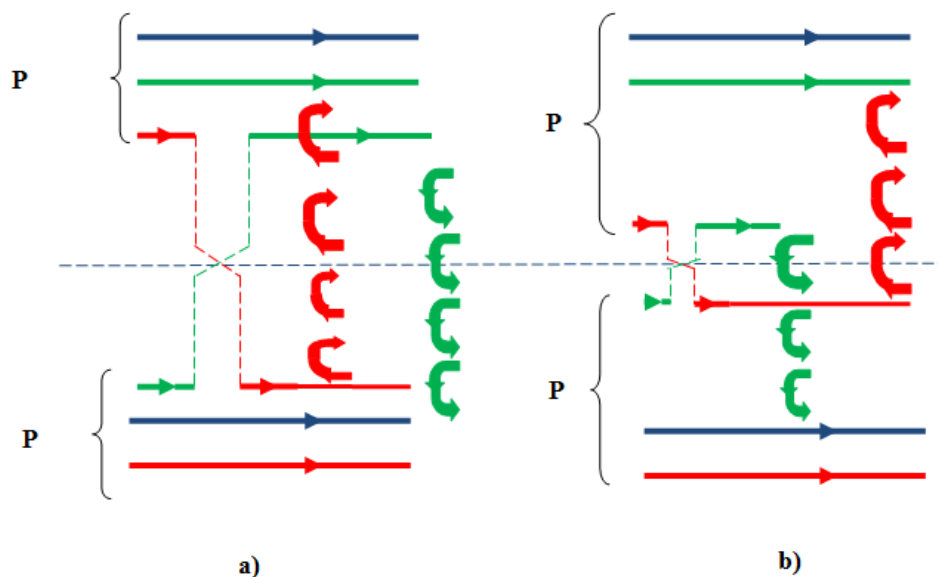


Рис.1. Диаграммы цветного обмена в протон-протонном взаимодействии: а) КХД диаграмма глюонного обмена (вклад померона) с двумя кварковыми трубками; б) диаграмма реджионного обмена с одной кварковой трубкой — для pp рассеяния это единственно возможная диаграмма медленных (выбившихся из нуклонов) кварков. Пунктирная линия показывает направление движущихся вторичных частиц, верхняя часть — движение в положительном направлении; нижняя — в отрицательном направлении

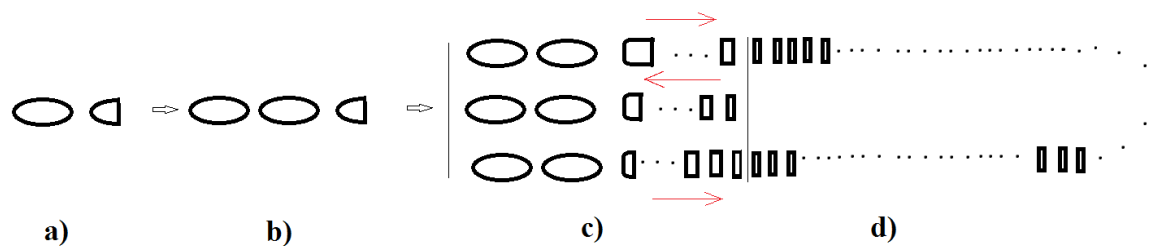


Рис.3. Разрывы кварковых трубок. Слева разрыв одной трубки: а) рождение пары кварк—антикварк с образованием медленно-го легкого фрагмента; б) рождение второй пары кварк—антикварк с образованием второго легкого фрагмента и т.д. Справа: с) разрыв померона и невакуумного реджиона. Верхняя кварковая трубка — трубка, заканчивающаяся на валентном дикварке, имеющая больший импульс; средняя — начинающаяся на валентном кварке, имеющая меньший импульс; нижняя трубка — трубка невакуумного реджиона, имеющая максимальный импульс. Стрелками указано направление хромозлектрических полей. На этапе d) правее распада кварковой струны валентного кварка в помероне происходит смена режима — все кварковые трубки притягиваются. (Мы рассматривали только верхнюю часть диаграммы рис.1)

4. Рассмотрим разрывы всех кварковых трубок (рис.3). Для трубок, образовавшихся при обмене помероном, наиболее вероятно будет ситуация, когда каждый валентный кварк несет $1/3$ глюонного импульса нуклона. В трубке, соответствующей невакуумному реджиону, дикварки несут полный импульс сталкивающихся нуклонов.

В каждой из трубок рождается пара кварк-антикварк. Кварки считаются безмассовыми и имеющими в момент разрыва нулевые импульсы. Это предположение существенно, так как только в этом случае кварк-антикварк пара может родиться локально, без нарушения законов сохранения в одной мировой точке, что позволяет применять классическую картину без затруднений с причинностью.

В каждой из кварковых трубок померона рожденный антикварк устремится к первичному (валентному) кварку нуклона, а рожденный кварк — к первичному дикварку нуклона, сформировав таким образом в каждой из кварковых трубок два разлетающихся в разные стороны фрагмента, дальнейший распад которых — две направленные в разные стороны струи вторичных адронов.

Для невакуумной кварковой трубки рожденные антикварки вместе с медленными кварками образуют «легкие» фрагменты, распадающиеся в дальнейшем на 2-3 вторичные частицы, а кварки совместно с валентными дикварками образуют «тяжелые» фрагменты.

Следующий разрыв происходит через время (отсчитанное от разрыва) $t = 1/\omega l$, где l — длина фрагмента, а ω — вероятность образования пары кварк-антикварк на единицу длины трубки в единицу времени (величина ω оценивается так $\omega = 2 \text{ Фм}^{-2}$).

Инициатором дальнейшего каскада распадов является тяжелый фрагмент. Он претерпевает очередной разрыв с отщеплением легкого фрагмента и т.д. Так как длина тяжелого фрагмента при каждом разрыве прогрессивно уменьшается, то, соответственно, растет время, требующееся на очередной разрыв, и растет импульс легкого фрагмента. Это приводит к логарифмической множественности и платооб-

разному спектру по быстротам в центральной области для легких фрагментов.

5. Квадрат массы тяжелого фрагмента порядка импульса валентного кварка и дикварка. После нескольких разрывов тяжелый фрагмент похож не на трубку, а на диск. Для кварковых трубок на рис.3 самой короткой (с меньшим числом разрывов) будет померонная трубка с валентным кварком. Более длинной, по крайней мере на несколько разрывов, будет трубка с валентным дикварком. Самой длинной будет трубка для невакуумного реджиона. После того, как эти две последние трубки уйдут дальше от трубки валентного кварка для померона, режим отталкивания сменится на режим притяжения трубок. Поэтому последние легкие фрагменты приобретут одинаковый для всех вторичных частиц импульс, направленный к центру эллипсоида, в котором будут рождаться вторичные частицы.

Работа поддержана грантом РФФИ 18-02-40097.

1. Capella A., Sukhatme U., Tan Chung I and J. Tran Thanh Van. Universality of quark fragmentation and a parton approach for soft hadronic reactions // Quarks, gluons, and jets. Proceedings of the 14th Rencontres de Moriond. Les Arcs, France. March 11-23. 1979. Vol. I. P.559-569.
2. Абрамовский В.А., Гедалин Э.В., Гурвич Е.Г., Канчели О.В. Неупругие взаимодействия при высоких энергиях и хромодинамика. Тбилиси: Мецниереба, 1986. С.74-77.
3. Абрамовский В.А., Гедалин Э.В., Гурвич Е.Г., Канчели О.В. Дальние азимутальные корреляции в множественных процессах при высоких энергиях // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т.47. С.281-283.

References

1. Capella A., Sukhatme U., Tan Chung I. et al. Universality of Quark Fragmentation and a Parton Approach for Soft Hadronic Reactions. LPTPE-79-20, 1979, p. 559-569.
2. Abramovskiy V.A., Gedalin E.V., Guvich E.G. Neuprugie vzaimodeystviya pri vysokikh energiyyakh i khromodinamika [Inelastic interactions at high energies and chromodynamics]. Tbilisi, METsNIEREBA Publ., 1986, pp. 74 – 77.
3. Abramovskiy V.A., Gedalin E.V., Guvich E.G. Dal'nie azimutal'nye korrelyatsii v mnozhestvennykh protsessakh pri vysokikh energiyyakh [Long-range azimuthal correlations in multiple processes at high energies]. JETP Lett., 1988, vol. 47, pp. 337-339.

НЕЙРОТЕХНОЛОГИИ И VR. ПРИНЦИПЫ СОВМЕСТИМОСТИ

Д.Я.Бурцева, М.Ю.Луков, Е.А.Менделеев, Р.В.Петров

NEUROTECHNOLOGIES AND VR. PRINCIPLES OF COMPATIBILITY

D.Y.Burtseva, M.Yu.Lukov, E.A.Mendelev, R.V.Petrov

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Darya.Burtseva@novsu.ru

Статья посвящена обсуждению принципов совместимости новой инновационной технологии, включающей в себя нейротехнологию и виртуальную реальность. Приводятся сведения об основных правилах работы нейротехнологий. Имея общие основы, каждый из подходов имеет индивидуальные принципы реализации — от стимуляции небольшими разрядами тока до имплантации чипов. На сегодняшний день нейротехнологии достигли значительного развития, получив признание и применение во многих областях сферы общества. Их присутствие, оставаясь незримым, оказывает значительное влияние на окружающий нас мир. В статье также рассмотрены сферы применения нейротехнологий, преимущества, предоставляемые ими, а также возникающие при этом риски, которые должны быть учтены. Описывается устройство нейрогарнитура Mind Link. Обосновываются преимущества совместного применения нейротехнологий и виртуальной реальности. Показано, каких результатов возможно достичь при совместном использовании данных инноваций, а также дальнейшие пути развития этой технологии.

Ключевые слова: VR, нейротехнологии, инновации

Для цитирования: Бурцева Д.Я., Луков М.Ю., Менделеев Е.А., Петров Р.В. Нейротехнологии и VR. Принципы совместимости // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С.9-13. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).9-13](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).9-13)

The article discusses principles of compatibility of a new innovative technology, including neurotechnology and virtual reality. Information about the basic principles of neurotechnology is provided. Having a common basis, each of the approaches has individual implementation principles, from stimulation with small current discharges to implantation of chips. To date, neurotechnologies have achieved significant development, gaining recognition and application in many areas of the social sphere. Their presence, while remaining invisible, has a significant impact on the world around us. The article also discusses the areas of application of neurotechnologies, the advantages that they provide, as well as the risks that arise in this case, which should be taken into account. The device of the Mind Link neuro-headset is described. The advantages of the joint application of neurotechnologies and virtual reality are justified. It is shown what results can be achieved with the joint use of these innovations, as well as further ways of developing this technology.

Keywords: VR, neurotechnology, innovation

For citation: Burtseva D.Y., Lukov M.Yu., Mendelev E.A., Petrov R.V. Neurotechnologies and VR. Principles of compatibility // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.9-13. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).9-13](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).9-13)

Введение

Нейротехнологии — технологии, включающие в себя все достижения науки, позволяющие понимать мозг, аспекты сознания, мыслительную активность и, исходя из полученных знаний, взаимодействовать с ним. Они позволяют визуализировать мозг с целью лечения и исследований.

На сегодняшний день наука все еще далека от понимания принципов устройства и работы головного мозга живых существ.

На протяжении полувекковой истории нейротехнология обретала все большую значимость, ключевым моментом стало появление нейровизуализации, позволившей ученым наблюдать работу мозга во время проведения экспериментов.

Имея незаметное присутствие, нейротехнологии нашли применение во всех сферах жизни: фармацевтике, сканировании мозга, восстановлении мозговых функций и др.

Дальнейшее развитие нейротехнологий однажды позволит использовать гораздо больше возможностей мозга. Уже сегодня технологии пытаются этому способствовать — игры Brain Age и программы Fast For Word принадлежат к разряду нейротехнологий и стремятся улучшить функции мозга.

Описание технологии

Области применения нейротехнологий обширны:

— в экономике и бизнесе они дают возможность предсказывать поведение рынков; проводить оценку рисков, возможности банкротства, стоимости недвижимости; выявлять недо/переоцененные компании; безопасно проводить транзакции с применением пластиковых карт;

— в области работы с информацией они позволяют распознавать подписи, отпечатки пальцев и голоса; вводить в компьютер финансовые и налоговые документы; строить гибкие системы документообо-

рота; сжимать видеоинформацию; проводить ускоренное кодирование-декодирование; анализировать и обобщать результаты опросов, предсказывая динамику рейтингов [1-3];

— в вопросах безопасности и охранных систем — идентифицировать личность, опознавая голос и лица в толпе; распознавать автомобильные номера; анализировать снимки; обнаруживать подделки и многое другое;

— в области автоматизации производств — проводить комплексную диагностику качества продукции и оптимизацию режимов производства, предупреждать аварийные ситуации;

— в геологоразведке — анализировать сейсмические данные, проводить поиск полезных ископаемых и оценку ресурсов месторождений;

— интернет сфера также применяет их для того, чтобы осуществлять ассоциативный поиск информации, рубрикацию новостных лент, адресную торговлю и маркетинг и многое другое [1].

Нейротехнологии относят к сложным, но вместе с тем к самым многообещающим областям инновационных технологий. Сегодня более 500 компаний занимаются исследованиями и разработками в этом направлении, в том числе и такие гиганты, как Intel, DEC, IBM, Motorola. По данным экспертов, рынок нейротехнологий оценивается в \$9 млрд и к 2024 году достигнет отметки в более чем \$15 млрд. Ключевым моментом здесь является медицина — многие склонны полагать, что инновационные прорывы в сфере нейротехнологий позволят найти «лекарство от всех болезней». Такое мнение вполне обосновано, примером могут послужить искусственные органы и части тела, будь то кохлеарные импланты (устройства, возвращающие слух) нового уровня, посылающие импульс непосредственно в слуховой нерв, или, к примеру, продвинутые версии протезов (от исландской компании Össur), принцип действия которых заключен в следующем. Специальное приложение соединяется с телефоном или планшетом через Bluetooth и позволяет пользователю выбирать «комбинации» из механических пальцев. Таким образом, можно быстро переключаться между задачами: взять кружку, пользоваться компьютерной мышью, держать ручку и многое другое. Подобные решения позволяют людям вести полноценную жизнь [2-4].

Данный интерес к нейротехнологиям обоснован множеством факторов. Но самая главная из них — природная любознательность человечества. Сподвигнутый желанием узнать: «а что находится там, в вышине?», человек создавал сначала простые воздушные аппараты, постепенно, шаг за шагом, доводя их до совершенства, и в конце концов сумел достичь космоса. Стремясь наладить связь и ускорить свое развитие, объединил большую часть населения единой сетью, создавая виртуальный мир со своими особенностями и правилами. Любопытный факт: объединив космос и возможности, предоставляемые технологиями, была создана игра, посвященная исследованию космоса. В ней игроки бороздят космические просторы на вымышленных кораблях, посещая разные планеты и галактики. Причем, чтобы посетить

все созданные звездные системы в игре игроку, непрерывно исследующему мир, потребовалось 10 лет реального времени.

Человечество всегда стремилось познать не только окружающий мир, но и самого себя. Проводились многие опыты и эксперименты на людях и, будем откровенны, они не всегда были этичны и гуманны. Тем ни менее, нельзя отрицать, что то, где мы сейчас находимся, было достигнуто и с их применением тоже. Отсюда вытекает вполне закономерный вопрос: а только ли блага несет развитие нейротехнологий? И если нет, стоят ли преимущества тех рисков?

Вернемся к примеру с протезом — дальнейшее развитие нейротехнологий потенциально способно привести к тому, что надобность в приложении отпадет, и протез будет управляться «силой мысли». По сути, это будет полноценная замена конечности на подобие конструкторов, где новая деталь не будет как-либо выделяться и конфликтовать с уже имеющимися. Над таким проектом уже работают в Кливлендской клинике.

Что помимо смерти и потери чего-либо стремится избежать человек? Ответ прост — боль. И если с психологическими аспектами не все так просто (хотя, бесспорно, однажды и здесь найдутся способы и средства), то с физической стороны уже имеются прорывы. Так, проект Neuros Medical заключается в том, чтобы, вживив в человека имплант, «перехватывать» сигналы от нервных окончаний к мозгу. По их прогнозам, это позволит устранить боли в конечностях, хронические и послеоперационные боли.

Но не стоит забывать, что нейротехнологии — это не только медицина, но и многое другое. Так, например, Neuralink (компания по разработке нейроинтерфейсных компьютеров, созданная Илоном Маском) предлагает идею, в которой, вырезав кусок черепа и соединив с чипом, можно будет взаимодействовать с любым участком мозга, что позволит печатать текст «силой мысли», контролировать компьютеры и прочее умное окружение. Предполагается, что оно также сможет помочь людям, страдающим от шизофрении и аутизма [4].

На сферу образования нейротехнологии также оказывают влияние. Так, канадский стартап Muse предлагает устройство, которое при надевании на голову будет считывать активность мозга. Система способна давать советы по медитации с учетом медицинских показателей. Активность мозга стимулируется посредством звука: в случае, если выбран режим медитации, устройство предлагает спокойные звуки, а когда нужно сосредоточиться — наоборот. Разумеется, данной системе есть куда развиваться [5].

Говоря о стимуляции мозга, стоит упомянуть американскую компанию Thync. Их подход заключается в том, чтобы прикрепленное на шею устройство Thync Relax Pro посылало к мозгу слабые электрические сигналы, воздействуя на нервные окончания головы и шеи. По уверениям разработчиков данный метод позволит снимать стресс, расслабляться или же наоборот — взбодриться. Контроль устройства осуществляется посредством мобильного приложения.

Предполагается, что оно сможет помочь пользователю в работе и также помочь человеку заснуть.

Данные подходы имеют под собой вполне обоснованные выводы и решения, но по тем или иным причинам не способны гарантировать стопроцентного результата. По большей части это связано с тем, что приборы считывают импульсы мозга для анализа человека, упуская остальные показатели, будь то частота пульса или давление [3,5].

Но все это явно говорит пусть о неидеальном, но все-таки полезном для человечества подходе. Так в чем же его «подводные камни»?

Начнем с того, что, как и любое изобретение, они могут быть использованы во вред. С одной стороны, контроль состояния человека дает возможность вовремя принимать решения, обеспечивая своевременные меры. С другой — постоянный контроль способен породить стресс и оказать негативное влияние на психику человека. Представьте такую условную ситуацию: кто-то имеет постоянный доступ к вашему состоянию. Такое не всем придется по нутру. Более того, несмотря на то, что человек является социальным существом, он также склонен к тому, чтобы время от времени уходить в уединение, отгораживаясь абсолютно от всех, с целью отдыха и «восстановления». С такими устройствами подобные «восстановительные уединения» станут недоступны, т. к. вы больше не одни.

Кроме того, остается вероятность вмешательства в мозг. Взлом техники, какой бы защищенной она бы не была, является обыденным делом. И никто не даст гарантий, что однажды такое не произойдет и с вашим мозгом. Вот только теперь, помимо денег и личных данных, есть риск потерять и личную свободу с физической безопасностью.

Однако допустим, что данный метод действительно будет неуязвим, тогда возникнет уже совсем другого рода проблема, а именно социальная. Подобное усовершенствование способно разделить людей на две категории — получивших и не получивших модификацию. Причем первых будет значительно меньше, чем вторых. Данная ситуация обусловлена рядом причин: деньги (модификация человека едва ли будет дешевым развлечением); информация — сила, а властью люди редко склонны делиться. Таким образом, возможен раздел общества, что потенциально может привести к конфликтам и спровоцировать масштабное противостояние.

Так как же все выше сказанное связано с виртуальной реальностью? Парадоксально, но напрямую. Применение любого из описанных выше методов позволит значительно расширить возможности пользователя в цифровом мире. При нынешнем уровне нейротехнологий возможно уже сейчас при комбинировании с виртуальной реальностью обеспечивать более качественную реабилитацию путем симуляций и погружений в ситуации и определенные моменты. Учитывая, что в игровой форме человек усваивает, запоминает и просто воспринимает все намного лучше, то игры, построенные на принципе, где человеку необходимо самостоятельно контролировать какие-либо свои показатели пользователя (будь то нахождение в вертикаль-

ном пространстве или состояния сосредоточенности и расслабления), воспринимаются гораздо позитивней и показывают лучший результат в сравнении с нейротехнологиями без применения виртуальной реальности.

В связи с тем, что виртуальная реальность и нейротехнологии набирают все большую популярность и скорость развития, приближая день, когда симуляция станет неразличимым продолжением реального мира, становясь из книжного вымысла повседневной рутинной, данная тема приобретает все большую актуальность.

Весьма вероятно, что в будущем «эфемерная реальность» может стать своеобразным «наркотиком», вызывая сильную зависимость и множество негативных последствий, будь то побег от самого себя и реальности, истощающий организм, или же подмена реального мира виртуальным. Поэтому важно уже сейчас искать способы взаимодействия между виртуальной средой и людьми.

В перспективе данную проблему могут решить нейротехнологии, считывающие и обрабатывающие показатели человека. Используя их, можно решить вопрос не только с отслеживанием состояния здоровья пользователя, но и при необходимости дать рекомендации, инструкции, самостоятельно вызвать помощь или же принудительно завершить работу устройств, и все это основываясь на считанной с пользователя информации [4-6].

Однако, помимо контроля и ограничения, одним из наиболее вероятных способов достижения «Нереальной реальности» являются нейроинтерфейсы. Их применение позволит управлять «виртуальным миром» посредством одной лишь столь привычной и не заметной для нас силы мысли, без применения каких-либо вспомогательных устройств (будь то джойстики или контроллеры). Подобный подход уже применяется, причем не только в цифровом мире, но даже в реальном. Ярким примером служит Mind Link, благодаря его применению возможно не только придавать силу игровому персонажу, но и заставлять двигаться робота-паука, основываясь лишь на показателях, считанных устройством, без каких-либо дополнительных устройств.

Описание нейрогарнитуры Mind Link

Нейрогарнитура Mind Link позволяет посредством тренировок мозга развивать умение контроля эмоций и концентрации, управлять импульсами мозга. Состоит из тонкого ремешка длиной 73 см, позволяющего изменять размер и образующего обруч, и датчиков (EEG, GND, REF), считывающих импульсы мозга. Используемое в устройстве расположение датчиков позволило отказаться от применения ушной клипсы, встречающейся в аналогичных устройствах. Вес всего устройства составляет 30 граммов. Связь с компьютером осуществляется посредством Bluetooth. Совместимость с iOS, Android, Windows, MAC OS. Диапазон действия — 10 метров.

В нейрогарнитуре применяется чип TGAM от NeuroSky (США), что позволило использовать стороннее ПО на его основе.

Источник питания — литий-ионный аккумулятор (Литий 3,7 В, 160 мАч). Время работы при активном использовании устройства — 4-5 часов. Когда уровень заряда достигает низкой отметки, происходит звуковое оповещение. Зарядка осуществляется посредством USB через компьютер либо с применением адаптера от сети. Необходимое время зарядки — 1,5 часа; сила тока — 5 В постоянного тока / 500 мА.

Для использования нейрогарнитуру надевают на голову, при этом необходимо, чтобы электроды касались лба пользователя. После чего необходимо подождать, пока компьютер не обнаружит устройство. Когда процесс завершен, можно запускать программы от NeuroSky.

Механизм регистрации мозговой активности и краткая характеристика ритмов мозга

В нашем мозгу не переставая происходит множество процессов как на физическом, так и химическом уровне. Датчики электроэнцефалографа позволяют регистрировать слабую электрическую активность, создаваемую в ходе этих процессов.

Под ритмами мозга понимают циклически происходящие процессы с определенными частотой и амплитудой. Различают следующие ритмы:

- 1) дельта-ритм — глубокий сон, мышечное и ментально расслабление;
- 2) тета-ритм — поверхностный сон, глубокая медитация;
- 3) альфа-ритм — расслабленное бодрствование, спокойствие без концентрации на чём-либо, состояние между сном и пробуждением;
- 4) бета-ритм — состояние бодрствования, внимание на чем-то сфокусировано, происходит обработка информации.

В связи с тем, что электроэнцефалограмма (ЭЭГ) регистрирует слабые сигналы, возникающие вследствие активности мозга, данные могут быть искажены или потеряны из-за мышечной активности (даже простое моргание и незначительное напряжение мышц оказывает значительное влияние на показатели).

В MindLink ЭЭГ регистрируется так же, как в научных исследованиях: определяется «нулевая точка» и относительно неё анализируется электрическая активность.

В медицине измеряют активность одного электрона относительно остальных. Это связано с тем, что при диагностике заболеваний не стоит задача определения ритмов: нужно установить характер электрической активности, по которому и выявляют склонность пациента к тому или иному заболеванию.

Таким образом, в научных исследованиях используется большое число электронов, равномерно распределённых по площади головы. В MindLink же применяется упрощенный вариант.

Выводя информацию в виде цветных шкал, ПО MindLink позволяет в режиме реального времени фиксировать ритмы мозга. При необходимости можно получить краткую характеристику каждой из шкал. Отображение общей активности мозга в виде графика способствует большей информативности и

наглядности. Также присутствует динамическая гистограмма соотношения ритмов. Данные по концентрации внимания и расслабления выводятся отдельно.

Наглядной демонстрацией возможностей Mind Link является управление роботом-пауком, подключенным к системе нейрогарнитуры через Bluetooth.

Заключение

Таким образом, используя любое из описанных выше устройств и сняв с них показатели пользователя, мы можем создать базу данных, что, в свою очередь, позволяет нам сделать математическое моделирование и перевести все в виртуальный мир, задав необходимые параметры и установки.

Применение нейроинтерфейсов позволит в полной мере раскрыть потенциал виртуального мира, воспроизводя в цифровом пространстве реальные запахи, вкусы, тактильные ощущения. Возможно, с его использованием будут пересмотрены концепции графического и звукового мировосприятия человека, позволяя достичь в данных областях новых высот и интерпретаций.

Таким образом, при все большем развитии нейротехнологий у нас появится возможность не просто создавать собственные, пусть и цифровые миры, но и «жить» в них со всем спектром ощущений, присутствующим в реальном миру. Исходя из нынешних тенденций в развитии технологий, в недалеком будущем подобное перестанет быть чьим-то фантастическим вымыслом, став обыденной реальностью.

Учитывая, что развитие технологий приближает инновационные прорывы и расширяет спектр возможностей, закономерно, что все новые методы и средства, появляющиеся в области нейротехнологий, позволяют вывести виртуальную реальность на новый уровень, предоставляя все большие возможности в цифровом мире, давая возможность взаимодействия на совершенно новом уровне.

История показывает, что человечество склонно достигать реализации даже самых невероятных замыслов. Сегодняшний уровень науки, способный решать множество возникающих перед человечеством задач, яркий тому пример.

Все вышеизложенное позволяет заключить, что, несмотря на потенциальные риски и сложности реализации, данные методы обеспечивают инновационный подход к совместимости виртуальной реальности и нейротехнологий, что позволяет обозначать данные сферы одними из наиболее важных и перспективных, так как они сыграют решающую роль в грядущих событиях и взаимодействии человека и цифровых технологий.

1. Кучуганов В.Н. Вербализация реальности и виртуальности. Ассоциативная семантика // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. №1. С.55-66.
2. Аляутдинов М.А., Галушкин А.И., Казанцев П.А., Остапенко Г.П. Нейрокомпьютеры. От программной к аппаратной реализации. М.: Горячая линия—Телеком, 2016. 152 с.

3. Gazzaniga M.S. Facts, Fictions and the Future of Neuroethics [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cogsci.ucsd.edu/~rik/courses/cogs200-w05/readings/GazzNeuroethicsJI-1.pdf>. (дата обращения: 10.12.2020).
4. Голубев В.Н. Нейроэтика: основные этапы развития // Достижения фундаментальной, клинической медицины и фармации // Мат. 72-й научной сессии сотрудников ун-та. 25-26 января 2017 г. Витебск, 2017. С.529-530.
5. Петруня О.Э. Нейрофилософия как исследовательская программа // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. 2015. №4. С.65-66.
6. Segaran T. Programming Collective Intelligence: Building Smart Web 2.0 Applications. O'Reilly Media, Inc., 2007. 308 с.
2. Alyautdinov M.A., Galushkin A.I., Kazantsev P.A. et al. Neyrokomp'yutery. Ot programmnoy k apparatnoy realizatsii [Neurocomputers. From software to hardware implementation]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2016, 152 p.
3. Gazzaniga M.S. Fakty, vymysly i budushchee neyroetiki [Facts, fictions and the future of neuroethics]. Available at: <http://www.cogsci.ucsd.edu/~rik/courses/cogs200-w05/readings/GazzNeuroethicsJI-1.pdf>. (assessed: 10.12.2020).
4. Golubev V.N. Neyroetika: osnovnye etapy razvitiya [Neuroethics: the main stages of development]. Dostizheniya fundamental'noy, klinicheskoy meditsiny i farmatsii. Vitebsk, 2017, pp. 529-530.
5. Petrunya O.E. Neyrofilosofiya kak issledovatel'skaya programma [Neurophilosophy as a research program]. Neyro-komp'yutery: razrabotka i primeneniye, 2015, no. 4, pp. 65-66.
6. Segaran T. Programming the Collective Mind. O'Reilly Media, 2011, 308 p.

References

1. Kuchuganov V.N. Verbalizatsiya real'nosti i virtual'nosti. Asotsiativnaya semantika [Verbalization of reality and virtuality. Associative semantics]. Artificial Intelligence and Decision Making, 2011, no. 1, p. 55-66.

ДВУХСПЕКТРАЛЬНЫЙ ВОСЬМИКАНАЛЬНЫЙ ФОТОПРИЕМНИК ДЛЯ ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

В.В.Гаврушко, А.С.Ионов*

TWO-SPECTRAL EIGHT-CHANNEL PHOTO RECEIVER FOR VISIBLE AND NEAR INFRARED RANGE

V.V.Gavrushko, A.S.Ionov*

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Gavrushko@mail.natm.ru
*ОАО «ОКБ-Планета», Великий Новгород, Ionovas@okbplaneta.ru

Приводятся сведения о разработанном восьмиканальном фотоприемнике на основе германиевых и кремниевых фотодиодов для бортовых систем дистанционного зондирования. Фотоприемник представлял собой две параллельно расположенные четырех элементные линейки фотодиодов. Коротковолновая линейка выполнена на кремниевом чипе, а длинноволновая — на германиевом. Особенностью фотоприемника являлось близкое расположение линеек с зазором, не превышающим 100 мкм. Приемные площадки имели размеры 100×100 мкм². Диапазон спектральной чувствительности составил 0,48-1,03 мкм для коротковолновых каналов и 0,68-1,71 мкм для длинноволновых каналов. Полоса рабочих частот — $0-2 \cdot 10^5$ Гц.

Ключевые слова: фотоприемник, германий, кремний, линейка фотодиодов, спектральная чувствительность

Для цитирования: Гаврушко В.В., Ионов А.С. Двухспектральный восьмиканальный фотоприемник для видимого и ближнего инфракрасного диапазона // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С.14-16. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).14-16](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).14-16)

The receiver consists of two-spectral eight-channel photo receiver. The photodetector consisted of two parallel four-element arrays of photodiodes. Short-wavelength photodetectors are made on a silicon chip, and long-wavelength photodetectors are based on a germanium chip. Photodiode strips are located at a distance of 100 microns. The receiving areas were 100×100 μm². The spectral sensitivity range was 0.48 - 1.03 μm for shortwave channels and 0.68 - 1.71 μm for long-wavelength channels. Operating frequency band is $0-2 \cdot 10^5$ Hz.

Keywords: photodetector, germanium, silicon, photodiode array, spectral sensitivity

For citation: Gavrushko V.V., Ionov A.S. Two-spectral eight-channel photo receiver for visible and near infrared range // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.14-16. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).14-16](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).14-16)

Введение

Бортовые системы дистанционного зондирования Земли, получаемые с помощью летательных аппаратов, находят широкое применение для мониторинга окружающей среды, анализа состояния сельскохозяйственных посевов, картографии, в военной области и т.п. [1-4]. Наряду с широко распространенным использованием матричных многоэлементных фотоприемников для средств бортового видеонаблюдения могут представлять интерес системы с малоформатными матрицами. Бортовые оптоэлектронные системы на основе скоростных малоформатных матриц позволяют обеспечить получение достоверной информации при ограниченном времени обработки данных, а также обладают лучшей устойчивостью к помехам и дестабилизирующим факторам [5]. К ним можно отнести системы с небольшим числом элементов и механической разверткой. При использовании индивидуальных каналов регистрации они способны реализовать наиболее высокую степень однородности пространственной чувствительности. Наличие двух спектральных диапазонов значительно увеличивает информационную насыщенность о наблюдаемых объектах. В настоящей работе приводятся сведения о

разработанном восьмиканальном фотоприемнике на основе германиевых и кремниевых фотодиодов для бортовых систем дистанционного зондирования.

Конструкция и технология фотоприемника

Фотоприемник может быть использован для комплектования ФПУ быстродействующего авиационного оптико-электронного комплекса. Фотоприемник содержит две 4-элементные линейки фотодиодов, расположенные параллельно в одном корпусе. Топология чувствительных элементов приведена на рис.1. Линейка (1) выполнена на кремниевом чипе, а линейка (2) — на германиевом.

Фоточувствительные площадки (3) коротковолнового приемника изготовлены по планарной технологии. В исходный материал КДБ 10 проводилась диффузия бора, а затем через маску SiO₂ диффузия фосфора на глубину 1,2 мкм с поверхностным сопротивлением 15...20 Ом. Поверхность пластины на заключительной стадии диффузии окислялась для уменьшения потерь на отражение. Алюминиевые контактные площадки (4) выполнялись по стандартной технологии. Внешние выводы присоединялись термокомпрессией золотых проволочек диаметром 30 мкм.

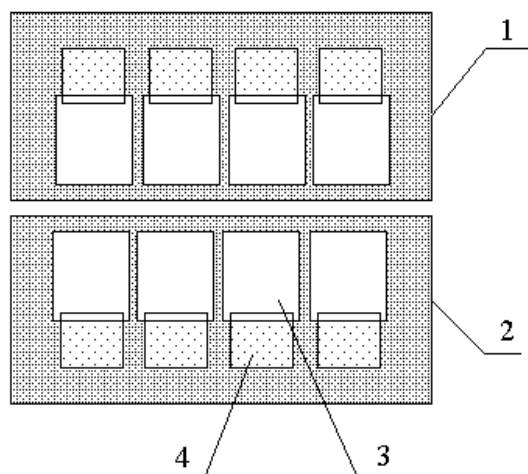


Рис.1. Топология чувствительных элементов

Линейка германиевых фотодиодов также изготовлена по планарной технологии. В исходную пластину p -типа ГДГ-5 проводилась диффузия фосфора на глубину 1,5 мкм. Маской служил пиролитический слой SiO_2 толщиной 0,4 мкм.

Особенностью фотоприемника являлось близкое расположение линеек с зазором, не превышающим 100 мкм, что обеспечивалось высоким качеством реза на стыковочной стороне кристалла и разработанной технологией прецизионного совмещения линеек. Близкое расположение площадок позволяет уменьшить временное и пространственное смещение наблюдаемых объектов в процессе сканирования.

Основные характеристики фотоприемника

Спектральная характеристика для кремниевого (1) и германиевого (2) каналов приведена на рис.2. Длинноволновая граница чувствительности первого канала приходится на $\lambda''=1,03$ мкм. Столь малое для кремниевых фотодиодов значение λ'' полезно с целью снижения области перекрытия спектральных характеристик фотоприемников. Сдвиг длинноволновой границы достигался подлегированием исходной пластины бором и формированием встроенного электрического поля, тормозящего неосновные носители заряда в базовой области. Оценка значения эффективной длины диффузии электронов для такой структуры составила всего 21 мкм.

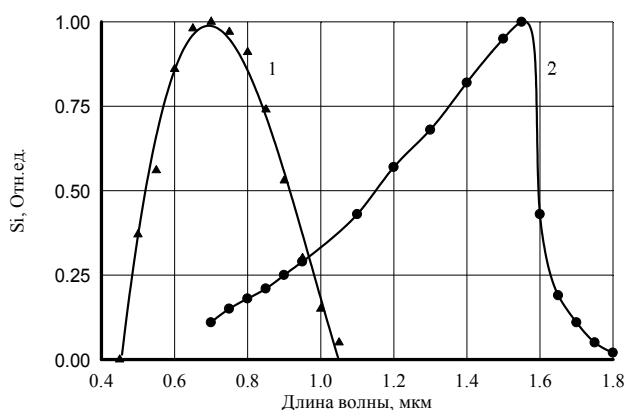


Рис.2. Относительная спектральная чувствительность фотоприемника

Основные параметры разработанного фотоприемника приведены в таблице.

Параметры фотоприемника

Параметр	Коротковолновый диапазон	Длинноволновый диапазон
Число каналов	4	4
Тип фотоприемника	Кремниевый фотодиод	Германиевый фотодиод
Размеры площадок, мкм	100×100	100×100
Коротковолновая граница чувствительности, мкм	0,48	0,68
Максимум спектральной характеристики, мкм	0,7	1,55
Длинноволновая граница чувствительности, мкм	1,03	1,71
Полоса рабочих частот, Гц	$0-2 \cdot 10^5$	$0-2 \cdot 10^5$

Заключение

Разработанный двухцветный фотоприемник обладает незначительным перекрытием спектральных характеристик и хорошо разнесенными диапазонами чувствительности. Фотоприемник может быть использован для комплектации бортовых систем дистанционного зондирования земной поверхности в отраженном солнечном свете. Добавление к видимому диапазону инфракрасного значительно увеличивает информационную ценность получаемых данных. Так, например, ближний ИК-диапазон очень эффективен в оценке состояния сельскохозяйственной растительности, определении степени ее угнетения. Широко применяется наблюдение в ближнем ИК диапазоне для мониторинга лесных покровов, экологического состояния промышленных зон. Высокое быстродействие фотоприемника позволяет формировать значительно более качественное изображение по сравнению с матричными фотоприемниками при использовании непрерывно движущегося носителя.

1. Киес Р.Дж., Крузе П.В., Патли Э.Г. и др. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов / Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1985. 328 с.
2. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение / Пер. с франц. М.: Мир, 1988. 416 с.
3. Шовенгерд Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
4. Легкий В.Н., Галун Б.В., Санков О.В. Оптоэлектронные элементы и устройства систем специального назначения. Новосибирск: НГТУ, 2011. 455 с.

5. Черников А.А., Кравец С.А., Легкий В.Н. и др. Бортовые фотоприемные устройства на основе скоростных малоформатных матриц ИК диапазона // Интерэкспо Гео-Сибирь. Сб. мат. XV Междунар. науч.-технол. конф. «Молодежь. Инновации. Технологии». 2019. №7. С.22-26.

References

1. Keyes R.J., Kruse P.W., Patly E.G. Optical and Infrared Detectors (Topics in Applied Physics). Springer, 1977 (Rus. ed.: Photodetectors of the visible and IR ranges. Moscow, Radio svyaz' Publ., 1985. 328 p.).
2. Gilbert Gaussorgues. La Thermographie Infrarouge. Technique et documentation, 1981, 386 p. (Rus. ed.: Infrared thermography. Basics, technique, application. Moscow, Mir Publ., 1988, 416 p.).
3. Schowengerdt R.A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. Academic Press, 522 p. (Rus. ed.: Remote sensing. Models and methods of image processing. Moscow, Technosphere Publ., 2010, 560 p.).
4. Legkiy V.N., Galun B.V., Sankov O.V. Optoelektronnye elementy i ustroystva sistem spetsial'nogo naznacheniya [Optoelectronic elements and devices for special purpose systems]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2011, 455 p.
5. Chernikov A.A., Kravets S.A., Legkiy V.N. et al. Bortovye fotopriemnye ustroystva na osnove skorostnykh maloformatnykh matrits IK diapazona [On-board photodetectors based on high-speed small-format IR matrices]. Interekspo Geo-Sibir'. Coll of papers of the 15th international conference "Youth. Innovations. Technologies", 2019, vol.7, pp.22-26.

ВЛИЯНИЕ ОЦЕНКИ НЕИЗВЕСТНОЙ ДИСПЕРСИИ ДОХОДА НА ПОТЕРИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СТРАТЕГИИ UCB ДЛЯ ГАУССОВСКОГО ДВУРУКОГО БАНДИТА

С.В.Гарбарь

RELATION BETWEEN REWARD VARIANCE ESTIMATION AND LOSSES FOR UCB STRATEGY FOR GAUSSIAN TWO-ARMED BANDIT

S.V.Garbar

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Sergey.Garbar@novsu.ru

Рассматривается задача о двуруком бандите с гауссовским распределением доходов действий с неизвестными математическим ожиданием и дисперсией. Гауссовские двурукие бандиты могут быть использованы при рассмотрении пакетной обработки, когда имеются два возможных метода обработки. Показано, что при использовании стратегии UCB1 величина ожидаемых потерь непрерывно зависит от оценки дисперсии доходов действий. С использованием метода Монте-Карло установлен характер зависимости. Отмечается, что использование некорректной оценки равносильно неоптимальному выбору параметров алгоритма, но величина потерь расчета незначительна при достаточно большой ошибке, что дает возможность оценить величину дисперсии на начальном этапе управления.

Ключевые слова: управление в случайной среде, задача о двуруком бандите, UCB

Для цитирования: Гарбарь С.В. Влияние оценки неизвестной дисперсии дохода на потери при использовании стратегии UCB для гауссовского двурукого бандита // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С.17-20. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).17-20](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).17-20)

Gaussian two-armed bandit problem is considered. Awards are assumed to have unknown expected values and unknown variances. Gaussian two-armed bandits may prove useful in a batch processing scenario, when there are two methods available. It is demonstrated that expected regret value is a continuous function of reward variance when using UCB1 strategy. Monte-Carlo simulations are used to show the nature of the relation between variance estimation and losses. It is shown that using an incorrect estimate is equivalent to using non-optimal parameters of the strategy, but the regret grows only slightly when the estimation error is fairly large, which allows to estimate the variance during the initial steps of the control.

Keywords: control in a random environment, two-armed bandit problem, UCB

For citation: Garbar S.V. Relation between reward variance estimation and losses for UCB strategy for Gaussian two-armed bandit // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.17-20. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).17-20](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).17-20)

1. Введение

Рассмотрим задачу о многоруком бандите, который традиционно описывается как игровой автомат с J рукоятками, одну из которых на очередном шаге выбирает игрок (данный выбор называется действием) [1]. Формально многорукий бандит представляет собой управляемый случайный процесс $\xi(n), n=1,2,\dots,N$; количество раз, которые можно выбрать действие, N называется горизонтом управления, он может быть известен или не определен заранее. Значение $\xi(n)$ на шаге n зависит только от выбранного действия y_n и называется доходом. Математические ожидания доходов $m_1, \dots, m_J$ предполагаются неизвестными.

В связи с тем, что игрок не имеет информации об ожидаемых доходах, соответствующих каждому из действий, то ему необходимо одновременно получать эту информацию и принимать оптимальные решения, исходя из уже полученных знаний, чтобы максимизировать общий полученный доход.

Зачастую для простоты исследований делается предположение и об известности дисперсий $D_1, \dots, D_J$, в таком случае рассматриваемый многорукий бандит

описывается векторным параметром $\theta_1 = (m_1, \dots, m_J)$. Если же дисперсии $D_1, \dots, D_J$ неизвестны, то для описания бандита используется векторный параметр $\theta_2 = (m_1, \dots, m_J, D_1, \dots, D_J)$.

Целью игрока является максимизация общего полученного дохода, но, так как отсутствуют априорные знания о параметре θ , задачей является также приобретение этой информации. Для используемой стратегии σ общий ожидаемый доход будет меньше, чем максимально возможный, поскольку часть раундов будет использована для получения информации о θ , на величину, называемую потерями. Потери после N раундов определяются как математическое ожидание разности между наибольшим возможным доходом и фактически полученным

$$L_N(\sigma, \theta) = E_{\sigma, \theta} \left(\sum_{n=1}^N (\max(m_1, \dots, m_J) - \xi_n) \right) \quad (1)$$

где $E_{\sigma, \theta}(\cdot)$ — математическое ожидание, найденное относительно меры, порожденной σ и θ .

Введем обозначение $D = \max_{l=1 \dots J} D_l$ и будем также анализировать величину нормализованных к $(DN)^{1/2}$ потерь

$$L'_N(\sigma, \theta) = (DN)^{1/2} L_N(\sigma, \theta). \quad (2)$$

Предположение об известности дисперсий на практике можно опустить при использовании многих стратегий, так как при небольших изменениях дисперсии потери будут меняться незначительно, что было представлено в работах [2,3]. Целью данной работы является обоснование этого наблюдения для стратегии UCB и проведение соответствующих численных экспериментов, устанавливающих влияние величины ошибки в оценке дисперсии на приведенные потери при заданном горизонте управления.

При неизвестных дисперсиях доходов действительный возможен их оценка на первых этапах управления или постоянная переоценка в процессе управления, и решение о том, насколько точная оценка требуется, также можно принимать на основании анализов результатов данной работы.

2. Стратегии UCB

Ввиду того, что целью является минимизация потерь, то при известном значении параметра многорукого бандита θ следовало бы выбирать действие с наибольшим ожидаемым доходом. Поскольку параметр является неизвестным, то возникает дилемма «информация или управление», сущность которой заключается в необходимости использовать некоторое число шагов действий для исследования распределения доходов действий, что влечет за собой получение менее чем максимально возможного дохода. При этом возможно получение оценок параметров многорукого бандита, наибольшую важность из которых имеют математические ожидания доходов различных действий.

Если на n -м шаге действие с номером l было выбрано n_l раз, от чего получен доход $X_l(n)$, то величина $X_l(n)/n_l$ будет являться точечной оценкой для ожидаемого дохода m_l . Может показаться разумным выбирать действие, соответствующее наибольшему значению данной оценки, однако это может привести к значительным потерям, если в силу случайности наилучшее действие на первых шагах принесло небольшой доход. Другими словами, для корректной оценки m_l необходимо, чтобы при $N \rightarrow \infty$ каждое действие было выбрано бесконечное число раз.

Стратегии UCB [4-6] предполагают вместо точечных оценок рассматривать верхние границы доверительных интервалов их интервальных оценок, например, UCB1 [6] предписывает выбирать действие, максимизирующее значение

$$U_l(n) = \frac{X_l(n)}{n_l} + \frac{\sqrt{2D \log n}}{\sqrt{n_l}}, l=1,2,\dots,J; n=1,2,\dots,N. \quad (3)$$

При этом предполагается сначала однократно выбрать каждое действие для формирования начальных значений (3) для каждого из действий. Рост величины $\sqrt{2D \log n}/\sqrt{n_l}$ с номером шага n гарантирует, что каждое из действий почти наверное будет выполнено бесконечное число раз на бесконечном горизонте управления. С точки зрения получения наименьшего значения наихудших нормализованных потерь вместо данной величины оказывается рациональным использовать параметризованную $\sqrt{aD \log n}/\sqrt{n_l}$.

3. Влияние оценки дисперсии на потери

Рассмотрим гауссовского двурукого бандита с равными дисперсиями доходов $D_1 = D_2 = D$, пусть N — горизонт управления. Предположим, не умаляя общности, что худшее действие имеет нулевые средние ожидаемые доходы, соответственно, лучшее — положительные ожидаемые доходы, т. е. $m_1 > 0, m_2 = 0$.

Гауссовские двурукие бандиты играют важную роль во многих приложениях [7,8]. В частности, при пакетной обработке данных, когда выбор действия может быть изменен лишь после того, как оно было использовано заданное число раз, доходы от обработки одного пакета будут иметь нормальное распределение в силу центральной предельной теоремы. Это особенно важно, так как при этом возможна параллельная обработка [2,3,9].

В работах [10,11] построены инвариантные описания пакетных версий различных вариантов стратегий UCB с горизонтом, равным единице, на множестве близких распределений доходов — когда разница между математическими ожиданиями имеет порядок $N^{-1/2}$ (что является наиболее сложным для управления случаем, так как при этом величины нормализованных потерь (2) принимают наибольшие значения [12]). Многие из приведенных в работах [10,11] утверждений относительно пакетной обработки данных справедливы также и для гауссовских двуруких бандитов.

Рассмотрим, каким образом ожидаемые доходы при выборе очередного действия зависят от оценки дисперсии.

Обозначим через $(n+1)$ номер очередного шага, и пусть n_1 — количество применений первого действия на текущий момент, соответственно, $n_2 = n - n_1$ — количество применений второго действия.

Доход от однократного применения каждого действия для гауссовского запишем как $m_l + \sqrt{D}\eta$, где η — стандартная нормально распределенная случайная величина.

Доход от применения l -го действия можно записать с использованием индикаторных функций $I_l(n)$, которые определены для каждого имеющегося действия и принимают единичное значение для тех шагов, на которых те были выбраны:

$$I_l(n) = \begin{cases} 1, & \text{если } U_l(n) = \max(U_1(n), U_2(n)), \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (4)$$

Ожидаемый доход для l -го действия записывается как сумма n_l гауссовских случайных величин, т. е. также является нормально распределенной случайной величиной

$$X_l(n) = n_l m_l + \sum_{i=1}^n I_l(i) \sqrt{D} \eta = n_l m_l + \sqrt{n_l D} \eta. \quad (5)$$

Общие ожидаемые потери на шаге $(n+1)$ в случае известной дисперсии при фиксированном n_1 по определению можно найти как математическое ожидание потерь при выборе действия. Если выбрано первое действие с более высоким ожидаемым доходом, то потери нулевые, в противном случае равны разнице ожидаемых доходов от действий

$$L_{n+1}(\sigma, \theta) = L_n(\sigma, \theta) + 0 \cdot P(U_2(n) < U_1(n)) + m_1 P(U_2(n) \geq U_1(n)). \quad (6)$$

Оценим вероятность выбора неоптимального действия

$$P(U_2(n) \geq U_1(n)) = P\left(\frac{X_1(n)}{n_1} + \frac{\sqrt{aD \log n}}{\sqrt{n_1}} - \frac{X_2(n)}{n_2} - \frac{\sqrt{aD \log n}}{\sqrt{n_2}} \leq 0\right) = P\left(m_1 - m_2 + \sqrt{D/n_1} \eta_1 - \sqrt{D/n_2} \eta_2 + \frac{\sqrt{aD \log n}}{\sqrt{n_1}} - \frac{\sqrt{aD \log n}}{\sqrt{n_2}} \leq 0\right), \quad (7)$$

где η_1, η_2 — независимые стандартные нормально распределенные случайные величины. Их линейная комбинация $\sqrt{D/n_1} \eta_1 - \sqrt{D/n_2} \eta_2$ также будет нормально распределенной случайной величиной $\sqrt{D(n_1 + n_2)/n_1 n_2} \eta$, соответственно

$$P(U_2(n) \geq U_1(n)) = P\left(\eta \leq -m_1 \sqrt{\frac{n_1 n_2}{Dn}} + \sqrt{\frac{a \log n}{n}} (\sqrt{n_1} - \sqrt{n_2})\right). \quad (8)$$

Вероятность (8) может быть записана с использованием функции распределения гауссовской случайной величины — функции Лапласа $\Phi(\cdot)$. Ожидаемые потери можно записать как сумму потерь на предыдущем шаге и математическое ожидание потерь на текущем шаге, учитывая, что n_1 может принимать различные значения с вероятностями $P(n_1 = i|n)$, $i = 1, \dots, n$, при этом данная вероятность является зависящей от

$$L_{n+1}(\sigma, \theta) = L_n(\sigma, \theta) + m_1 \sum_{i=1}^n \Phi\left(\frac{\sqrt{a \log n}}{n} (\sqrt{n_1} - \sqrt{(n-n_1)_2}) - m_1 \frac{\sqrt{n_1(n-n_1)}}{Dn}\right) \times P(n_1 = i|n). \quad (9)$$

Выражение (9) является непрерывной функцией от дисперсии D при положительных значениях аргумента (как композиция непрерывных функций), если $L_n(\sigma, \theta)$ является непрерывной функцией от D . Последнее будет верно по математической индукции, однако нужно определить базу индукции.

В соответствии с рассматриваемым алгоритмом первые два шага каждое из действий выбирается единожды для формирования начальных оценок ожидаемых доходов. Соответственно, на третьем шаге, когда $n_1 = n_2 = 1$, ожидаемые потери равны

$$L_3(\sigma, \theta) = m_1 \Phi\left(-\frac{m_1}{\sqrt{2D}}\right), \quad (10)$$

что также является непрерывной функцией от D .

Значит, при $n > 3$ $L_n(\sigma, \theta)$ является непрерывной функцией от D .

Вывод из вышеприведенных рассуждений можно сформулировать в виде теоремы.

Теорема 1. При использовании стратегии UCSB с границами (3) для двурукого бандита, описываемого параметром $\theta = (m_1, m_2, D_1, D_2)$, $D_1 = D_2 = D$, потери (1) являются непрерывной функцией от оценки дисперсии D .

Заметим, что анализируемая далее величина нормализованных потерь (2) также непрерывно зависит от D .

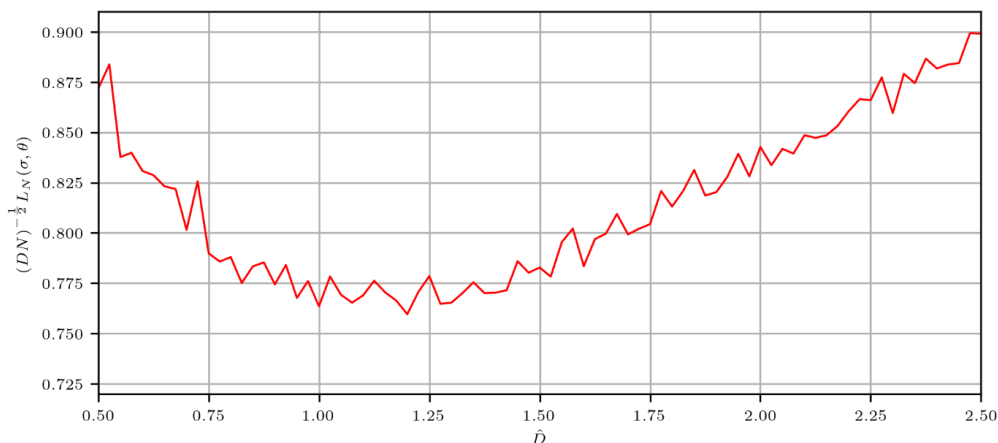
Заметим также, что использование некорректной оценки для дисперсии в формуле (3) имеет тот же эффект, что использование неоптимального значения для параметра a : растет или уменьшается вклад в оценку верхней границы доверительного интервала величины $\sqrt{aD \log n/n_i}$. При ее чересчур малых значениях алгоритм предписывает меньше использовать действие, в среднем принесшее меньший доход, и в худшем случае игрок не получает достаточно информации о нем. При слишком большом значении в худшем случае менее выгодное действие будет применено излишнее количество раз.

Для оценки величины нормализованных потерь в зависимости от оценки дисперсии воспользуемся численным моделированием по методу Монте-Карло.

4. Численное моделирование

Проверим, как на практике максимальные нормализованные потери зависят от величины оценки дисперсии, т. е. какими в худшем случае будут потери для различных оценок дисперсии. Рассмотрим гауссовского двурукого бандита с равными дисперсиями доходов ($D_1 = D_2 = D = 1$). Положим $a = 1$, горизонт управления $N = 200$.

На рисунке представлены результаты численного моделирования: максимальные нормализованные потери при различных величинах оценки дисперсии $\hat{D}$. График получен усреднением максимальных ожидаемых потерь для выбранного горизонта по 10000 моделирований. Рассмотрен случай близких



Зависимость нормализованных потерь $(DN)^{1/2} L_N(\sigma, \theta)$ при использовании стратегии UCSB для гауссовского двурукого бандита с дисперсией доходов $D = 1$ от оценки дисперсии $\hat{D}$

распределений доходов как наихудший с точки зрения величины нормализованных потерь.

Видно, что при корректной оценке дисперсии величина потерь для данного значения параметра a является близкой к минимальной, однако при ее изменении потери возрастают. Также можно заметить, что выбранное значение параметра $a = 1$ не является оптимальным для данного алгоритма. Однако нормализованные потери меняются незначительно (не более чем на 5% от оптимального значения при оптимальном выборе значения параметра a) при изменении оценки дисперсии на 25% как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения.

В связи с тем, что оценка дисперсии является вычислительно более сложной задачей, чем оценка математического ожидания, то при наличии ограничений на время вычислений возможно с заданной достоверностью определить, в течение скольких действий необходимо уточнять оценку дисперсии для достижения требуемых величин потерь в худшем случае. Для этого потребуется построение доверительного интервала для дисперсии нормально распределенной случайной величины с заданным уровнем значимости.

5. Заключение

Показано, что потери при использовании стратегии UCB для гауссовского двурукого бандита являются непрерывной функцией от оценки дисперсии доходов действий. С использованием численного моделирования по методу Монте-Карло установлен характер этой зависимости.

Исследование проведено при финансовой поддержке НовГУ.

1. Lattimore T., Szepesvari C. Bandit Algorithms. Cambridge University Press, 2020. 536 p.
2. Колногоров А.В. Гауссовский двурукий бандит и оптимизация групповой обработки данных // Пробл. передачи информ. 2018. Т.54. №1. С.93-111.
3. Колногоров А.В., Гауссовский двурукий бандит: предельное описание // Пробл. передачи информ. 2020. Т.56. №3. С.86-111.
4. Bather J.A. The Minimax Risk for the Two-Armed Bandit Problem // Mathematical Learning Models — Theory and Algorithms. Lecture Notes in Statistics. 1983. V.20. P.1-11. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5612-0_1
5. Lai T.L. Adaptive Treatment Allocation and the Multi-Armed Bandit Problem // The Annals of Statist. 1987. V.25. P.1091-1114.
6. Auer P. Using Confidence Bounds for Exploitation-Exploration Trade-offs // Journal of Machine Learning Research. 2002. V.3. P.397-422.
7. Reverdy P.B., Srivastava V., Leonard N.E. Modeling Human Decision Making in Generalized Gaussian Multiarmed Bandits // Proceedings of the IEEE. 2014. V.102. №4. P.544-571. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2307024>
8. Reverdy P. Gaussian multi-armed bandit problems with multiple objectives // Proceedings of the American Control

Conference (ACC). Boston, USA, 2016. P.5263-5269. DOI: 10.1109/ACC.2016.7526494

9. Kolnagorov A.V., Shiyani D.N. Parallel Version of the Mirror Descent Algorithm for the Two-Armed Bandit Problem // Proceedings of the 2016 Third International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry (MCSI 2016). Chania, Crete. 27-29 August 2016. P.241-245. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCSI.2016.052>
10. Garbar S.V. Invariant description for batch version of UCB strategy for multi-armed bandit // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol.1658. Article number: 012015. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1658/1/012015>
11. Garbar S., Kolnagorov A. Invariant description for regret of UCB strategy for Gaussian multi-arm bandit // Proceedings of the 6th Stochastic Modeling Techniques and Data Analysis International Conference with Demographics Workshop (SMTDA). Barcelona, Spain, 2-5 June 2020. P.251-260.
12. Vogel W. An Asymptotic Minimax Theorem for the Two-Armed Bandit Problem // Ann. Math. Statist. 1960. V.31. P.444-451.

References

1. Lattimore T., Szepesvari C. Bandit Algorithms. Cambridge University Press, 2020.
2. Kolnagorov A.V. Gaussovskiy dvurukiy bandit i optimizatsiya gruppovoy obrabotki dannykh [Gaussian Two-Armed Bandit and Optimization of Batch Data Processing]. Problems of Information Transmission, 2018, vol.54, no. 1, pp.27-44.
3. Kolnagorov A.V. Gaussovskiy dvurukiy bandit: predel'noe opisanie [Gaussian Two-Armed Bandit: Limiting Description]. Problems of Information Transmission, 2020, vol.56, iss.3, pp.86-111
4. Bather J.A. The Minimax Risk for the Two-Armed Bandit Problem. Mathematical Learning Models — Theory and Algorithms. Lecture Notes in Statistics. 1983, vol.20, pp.1-11. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5612-0_1
5. Lai T.L. Adaptive Treatment Allocation and the Multi-Armed Bandit Problem. The Annals of Statist., 1987, vol.25, pp.1091-1114.
6. Auer P. Using Confidence Bounds for Exploitation-Exploration Trade-offs. Journal of Machine Learning Research, 2002, vol.3, pp.397-422.
7. Reverdy P.B., Srivastava V., Leonard N.E. Modeling Human Decision Making in Generalized Gaussian Multiarmed Bandits. Proceedings of the IEEE, 2014, v.102, no.4, pp.544-571. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2307024>
8. Reverdy P. Gaussian multi-armed bandit problems with multiple objectives. Proceedings of the American Control Conference (ACC). Boston, USA, 2016, pp.5263-5269. DOI: 10.1109/ACC.2016.7526494
9. Kolnagorov A.V., Shiyani D.N. Parallel Version of the Mirror Descent Algorithm for the Two-Armed Bandit Problem. Proceedings of the 2016 Third International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry (MCSI 2016), Chania, Crete. 27-29 August 2016, pp.241-245. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCSI.2016.052>
10. Garbar S.V. Invariant description for batch version of UCB strategy for multi-armed bandit. Journal of Physics: Conference Series, 2020, vol.1658. Article number: 012015. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1658/1/012015>
11. Garbar S., Kolnagorov A. Invariant description for regret of UCB strategy for Gaussian multi-arm bandit. Proceedings of the 6th Stochastic Modeling Techniques and Data Analysis International Conference with Demographics Workshop (SMTDA). Barcelona, Spain, 2-5 June 2020, pp.251-260.
12. Vogel W. An Asymptotic Minimax Theorem for the Two-Armed Bandit Problem. Ann. Math. Statist., 1960, vol.31, pp.444-451.

ПЛАЗМЕННОЕ ТРАВЛЕНИЕ СТРУКТУР GaN/AlGaIn В ХЛОРСОДЕРЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ Cl₂/Ar/O₂

А.В.Желаннов, Б.И.Селезнев*, Д.Г.Федоров

PLASMA ETCHING OF GaN/AlGaIn STRUCTURES IN A CHLORINE-CONTAINING MEDIUM Cl₂/Ar/O₂

A.V.Zhelannov, B.I.Seleznev*, D.G.Fedorov

ОАО «ОКБ-Планета», Великий Новгород

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Boris.Seleznev@novsu.ru

Рассмотрено травление гетероструктур GaN/AlGaIn на установке Sentech SI-500 с источником индуктивно-связанной плазмы. Травление проводилось в хлорсодержащей газовой смеси Cl₂/Ar с добавкой различных количеств кислорода. Исследовано влияние различных технологических факторов на скорость травления и селективность травления между слоями GaN и AlGaIn: количество кислорода в газовой смеси, мощность источника индуктивно-связанной плазмы, высокочастотная мощность. Установлены режимы травления, при которых селективность травления слоев GaN/AlGaIn достигает 30:1. С помощью разработанной технологии плазменного травления подготовлен маршрут изготовления транзисторов на основе гетероструктур с проводящими сар-слоями. Показано улучшение характеристик при использовании проводящего сар-слоя за счет уменьшения контактного сопротивления и сопротивления канала. Получены значения плотности тока 380 мА/мм и крутизны 143 мСм/мм.

Ключевые слова: нитрид галлия, гетероструктура AlGaIn/GaN, травление, индуктивно-связанная плазма, хлор, кислород, селективность, технологический процесс, транзисторная структура, выходные характеристики

Для цитирования: Желаннов А.В., Селезнев Б.И., Федоров Д.Г. Плазменное травление структур GaN/AlGaIn в хлорсодержащей среде Cl₂/Ar/O₂ // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С.21-26. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).21-26](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).21-26)

Etching of GaN/AlGaIn heterostructures on a Sentech SI-500 installation with an inductively coupled plasma source is considered. Etching was carried out in a chlorine-containing Cl₂/Ar gas mixture with the addition of various amounts of oxygen. The influence of various technological factors on the etching rate and etching selectivity between GaN and AlGaIn layers: the amount of oxygen in the gas mixture, power source, inductively coupled plasma, high-frequency power. Etching modes have been established in which the selectivity of etching of GaN/AlGaIn layers reaches 30:1. Based on the developed plasma etching technology, a route for manufacturing transistors based on heterostructures with conductive cap layers has been developed. It is shown that the characteristics are improved when using a conductive cap layer by reducing the contact resistance and channel resistance. The values of the current density of 380 mA/mm and the steepness of 143 mS/mm are obtained.

Keywords: gallium nitride, heterostructure GaN/AlGaIn, etching, inductively coupled plasma, chlorine, oxygen, selectivity, technological process, transistor structure, output characteristics

For citation: Zhelannov A.V., Seleznev B.I., Fedorov D.G. Plasma etching of GaN/AlGaIn structures in a chlorine-containing medium Cl₂/Ar/O₂ // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.21-26. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).21-26](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).21-26)

1. Введение

Нитрид галлия (GaN) как материал для высокотемпературных, высоковольтных, высокочастотных и сильноточных приложений позволяет существенно расширить операционные возможности полупроводниковой техники. Уникальное сочетание физических свойств, включающее большую ширину запрещенной зоны, высокую дрейфовую скорость насыщения электронов, большие напряжения пробоя, высокую теплопроводность, высокую химическую и термическую стабильность, позволяет рассматривать GaN как наиболее перспективный материал для создания микроэлектронных приборов нового поколения. Именно с внедрением GaN в настоящее время связывается прорыв в СВЧ- и сильноточной электронике [1,2].

В настоящее время эпитаксиальные слои нитрида галлия преимущественно выращиваются на подложках сапфира (Al₂O₃) и карбида кремния (SiC), а в

последнее время проявляется интерес к получению нитрида галлия и на кремнии. Коммерциализации приборной GaN технологии способствовали успехи в разработке и промышленном освоении оборудования и технологии эпитаксиального наращивания GaN на подложках кремния большого диаметра [3].

При разработке приборных структур правильный выбор параметров исходного материала во многом определяет достижение предельных характеристик готового устройства. Для получения предельных характеристик транзисторных структур на основе AlGaIn/GaN важным является использование защитных (т.н. сар) слоев, в роли которых могут выступать как тонкие диэлектрические пленки (SiN, SiO₂, Al₂O₃), так и тонкие полупроводниковые слои нитрида галлия (легированные или нелегированные). Однако из-за низкой подвижности и широкой запрещенной зоны нелегированных слоев AlGaIn обычные подходы использования AlGaIn как поверхностного

защитного слоя ограничивают производительность устройств, особенно для СВЧ мощных приложений. Для уменьшения контактного сопротивления вводятся нелегированные или слабо легированные тонкие слои GaN, при этом характеристики приборов не улучшаются из-за увеличения расстояния от затвора до канала и уменьшения индуцированных пьезоэлектрических зарядов. Следовательно, добавление сильнолегированного n^+ -GaN слоя поверх традиционной HEMT структуры AlGaIn/GaN может улучшить производительность приборов. В то же время этот легированный слой должен быть удален перед формированием затворной металлизации Шоттки для уменьшения тока утечки затвора.

Химическое травление в растворах ограничено из-за сильной химической связи азота с галлием. Ограничения жидкостного травления для нитридов III группы вызвало значительный интерес к развитию «сухих» методов травления с малыми энергиями заряженных частиц в хлорсодержащей среде [4].

При использовании сухого травления в процессе изготовления приборных структур необходимо обеспечить относительно высоких скоростей, гладкой морфологии поверхности, минимального внесения дефектов и селективности травления. В HEMT структурах часто используются GaN *cap* слои [5]. Поэтому необходима разработка технологии селективного травления GaN/AlGaIn.

2. Исследование режимов плазменного травления структур GaN/AlGaIn

Для реализации «сухого» метода травления в данной работе использовалась установка с источником индуктивно-связанной плазмы (ИСП) Sentech SI-500 с широким диапазоном плазменных процессов. Пре-

имуществом использования ИСП является возможность травления низкоэнергетичными ионами большой плотности. В процессах травления источник ИСП использовался совместно с высокочастотным (ВЧ) электродом. Это обеспечивало режим реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме, позволяющий управлять напряжением смещения на ВЧ электроде. Напряжение смещения определяло энергию заряженных частиц, взаимодействующих с микроэлектронными структурами на нитриде галлия.

Большая концентрация заряженных частиц в реакторе и малые энергии заряженных частиц во время протекания плазмохимических процессов обеспечивают высокую скорость и качество травления, гладкую морфологию поверхности, селективность травления, позволяют минимизировать концентрацию радиационных дефектов в приповерхностных слоях гетероструктуры.

В качестве исходных образцов использовались эпитаксиальные структуры, выращенные методом MOCVD (химическое осаждение из газовой фазы) с использованием металлоорганических соединений) на сапфировой подложке диаметром 2 дюйма. Эпитаксиальная структура состояла из буферного слоя GaN толщиной 2,2 мкм, слоя $Al_{0,25}Ga_{0,75}N$ толщиной 80 нм и слоя GaN толщиной 80 нм. Для формирования рельефа поверхности использовалась маска на основе фоторезиста.

Травление образцов проводилось в газовой среде на основе Cl_2/Ar с добавкой различных количеств кислорода (от 0 до 10 cm^3/min) при мощности ИСП источника 75, 100 и 200 Вт и смещении (ВЧ мощность) 30, 60 и 90 Вт при давлении в камере 1,2 Па.

В настоящей работе исследовалось влияние параметров плазмы при травлении в хлорсодержащей

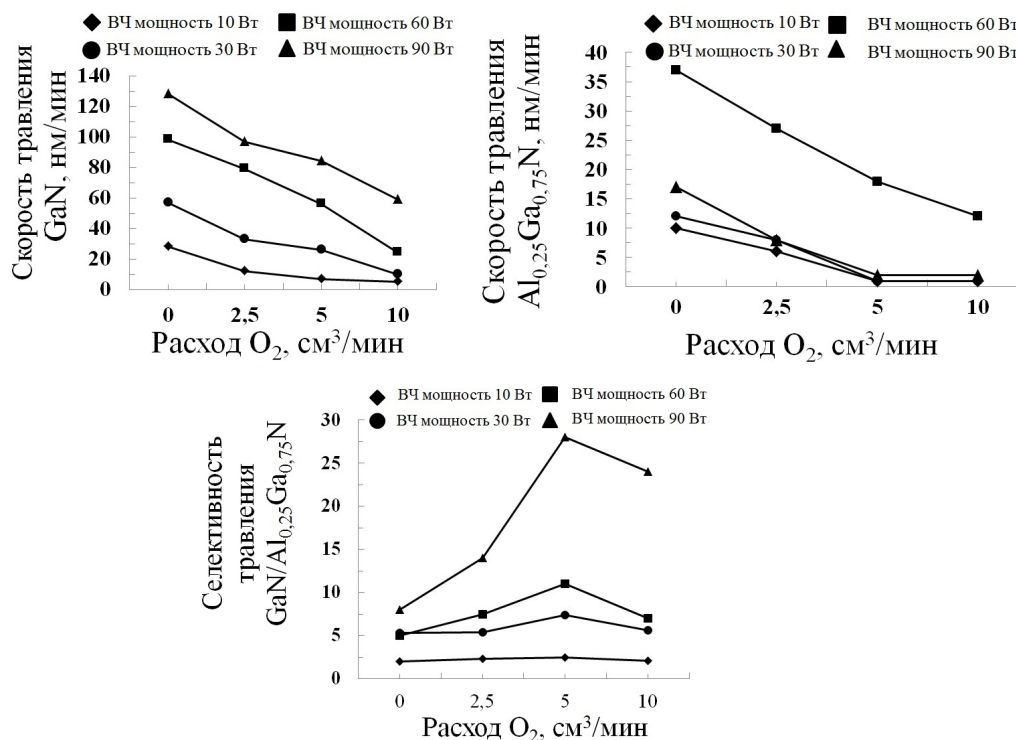


Рис.1. Зависимости скорости и селективности травления структур GaN/AlGaIn в хлорсодержащей среде $Cl_2/Ar/O_2$ от высокочастотной мощности

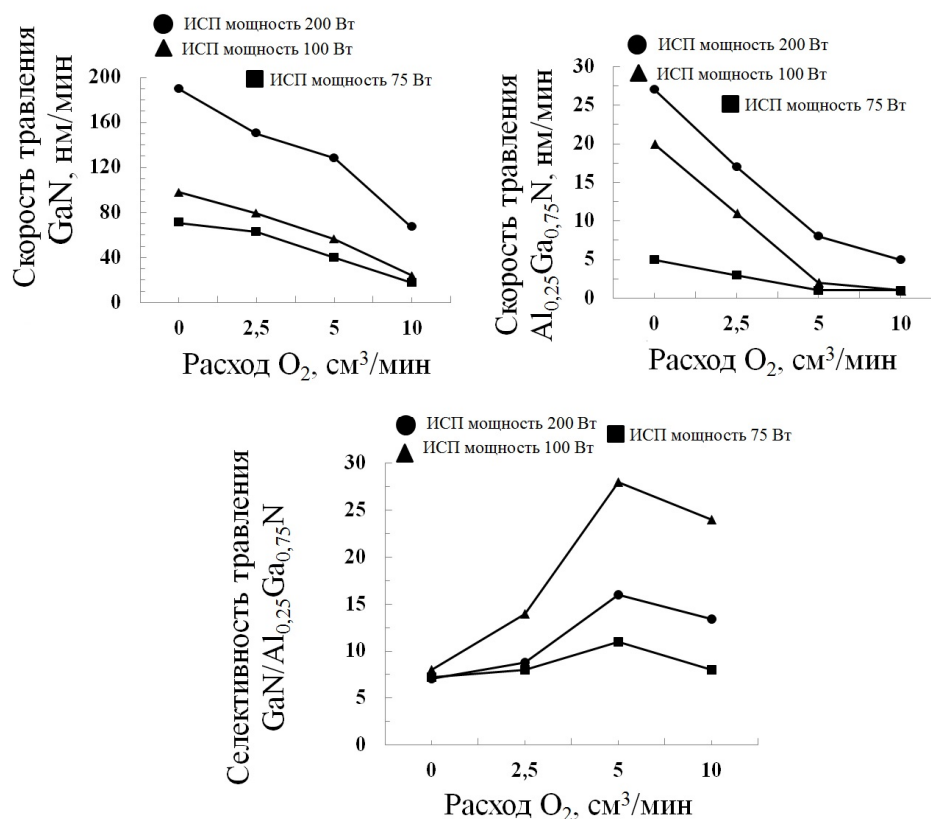


Рис.2. Зависимости скорости и селективности травления структур GaN/AlGaN в хлорсодержащей среде Cl₂/Ar/O₂ от мощности источника индуктивно-связанной плазмы

среде Cl₂/Ar с добавкой кислорода на скорость травления и селективность: ИСП мощность, ВЧ мощность, расход кислорода. Селективность травления GaN/AlGaN структур достигается путем введения кислорода в газовую смесь Cl₂/Ar. Кислород, содержащийся в плазме, реагирует с алюминием в слое AlGaN с образованием оксидного барьера на поверхности. Это предотвращает дальнейшее травление, а также защищает поверхность от ионной бомбардировки [6].

На рис.1, 2 представлено влияние расхода кислорода в газовой смеси Cl₂/Ar на скорость и селективность травления между GaN и AlGaN при разных значениях ИСП мощности и смещения.

Как видно из рис.1, добавление кислорода в газовую смесь резко снижает скорость травления GaN и AlGaN. Это связано с окислением слоя AlGaN при взаимодействии с кислородом и образованием стойкого к травлению в хлоре соединения. При этом зависимость селективности травления от расхода кислорода имеет максимум при расходе 5 см³/мин и составляет величину 30:1. Реактивное ионное травление в индуктивно-связанной плазме оксидной пленки на AlGaN происходит при смещениях на ВЧ электроде от 30 до 60 Вт при мощности источника 100 Вт. Использование сравнительно невысокого смещения и плазмы высокой плотности обеспечивает селективное удаление оксидной пленки.

Также исследовалось влияние мощности источника индуктивно-связанной плазмы на скорость и селективность травления GaN и AlGaN (рис.2). Как видно из рис.2, зависимость селективности травления имеет максимум при расходе кислорода 5 см³/мин и

значении ИСП мощности 100 Вт. Меньшие значения мощности не обеспечивают необходимых скоростей травления из-за достаточно низкой плотности плазмы. При значении мощности больше 100 Вт происходит рост скорости травления AlGaN в связи с более плотной плазмой и, соответственно, снижение селективности.

3. Формирование транзисторов на основе структур GaN/AlGaN с применением плазменного травления

Полученные режимы селективного травления использовались в технологии изготовления транзисторов на гетероструктурах с применением проводящих *cap*-слоев.

Структуры, задействованные в работе, были выращены на сапфировых подложках методом химического осаждения из газовой фазы с использованием металлорганических соединений (MOCVD). Структура слоев представлена на рис.3. Подвижность и концентрация носителей заряда в структуре с *n*⁺-слоем составляли 1820 см²/В·с и 1,04×10¹³ см⁻². Для структур без защитного слоя эти параметры составляли 1675 см²/В·с и 1,21×10¹³ см⁻². Уменьшение концентрации носителей заряда вызвано антинаправлением пьезоэлектрической поляризации между слоем *n*⁺-GaN и AlGaN барьерным слоем, где пьезоэлектрические заряды являются основными носителями заряда в HEMT AlGaN-GaN [7]. При этом уменьшение концентрации носителей заряда всегда приводит к более высокой подвижности двумерного электронного газа. После удаления защитного слоя под затворную металлизацию антинаправление пьезоэлектрического эффекта можно исключить.

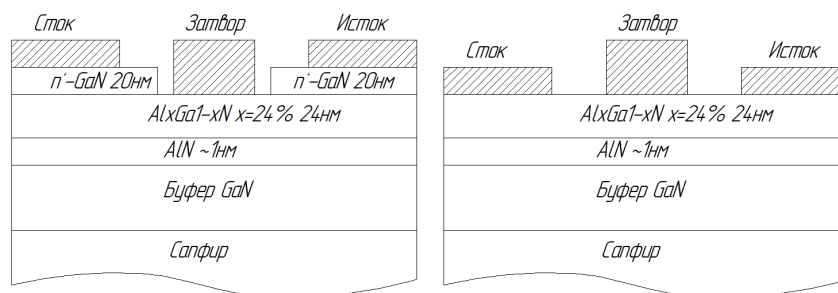


Рис.3. Поперечное сечение структур, используемых в работе

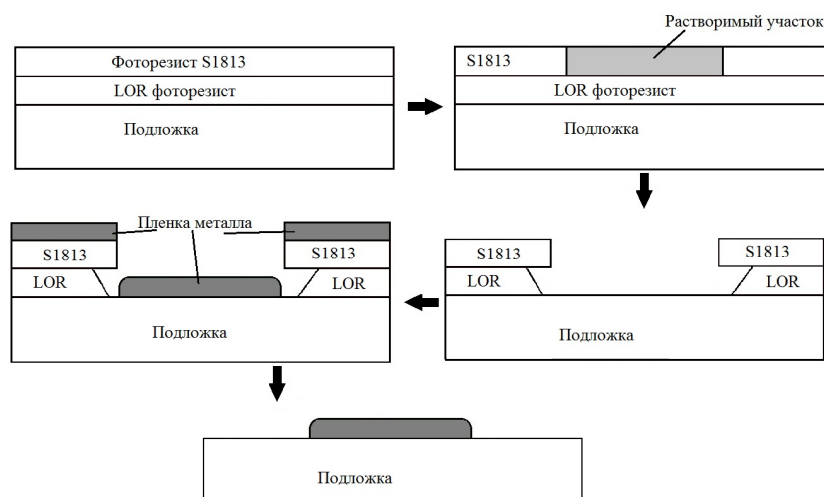


Рис.4. Этапы формирования резистивной маски под «взрывную» фотолитографию

Изготовление приборных структур начиналось с формирования меза-изоляции. Под формированием мезы подразумевается создание структуры на гетероэпитаксиальной пластине с проводящими (активными) и непроводящими слоями с помощью травления поверхности гетероструктуры. Цель операции — отделение активных областей, на которых формируются приборы, друг от друга, чтобы избежать электрического контакта между приборами. Ограничения жидкостных методов травления для нитридных полупроводников приводят к необходимости внедрения плазменных методов травления. Наиболее эффективной в настоящее время является технология травления нитридных полупроводников в плазме с использованием источников на индуктивном ВЧ-разряде. Такие источники позволяют создавать более плотную плазму с высокой однородностью и управляемостью.

В данной работе для формирования мезаизоляции применялось травление в смеси $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3/\text{Ar}$ с использованием ИСП плазмы со скоростью 800 нм/мин [8].

Омические контакты стока и истока формировались с помощью процесса взрывной фотолитографии с применением двухслойной системы фоторезистов LOR 10A и S1813. Использование двухслойной системы на основе LOR резиста позволяет формировать отрицательный наклон стенок, облегчающий процесс удаления металлизации и обеспечивающий ровный край контактных площадок, как показано на рис.4. В качестве металлизации омических контактов

применялась система $\text{Ti}/\text{Al}/\text{Ni}/\text{Au}$, изготавливаемая электронно-лучевым напылением. Отжиг металлизации проводился при температуре 820°C в течение 30 секунд в атмосфере азота.

Оценка контактного сопротивления выполнялась методом длинной линии [9] с набором квадратных контактных площадок 100×100 мкм с расстоянием между ними 5, 10, 15, 20, 25 и 30 мкм. Расчет контактного сопротивления дает величину 0,8 Ом·мм для структуры с $\text{n}^+\text{-GaN}$ защитным слоем и порядка 1,0 Ом·мм для структур без защитного слоя.

Измерение зависимости сопротивления от расстояния по методу длинной линии и вольт-амперные характеристики контактов с расстоянием 30 мкм для рассматриваемых структур представлены на рис.5 и 6.

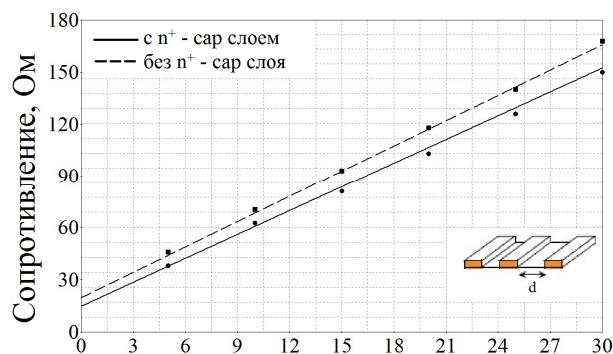


Рис.5. Зависимость сопротивления от расстояния между контактными площадками. На вставке представлен фрагмент тестовой структуры

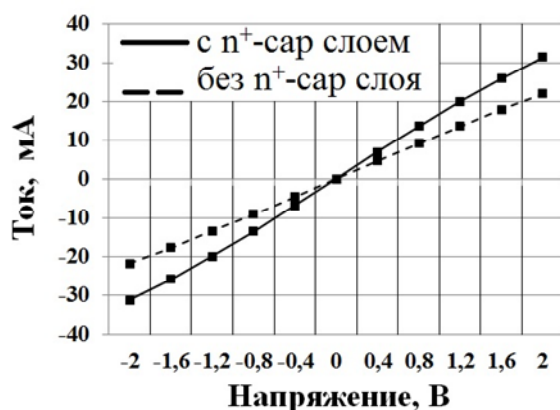


Рис.6. Вольт-амперные характеристики сток-исток на разных структурах

Перед формированием барьерной металлизации необходимо провести удаление проводящего сар слоя GaN. Для проведения этой операции, был разработан процесс селективного травления GaN относительно AlGaIn, описанный выше.

В соответствии с представленными выше зависимостями были выбраны режим травления $\text{Cl}_2/\text{Ar}/\text{O}_2$ 60/10/10 $\text{см}^3/\text{мин}$, ИСП мощность 200 Вт, ВЧ мощность 30 Вт и давление 1,2 Па, позволяющие получить максимальное значение селективности травления.

После удаления n^+ -GaN слоя проводилось формирование барьерной металлизации. Затворы транзисторных структур длиной 1,0 мкм и шириной 100 мкм изготавливались путем последовательного выполнения электронно-лучевого напыления системы Ni/Au и взрывной фотолитографии.

После формирования контактных систем транзисторной структуры приборы пассивировались пленкой Si_3N_4 , полученной плазмо-химическим осаждением при температуре 250°C. Диэлектрическая пленка обеспечивает стабилизацию поверхностных состояний приборной структуры.

4. Характеристики транзисторных структур

В результате проведенного технологического процесса были получены макетные образцы транзисторных структур. Исследование характеристик начиналось с определения параметров барьерной металлизации с использованием тестовых структур диодов Шоттки. Из вольт-амперной характеристики определялись высота барьера и коэффициент неидеальности. Результаты расчета приведены в таблице.

Расчет параметров барьерной металлизации

	Коэффициент неидеальности	Высота барьера, эВ
n^+	0,62	1,77
без n^+	0,66	1,73

Близкие значения параметров барьерной металлизации показывают, что разработанный процесс селективного травления не вносит значительных дефектов в барьерный слой AlGaIn.

Вольт-амперные и переходные характеристики изготовленных структур представлены на рис.7 и 8.

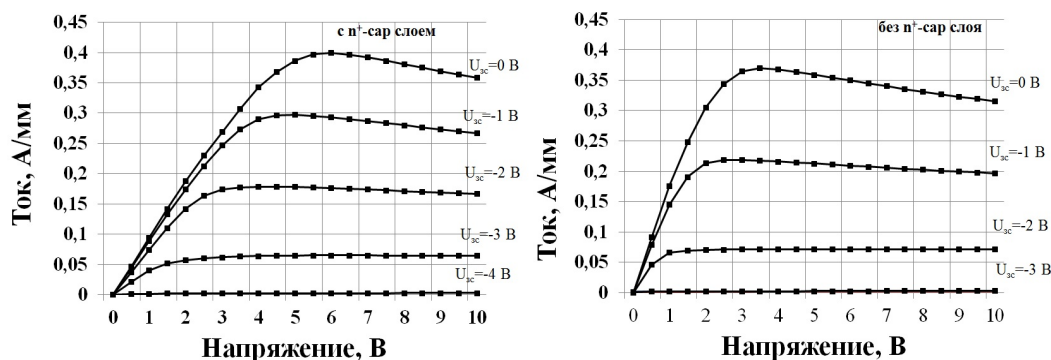


Рис.7. Выходные вольт-амперные характеристики транзисторных структур

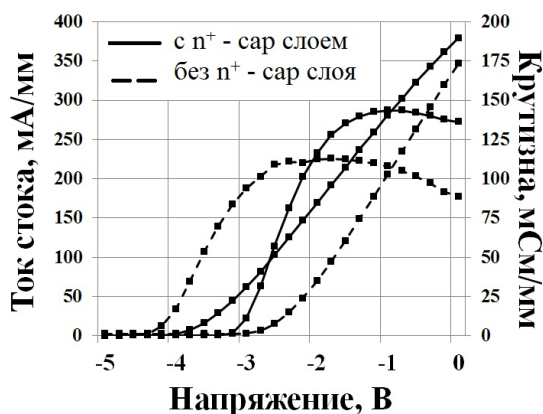


Рис.8. Переходные характеристики транзисторных структур

Отметим, что добавление проводящего слоя обеспечивает низкое удельное сопротивление проводящего канала. Это приводит к низкому пороговому напряжению, большей крутизне и плотности тока. Для структур с n^+ -GaN максимальная крутизна и плотность тока были 380 мА/мм и 143 мСм/мм, в то время как для структур без защитного слоя они составляли 345 мА/мм и 112 мСм/мм.

5. Заключение

Таким образом, в ходе проведенной работы получены режимы селективного травления между слоями GaN и AlGaIn, определено влияние на эти режимы основных технологических параметров: мощности источника индуктивно-связанной плазмы, высокочастотной мощности и количества кислорода. Достигнутая величина селективности составляет 30:1 при режиме травления: мощность ИСП источника — 100 Вт; смещение — 60 Вт; давление в камере — 1,2 Па; расход газовой смеси $Cl_2/Ar/O_2$ — 60/10/5 см³/мин.

С использованием полученных режимов травления изготовлены транзисторы на основе гетероструктур с проводящими защитными слоями.

В работе проведено сравнение характеристик транзисторных структур с защитным сильнолегированным слоем нитрида галлия и без него. Показано улучшение характеристик при использовании n^+ -слоя за счет уменьшения контактного сопротивления и сопротивления канала. Получены значения плотности тока — 380 мА/мм, крутизны — 143 мСм/мм и плотности выходной мощности на уровне 5 Вт/мм.

1. Балакирев А., Туркин А. Перспективы нитрида галлия в СВЧ-электронике. Решения компании RFHIC // Электроника: наука, технология, бизнес. 2015. № 4(144). С.64-68.
2. Туркин А.Н. Гетероструктуры на основе GaN в СВЧ-электронике: обзор работ // Электроника: наука, технология, бизнес. 2018. № 6. С.1-4.
3. Боднар Д. Нитрид галлия – премьер среди новых материалов полупроводниковой микроэлектроники // Компоненты и технологии. 2018. №4. С.134-137.
4. Павлов А.Ю., Гамкрелидзе С.А., Томош К.Н. и др. Технология изготовления взаимодополняющих транзисторов на нитриде галлия // Проблемы разработки перспективных микро- и наносистем. 2018. №3. С.69-74. DOI: <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2018-3-69-74>
5. Wang W.K., Lin P.-C., Lin C.-H. et al. Performance enhancement by using the n^+ /GaIn cap layer and gate recess technology on the AlGaIn-GaN HEMT fabrication //

IEEE Electron device letter. 2005. Vol.26. №1. P.5-7. DOI: <https://doi.org/10.1109/LED.2004.840395>

6. Zhelannov A.V., Seleznev B.I. Improvements in the performance of the n^+ cap-layer GaN in the formation of transistor structures based on AlGaIn/GaN // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol.441. Article number: 012065.
7. Heikman S., Keller S., Y.Wu et al. Polarization effects in AlGaIn/GaN and GaN/AlGaIn/GaN heterostructures // J. Appl. Phys. 2003. Vol.93. P.10114-10118. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1577222>
8. Желаннов А.В., Ионов А.С., Петров А.В., Селезнев Б.И. Использование технологии микропрофилирования при формировании приборных структур на основе нитрида галлия // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т.19. №7. С.399-405. DOI: <https://doi.org/10.17587/nmst.19.399-405>
9. Reeves G.K., Harrison H.B. Obtaining the specific contact resistance from transmission line model measurements // IEEE Electron Device Letters. 1982. Vol.3. №5. P.111-113. DOI: 10.1109/EDL.1982.25502

References

1. Balakirev A., Turkin A. Perspektivy nitrída galliya v SVCh-elektronike. Resheniya kompanii RFHIC [GaN Prospects for Microwave Electronics. RFHIC's Solution]. Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes, 2015, no.4, pp.64-68.
2. Turkin A.N. Geterostruktury na osnove GaN v SVCh elektronike: obzor rabot [GaN heterostructures in microwave electronics: scientific papers review]. Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes, 2018, no.6, pp.70-73.
3. Bodnar' D. Nitrid galliya – prem'er sredi novykh materialov poluprovodnikovoy mikroelektroniki [Gallium nitride is a leader among new materials for semiconductor microelectronics]. Komponenty i tekhnologii, 2018, no.4, pp.134-137.
4. Pavlov A.Yu., Gamkrelidze S.A., Tomosh K.N., et al. Tekhnologiya izgotovleniya vzaimodopolnyayushchikh tranzistorov na nitrída galliya [The Technology of Manufacturing of Complementary Transistors on Gallium Nitride]. Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanosistem, 2018, no.3, pp.69-74. DOI: <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2018-3-69-74>
5. Wang W.K., Lin P.-C., Lin C.-H., et al. Performance enhancement by using the n^+ /GaIn cap layer and gate recess technology on the AlGaIn-GaN HEMT fabrication. IEEE Electron device letter, 2005, vol.26, no.1, pp.5-7. DOI: <https://doi.org/10.1109/LED.2004.840395>
6. Zhelannov A.V., Seleznev B.I. Improvements in the performance of the n^+ cap-layer GaN in the formation of transistor structures based on AlGaIn/GaN. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018, vol.441, article #: 012065.
7. Heikman S., Keller S., Y.Wu, et al. Polarization effects in AlGaIn/GaN and GaN/AlGaIn/GaN heterostructures. J. Appl. Phys., 2003, vol.93, pp.10114-10118. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1577222>
8. Zhelannov A.V., Ionov A.S., Petrov A.V., Seleznev B.I. Ispol'zovanie tekhnologii mikroprofilirovaniya pri formirovani pribornykh struktur na osnove nitrída galliya [Micro-profiling Technique Use in Gallium Nitride Based Device Structure Formation]. Nano- i miksistemnaya tekhnika, 2017, vol.19, no.7, pp.399-405. DOI: <https://doi.org/10.17587/nmst.19.399-405>

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОСМОС В ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ

Ю.В.Килиба, В.А.Киселев, Р.В.Петров, А.С.Татаренко

ELECTROOSMOSIS IN HEAT PIPES

Yu.V.Kiliba, V.A.Kiselev, R.V.Petrov, A.S.Tatarenko

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Yury.Kiliba@novsu.ru

Приведен обзор исследований электрического осмоса в пористых и капиллярных структурах. Рассмотрены методы моделирования электроосмотического потока и влияние на него параметров пористых структур. Также проведен анализ влияния на электроосмотический поток магнитного поля и комбинации полей — магнитного и электрического. Рассмотрен пример реализации электроосмотического насоса в системе жидкостного охлаждения, который указывает на перспективность его применения в таких системах, его надежность и технологичность. Однако отсутствие на текущий момент примеров практической реализации электроосмотического насоса в тепловых трубах делает актуальным исследование в этом направлении, что позволит создать новые типы тепловых труб с возможностью их эксплуатации в любом положении в пространстве.

Ключевые слова: осмос, тепловая труба, капиллярный напор, тепловой режим

Для цитирования: Килиба Ю.В., Киселев В.А., Петров Р.В., Татаренко А.С. Электрический осмос в тепловых трубах // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С. 27-30. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).27-30](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).27-30)

In this article, we reviewed the studies of electric osmosis in porous and capillary structures. We have considered methods for modeling electroosmotic flow and the effect of porous structure parameters on it. We also analyzed the effect of a magnetic field and a combination of fields — magnetic and electric — on the electroosmotic flow. We considered an example of the implementation of an electroosmotic pump in a liquid cooling system, which indicates the prospects of its use in such systems, its reliability and manufacturability. However, there is currently no example of practical implementation of an electroosmotic pump in heat pipes. The lack of practical samples makes research in this direction urgent. Our work will allow us to create new types of heat pipes with the ability to operate them in any position in space.

Keywords: osmosis, heat pipe, capillary head, termal mode

For citation: Kiliba Yu.V., Kiselev V.A., Petrov R.V., Tatarenko A.S. Electric osmosis in heat pipes // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P. 27-30. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).27-30](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).27-30)

Введение

Системы, управляемые электроосмотическим потоком (ЭОП), используются в различных областях техники и технологий, таких как биомедицина, геофизика, энергетика и химия. Электрокинетические эффекты широко используются в микро и наножидкостях. Наиболее распространенные применения включают перекачивание [1-3], капиллярную электрохроматографию [4], осушение и регенерацию осушающих структур [5]. Электроосмотический поток имеет много полезных характеристик, включая поршневой поток, который представляет собой простую модель профиля скорости жидкости, отсутствие движущихся частей, простоту реализации и эксплуатации, а также высокую повторяемость и надежность. Соответственно, ЭОП нашел широкое распространение в микрожидкостных полях для таких приложений, как химический или биологический анализ, доставка лекарств, гибридизация ДНК и т. д. Ранние исследования ЭОП были сосредоточены на переносе ньютоновских жидкостей. Однако во многих микрогидравлических системах рабочие жидкости фактически неньютоновские. Таким образом, при разработке эффективных электроосмотических систем важно досконально изучить фундаментальные характери-

стики неньютоновских жидкостей с электрокинетическим приводом. Проблема электрокинетического потока неньютоновской жидкости привлекает все большее внимание в последние годы.

Обзор результатов исследований

ЭОП в микро- и наносистемах с пористыми средами и без них изучался как экспериментально, так и численно многими исследователями, а также рассматривалось поведение неньютоновских жидкостей при ЭОП [6]. Из-за размеров микроканалов получение экспериментальных данных затруднено, и поэтому для прогнозирования ЭОП применяются методы численного моделирования [7,8]. Как было установлено в [5] и [9], внутренний потенциал для плоской поверхности возможно описать уравнением Пуассона, которое может быть линеаризовано для малых значений электрического потенциала с помощью приближения Дебая—Хюккеля [10]. При численном моделировании ЭОП в пористых средах обычно предполагались другие упрощающие гипотезы. Большинство авторов рассматривали только заряд стенок канала, пренебрегая зарядом твердых частиц [11], как в уравнении, определяющем внутренний потенциал, так и в уравнении, описывающем поток жидкости.

Часть исследователей попыталась оценить вклад твердых частиц в ЭОП. Некоторые авторы проанализировали ЭОП на уровне пор [6-8], в то время как другие использовали обобщенную модель потока пористой среды и добавили в уравнение импульса истоковую составляющую, зависящую от плотности заряда пористой среды и приложенного электрического поля [11,12]. Было обнаружено, что основная движущая сила обусловлена заряженными частицами, а не стенками канала [8], и показано, что уравнение внутреннего потенциала не было соответствующим образом модифицировано для учета заряда твердых частиц, за исключением граничных условий [12]. Чтобы учесть заряд как твердых частиц, так и стенок канала [13], скорость разделили на две составляющие, а затем соединили их, чтобы получить общую макроскопическую скорость ЭОП. Первый компонент был получен в соответствии с потоком жидкости в стандартных каналах путем ассимиляции пористой среды в совокупности параллельных извилистых цилиндров. Второй компонент был получен путем применения расширения Бринкмана уравнения Дарси, в котором члены инерции не учитывались из-за низкого числа Рейнольдса. Было обнаружено, что безразмерная скорость Дарси возрастает с увеличением размера частиц, приложенного электрического поля и разницы между дзета потенциалом частиц и стенок канала, и уменьшается с увеличением ширины канала.

Многие авторы сосредоточились на пористых насосах с электрическим осмосом и обнаружили, что термодинамический КПД значительно увеличивается с добавлением пористой среды в канал, поскольку таким образом может быть создано гораздо более высокое давление накачки [8]. В целом, было выявлено, что скорость возрастает с увеличением диаметра твердых частиц или пор [1,3,13,14] и пористости [3,12,15]. Хотя ЭОП может быть увеличен за счет расширения поверхности контакта между электролитом и границами заряженных частиц, чрезмерное уменьшение пустот между частицами [13] может существенно увеличить вязкие потери [1]. Такие потери могут легко повлиять на давление, создаваемое пористым зарядом [3].

Попытки найти оптимальное значение пористости продемонстрировали, что по мере возрастания плотности пор и уменьшения их диаметра увеличиваются как скорость потока, так и характеристики давления насосов с пористой мембраной. В [16] и [17] показано, что перекачка жидкости может быть улучшена в случае, когда слои, прилегающие к твердой стенке насоса, имеют более высокую пористость по сравнению с центральной областью. В этом случае скорость у стенок больше, и поэтому нельзя пренебрегать изменением пористости у стенки [3,6]. В [6] исследовано влияние структуры пористой среды на проницаемость, которая связывает среднюю скорость жидкости с внешним электрическим полем, и выявлено, что проницаемость монотонно растет с увеличением пористости.

ЭОП в пористых средах моделировался с использованием микроскопического подхода во многих

исследованиях. Было обнаружено, что геометрия, используемая для аппроксимации морфологии пористой среды, значительно влияет на прогноз объемной скорости потока, которая, как наблюдалось, была больше в цилиндрических и кольцевых капиллярах, чем в прямоугольных каналах [18]. Морфология пористой среды также была исследована в [19], где проведен анализ проницаемости ЭОП, полученной с использованием гранулированных, волокнистых или сетевых структур. Показано, что при низкой пористости увеличивается проницаемость ЭОП из-за его самого высокого отношения поверхность / объем, тогда как при более высоких значениях пористости зернистая структура работает лучше из-за ее более низкого сопротивления потоку. Из анализа доступной научной литературы по теме ЭОП в пористых средах следует, что работы по этой теме довольно разнородны по своей природе [20]. Несмотря на все попытки, многие фундаментальные аспекты все еще остаются неясными.

Современными исследователями изучается процесс теплопереноса при комбинированном срабатывании под давлением и электроосмосом в устройствах микромасштаба, включая термически развитые потоки и термически развивающиеся потоки. Благодаря минимизированным устройствам микромасштаба вязкая диссипация, в отличие от устройств макромасштаба, больше не может быть тривиально исключена из анализа тепловых характеристик микромасштаба. Более того, эффекты джоулева нагрева также сыграли очень важную роль в анализе обработки теплопередачи, относящейся к микромасштабным электроосмотическим потокам.

В последнее время комбинированный механизм, приводимый в действие электрическим и магнитным полями, широко используется для анализа транспортных характеристик микрожидкостных устройств из-за его многочисленных преимуществ, таких как простота изготовления, отсутствие движущихся частей и низкое рабочее напряжение. Электромагнитная гидродинамика описывает поток жидкости под действием наложенных электрических и магнитных полей, которые могут индуцировать силу Лоренца, толкающую поток жидкости. Средние скорости потока микрожидкостных устройств для перекачивания жидкостей могут быть увеличены за счет реализации электромагнитных гидродинамических (ЭМГД) потоков, особенно в магнитном поле малой величины. Следовательно, микронасос ЭМГД, который в основном приводится в действие силой Лоренца, широко используется в биологических и химических областях для управления потоком жидкости. Исследования характеристик движения с помощью микрожидкостных устройств в присутствии электрического и магнитного полей приобрели широкую популярность. В [21] представлен микронасос переменного тока, в котором раствор электролита приводится в действие силой Лоренца. Впоследствии было сообщено о микрожидкостном переключателе, который приводится в движение электромагнитной силой, и поток электролитического раствора может быть перемещен в микрожидкостном контуре Y-образной

формы. Упрощенная двумерная полностью разработанная МГД-модель течения была численно исследована методом конечных разностей. Результаты показали, что на скорость жидкости сильно влияет сила Лоренца, вызванная взаимодействием между электрическим и магнитным полями.

Исследования проводились только на гладких микроканалах, но на практике на поверхности стенки микроканала всегда существует технологическая шероховатость, и жидкость течет под однородным электрическим и магнитным полями по шероховатой стенке. Кроме того, были достигнуты более интересные явления переноса микропотоков, вызванные использованием пространственно неоднородного магнитного поля. В [22] получена приблизительная аналитическая скорость ЭМГД через микропараллельный канал, на который действует пространственно изменяющееся неоднородное магнитное поле. Скорости потока сравниваются с численными решениями, полученными методом спектральной коллокации Чебышева. Явления переноса потока жидкости через микропараллельный канал с учетом взаимодействия между двойным электрическим слоем (ДЭС) и наложенными электрическими и магнитными полями изучались в [23].

В [24] исследовалось ЭМГД течение и теплопередача неньютоновской жидкости с учетом эффектов вязкой диссипации и подробно рассмотрены тенденции изменения числа Нуссельта в зависимости от магнитного поля. Эффекты двойного электрического слоя можно учесть при анализе течения ЭМГД. В этом случае механизмы срабатывания потока включают в себя электроосмотическую телесную силу, возникающую в результате эффектов ДЭС, и силу Лоренца, индуцированную взаимодействием между электрическим и магнитным полями.

В практических приложениях ЭМГД характеристики теплопередачи для всех основных аспектов физики на микромасштабе должны подвергаться дальнейшему углубленному изучению с целью разработки эффективных электромагнитных устройств, особенно устройств управления температурой.

Известны практически реализованные электроосмотические насосы, использующиеся в системах охлаждения с принудительной циркуляцией охлаждающей жидкости [25,26]. Электроосмотический насос диаметром 30 мм и толщиной 2 мм обеспечивал перекачку рабочей жидкости 20 мл/мин при напряженности электрического поля на пористой структуре 60 В/мм и развивал давление 0,2 бар при напряжении 100 В, при этом движущиеся детали в системе перекачки жидкости отсутствовали. В качестве рабочей жидкости использовался водный раствор $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$.

Заключение

В литературе отсутствуют упоминания о применении электроосмоса в тепловых трубах, которые уже содержат в своем составе все необходимые элементы — пористый фитиль и рабочую жидкость для создания электроосмотического насоса. Модернизация тепловых труб путем встраивания в них электро-

осмотического насоса позволит избавиться от их основного недостатка — зависимости теплопередачи от положения в пространстве.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-42-530001 p_a.

1. Berrouche Y., Avenas Y., Schaeffer C., et al. Design of a porous electroosmotic pump used in power electronic cooling. *IEEE Trans Ind Appl*, 2009, vol.45(6), pp.2073–2079.
2. Arnold A.K. Numerical modelling of electroosmotic flow through micro-channels. Ph.D. Thesis, 2007, Swansea University.
3. Chai Z., Guo Z., Shi B. Study of electroosmotic flows in microchannels packed with variable porosity media via lattice Boltzmann method. *J Appl Phys*, 2009, vol.101(10), pp.104, 913.
4. Liapis A.I., Grimes B.A. Modeling the velocity field of the electroosmotic flow in charged capillaries and in capillary columns packed with charged particles: interstitial and intraparticle velocities in capillary electrochromatography systems. *J Chromatogr A*, 2000, vol.877(1), pp.181–215.
5. Chapman D.L. Li. A contribution to the theory of electrocapillarity. *London Edinb Dublin Philos Mag J Sci*, 1913, vol. 25(148), pp.475–481.
6. Chen S., He X., Bertola V., et al. Electro-osmosis of non-Newtonian fluids in porous media using lattice Poisson–Boltzmann method. *J Colloid Interface Sci*, 2014, vol.436, pp.186–193.
7. Li B., Zhou W., Yan Y., Han Z., Ren L. Numerical modelling of electroosmotic driven flow in nanoporous media by Lattice Boltzmann method. *J Bionic Eng*, 2013, vol.10(1), pp.90–99.
8. Wang M., Wang J., Chen S., et al. Electrokinetic pumping effects of charged porous media in microchannels using the Lattice Poisson–Boltzmann method. *J Colloid Interface Sci*, 2006, vol.304(1), pp.246–253.
9. Gouy M. Sur la constitution de la charge electrique a la surface d'un electrolyte. *J Phys Theor Appl*, 1910, vol. 9(1), pp.457–468.
10. Patankar N.A., Hu H.H. Numerical simulation of electroosmotic flow. *Anal Chem*, 1998, vol.70(9), pp.1870–1881.
11. Scales N. Modelling electroosmotic and pressure-driven flow in porous media for microfluidic applications. Ph.D. Thesis, 2004, Ottawa, Carleton University.
12. Tang G., Ye P., Tao W. Pressure-driven and electroosmotic non-Newtonian flows through microporous media via Lattice Boltzmann method. *J Non-Newton Fluid Mech*, 2010, vol.165(21), pp.1536–1542.
13. Kang Y., Yang C., Huang X. Analysis of electroosmotic flow in a microchannel packed with microspheres. *Microfluid and Nanofluidics*, 2005, vol.1(2), pp.168–176.
14. Chen Y.F., Li M.C., Hu Y.H. et al. Low-voltage electroosmotic pumping using porous anodic alumina membranes. *Microfluid and Nanofluidics*, 2008, v.5(2), p.235–244.
15. Kang Y., Tan S.C., Yang C., et al. Electrokinetic pumping using packed microcapillary. *Sens Actuators A Phys*, 2007, vol.133(2), pp.375–382.
16. Yao S., Myers A.M., Posner J.D., et al. Electroosmotic pumps fabricated from porous silicon membranes. *J Micro Electro Mech Syst*, 2006, vol.15(3), pp.717–728.
17. Cheema T., Kim K., Kwak M., et al. Numerical investigation on electroosmotic flow in a porous channel. In: *The 1st IEEE/IAE international conference on intelligent systems and image processing*, 2013, (ICISIP2013), pp.79–82.
18. Pascal J., Oyanader M., Arce P (2012) Effect of capillary geometry on predicting electroosmotic volumetric flowrates in porous or fibrous media. *J Colloid Interface Sci*, vol.378(1), pp.241–250.
19. Wang M. Structure effects on electro-osmosis in microporous media. *J Heat Transf*, 2012, vol.134(5), pp.051,020.
20. Di Fraia S., Massarotti N., Nithiarasu P. Modelling electroosmotic flow in porous media: a review. *International*

- Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, vol.28, is. 2, pp.472 – 497.
21. Lemoff A.V., Lee A.P. An AC magnetohydrodynamic microfluidic switch for micro total analysis systems, Biomed. Microdevices. Biomedical Microdevices, 2003, v.5, p.55–60.
 22. Jian Y.J., J. Su, Chang L., et al. Transient electroosmotic flow of general Maxwell fluids through a slit microchannel. Z. Angew. Math. Phys., 2014, vol.65, pp.435–447. DOI: 10.1007/s00033-013-0341-1
 23. Chakraborty S. Analytical solutions of Nusselt number for thermally fully developed flow in microtubes under a combined action of electroosmotic forces and imposed pressure gradients. Int. J. Heat Mass Transf., 2006, vol.49, pp. 810–813.
 24. Wang P.J., Chang C.Y., Chang M.L. Simulation of two-dimensional fully developed laminar flow for a magneto-hydrodynamic (MHD) pump. Biosens. Bioelectron., 2004, vol.20, pp.115–121.
 25. Yao S., Huber D.D., Mikkelsen J., et al. “A Large Flowrate Electroosmotic Pump with Micron Pores”. The International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Sixth Micro-Fluidic Symposium, IMECE2001/MEMS-23890, New York, New York, 2001.
 26. Koo, J., Jiang, L., Bari, A., Zhang, L., Wang, E., Kenny, T.W., Santiago, J.G., Goodson, K.E., “Convective Boiling in Microchannel Heat Sinks with Spatially-Varying Heat Flux”, ITherm 2002, San Diego, CA, USA, May, 2002, p.341-346.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МЕТГЛАС/GaAs/METGLAS ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ИСТОЧНИКАХ ЭНЕРГИИ

Е.В.Кузьмин, В.С.Леонтьев, А.Р.Петрова*, Л.А.Немцев, Р.В.Петров

INVESTIGATION OF THE MAGNETOELECTRIC STRUCTURE OF METGLAS/GaAs/METGLAS FOR USE IN ENERGY SOURCES

E.V.Kuzmin, V.S.Leontiev, A.R.Petrova*, L.A.Nemtsev, R.V.Petrov

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, 777774444@mail.ru

*Московский авиационный институт, a.r.petrova@yandex.ru

Представлены результаты исследований магнитоэлектрических композитных структур на основе GaAs [100]. Экспериментально были исследованы магнитоэлектрические структуры Метглас/GaAs/Метглас с различными ориентациями в плоскости пластины (11-1), (1-10), (101), размеры пластин: 20×5×0,625 мм. Полученные результаты подтверждают первоначальные теоретические расчеты наблюдения максимального магнитоэлектрического эффекта в плоскости пластины GaAs [100]. Приведены графики зависимости выходного сигнала от частоты и зависимости выходного сигнала от угла плоскости пластины GaAs [100]. Максимальный магнитоэлектрический коэффициент по напряжению наблюдался в плоскости пластины GaAs (11-1) и составил $\alpha_{ME} = 17,41$ В/(см·Э) на частоте $f_{рез} = 479,6$ кГц. В заключительной части статьи обсуждаются перспективы возможного практического применения данных магнитоэлектрических структур для источников энергии.

Ключевые слова: магнитоэлектрическая структура, источник энергии, харвестер

Для цитирования: Кузьмин Е.В., Леонтьев В.С., Петрова А.Р., Немцев Л.А., Петров Р.В. Исследование магнитоэлектрической структуры Метглас/GaAs/Метглас для применения в источниках энергии // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С.31-35. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).31-35](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).31-35)

This article presents the results of studies of magnetoelectric composite structures based on GaAs [100]. Magnetoelectric structures of Metglas/GaAs/Metglas with different orientations in the plate plane were studied experimentally (11-1), (1-10), (101), plate dimensions: 20×5×0.625 mm. The obtained results show in which axes in the plane of the GaAs plate [100] the maximum magnetoelectric effect is observed. Graphs of the frequency dependence of the output signal and the dependence of the output signal on the angle of the GaAs plate plane are given [100]. The maximum voltage magnetoelectric coefficient is observed in the plane of the GaAs plate (11-1) and is $\alpha_{ME} = 17.41$ V/(cm·Oe) at the frequency $f_{res} = 479.6$ kHz. The final part of the article discusses the prospects for the possible practical application of these magnetoelectric structures for energy sources.

Keywords: magnetoelectric structure, energy source, harvester

For citation: Kuzmin E.V., Leontiev V.S., Petrova A.R., Nemtsev L.A., Petrov R.V. Investigation of the magnetoelectric structure of Metglas/GaAs/Metglas for use in energy sources // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.31-35. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).31-35](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).31-35)

Введение

Современный прогресс в науке и технике неразрывно связан с развитием научных знаний в области композиционных материалов. Важное место среди известных функциональных композиционных материалов занимают магнитострикционно-пьезоэлектрические материалы, уникальные свойства которых обусловлены существованием в них магнитоэлектрического (МЭ) эффекта. В таких материалах величина МЭ коэффициентов на несколько порядков превышает их значение в однофазных МЭ материалах, благодаря чему возможно широкое практическое применение МЭ эффекта. Для оптимизации МЭ параметров актуальной задачей является изучение взаимосвязи магнитных, электрических и МЭ свойств таких структур. К настоящему времени теоретически и экспериментально исследовано большое число магнитострикционно-пьезоэлектрических композитов на основе металлических ферромагнетиков, ферритов и различного типа пьезокерамик. Необходимость проведения таких исследований происходит из потреб-

ностей современной техники мобильной связи, интернет-коммуникаций, телевидения и радиовещания, радионавигационного оборудования и другой электронной техники в устройствах на основе новых функциональных материалов. Значительное число работ посвящено исследованиям новых МЭ материалов, в том числе мультиферроидным материалам [1]. Мультиферроидные материалы — материалы, в которых сосуществуют одновременно два и более типа «ферро» упорядочения: ферромагнитное (англ. ferromagnetic), сегнетоэлектрическое (англ. ferroelectric) и сегнетоэластичность (англ. ferroelastic) имеют широкие перспективы для применения в системах сбора энергии [2-3].

Миниатюризация и уменьшение энергопотребления привели к популярности систем сбора энергии, которые могут преобразовывать энергию окружающей среды, чтобы поддержать требования к питанию в интегральных схемах датчиков и исполнительных механизмов (рис.1). Энергия в природе может принимать различные формы, в том числе света, тепла, радиоволн, вибраций и колебаний.

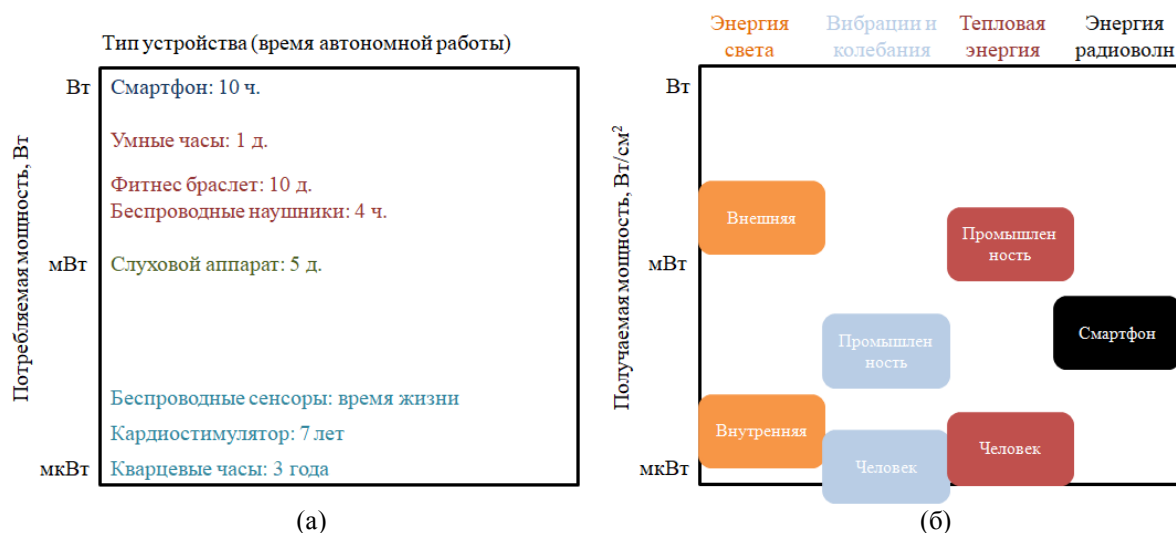


Рис.1. Сравнительные характеристики: а) различные устройства и их потребляемая мощность; б) полученная энергия из различных источников окружающей среды

Целью настоящей статьи является исследование МЭ структуры Метглас/GaAs/Метглас для практического применения в источниках энергии. Использование МЭ структуры Метглас/GaAs/Метглас как источника энергии позволит повысить энергоэффективность существующих устройств. Источники энергии, или, иначе, харвестеры, вызывают все больший интерес у научно-инженерного сообщества в последние несколько лет, и количество работ по данной тематике растет с каждым годом.

Исследуемые структуры

В данной работе исследовались слоистые структуры, состоящие из пьезоэлектрического материала GaAs [100] с размерами $20 \times 5 \times 0,625$ мм и вырезанные в различных осях плоскости пластины (рис.2), и обкладок Метгласа (аморфный магнитомягкий сплав), которые одновременно служат электродами. В исследовании были использованы пластины GaAs производства Xiamen Compound Semiconductor Wafers китайского производства, и сплав Метглас AMAG 492 ПАО «МСТАТОР» производства России.

Резка проводилась на установке дисковой резки ADT 7122 алмазным диском толщиной 20 мкм со скоростью 2 мм/с при 40 оборотах диска в секунду.

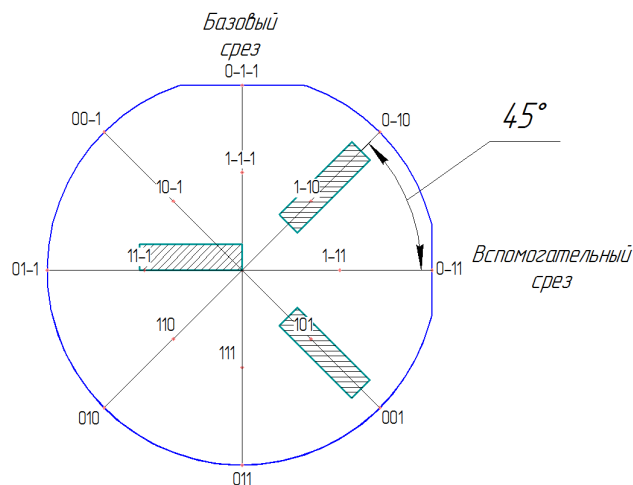


Рис.2. Расположение осей плоскости пластины GaAs с нанесенными проекциями исследуемых образцов

На рис.3 представлена торцевая часть полученного образца, сфотографированная на инспекционном микроскопе Carl Zeiss Jena (inspection JENATECH). Данный рез получился качественным, так как отсутствуют сколы, трещины и поры.

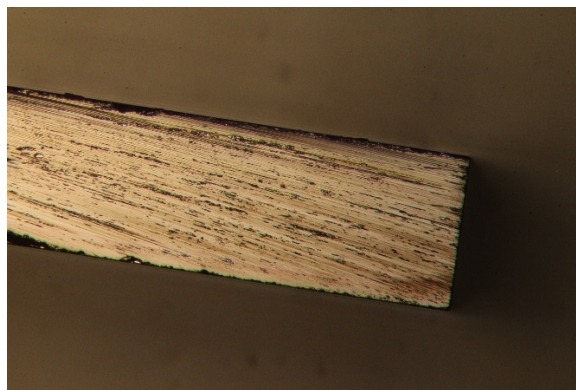
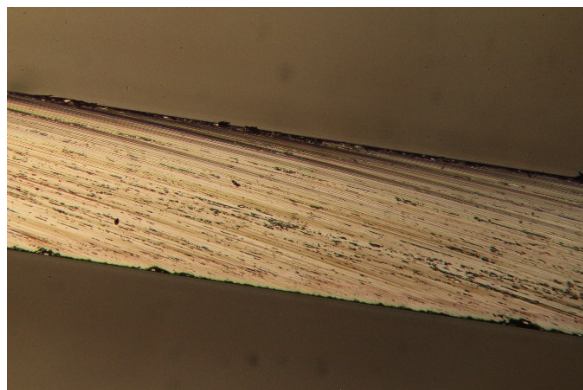


Рис.3. Торцевая часть образца под увеличением

Измерение толщины полученных исследуемых пластин проводилось с помощью цифрового микрометра Mitutoyo на измерительной плите Planolith D-63741. Все пластины пьезоэлектрического материала GaAs имеют толщину 625 мкм.

Конструкция исследуемых МЭ элементов Метглас/GaAs/Метглас приведена на рис.4. Пластины Метгласа соединялись с пластиной GaAs посредством клея марки БФ-2 производителя АО «АНЛЕС», толщина клеевого слоя не превышает 1 мкм. С каждой стороны образца приклеены по 3 пластины Метгласа (рис.4), внешняя пластина на 5 мм длиннее, для пайки выводов.

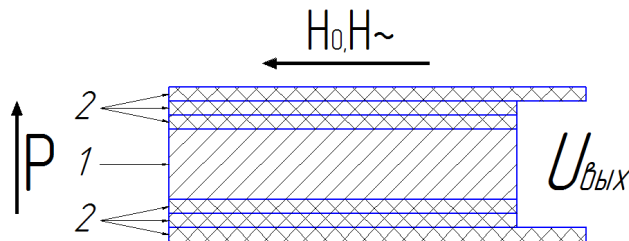


Рис.4. Конструкция исследуемых магнитоэлектрических элементов Метглас/GaAs/Метглас: 1 — пластина GaAs, 2 — пластины Метгласа

Стрелками указано направление постоянного и переменного магнитных полей и направление поляризации.

Измерительный стенд

Измерения проводились на измерительном стенде (рис.5), включающем в себя генератор сигналов Nameg HMF2550, постоянный магнит, катушку индуктивности, осциллограф Nameg HMO722 и магнитометр. Стенд работает следующим образом: на соленоид подается сигнал генератора, который производит переменное магнитное поле $H_{\sim}$ величиной около 1 Э. Далее, постоянным магнитом создается постоянное магнитное поле, которое составляет око-

ло 30 Э. В результате воздействия постоянного и переменного поля вследствие поперечного МЭ эффекта на обкладках МЭ элемента индуцируется электрический сигнал, который фиксируется осциллографом.

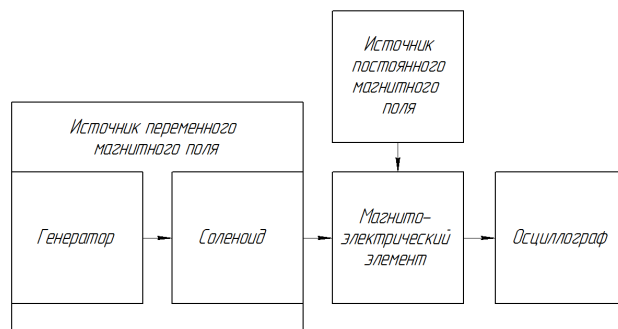


Рис.5. Структурная схема измерительного стенда

Измеренные значения МЭ коэффициента по напряжению показаны на рис.6.

Результаты измерений

Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены следующие МЭ слоистые структуры — Метглас/GaAs/Метглас с размерами $20 \times 5 \times 0,625$ мм. Измерения проводились по ранее отработанной методике измерения МЭ эффекта [4] на измерительном стенде (рис.5). Экспериментальные образцы помещались в катушку индуктивности, далее подавалось поле смещения при помощи постоянного магнита, в результате воздействия постоянного и переменного магнитных полей на композитную структуру наблюдался прямой МЭ эффект. Затем отклик выходного сигнала фиксировался осциллографом. Исследуемые образцы были свободно расположены внутри измерительного стенда.

Был найден МЭ коэффициент по напряжению как функция частоты приложенного магнитного поля. Он определялся путем измерения напряжения, наве-

Ориентация в плоскости (11-1)

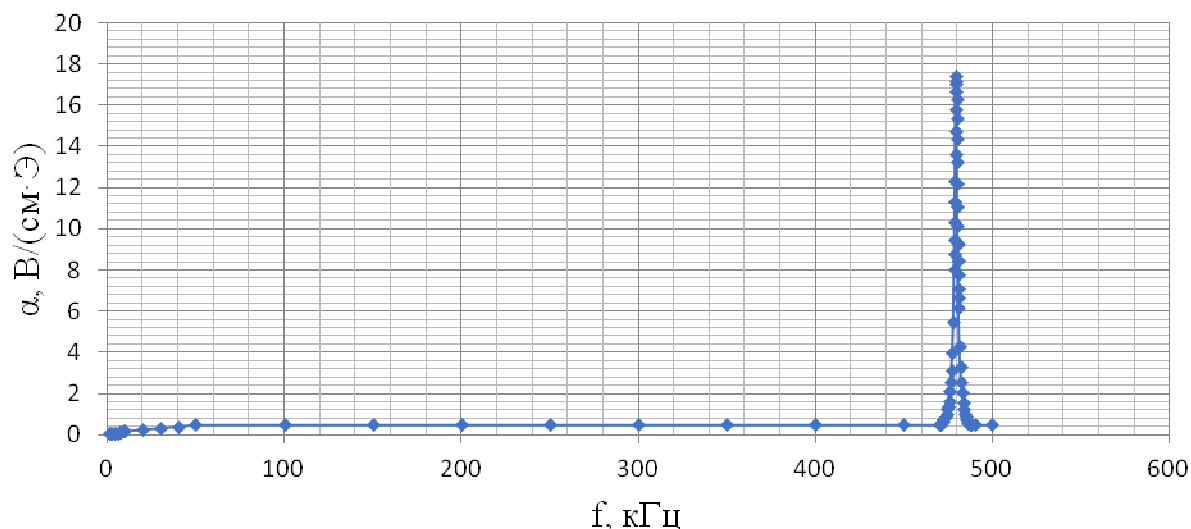


Рис.6. График зависимости МЭ коэффициента от частоты в структуре Метглас/GaAs/Метглас

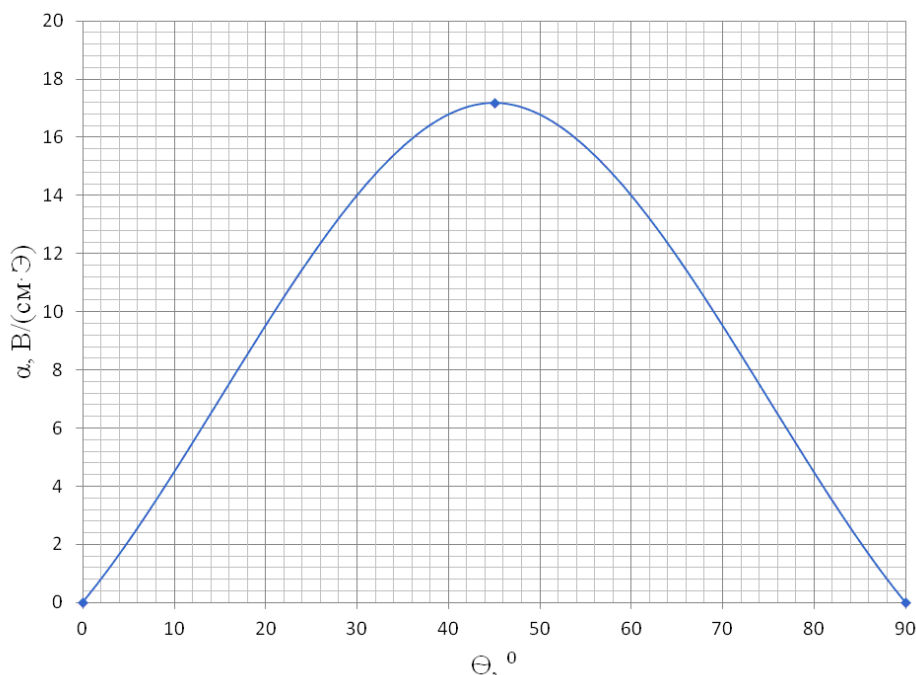


Рис.7. Изменение пикового МЭ коэффициента в зависимости от угла между направлением длины образца на частоте ЭМР

денного на пьезоэлектрический слой. Измерения проводились при подмагничивающем поле, соответствующем максимальному пьезомагнитному коэффициенту.

Для структуры Метглас/GaAs/Метглас поле смещения составляло около 30 Э. Чтобы уменьшить влияние эффекта размагничивания, к образцу прикладывались в плоскости переменные и постоянные магнитные поля. Переменное магнитное поле величиной 1 Э создавалось катушками Гельмгольца, а подмагничивающее поле — электромагнитом. Измеренные значения МЭ коэффициента напряжения для структуры Метглас/GaAs/Метглас показаны на рис. 6 и 7.

Учитывая тот факт, что большинство МЭ систем сбора энергии работают в масштабе от микроватт до милливатт, наиболее распространенным применением МЭ элементов в устройствах сбора энергии может являться обеспечение энергией маломощной электроники, включая имплантируемые биомедицинские устройства, узлы беспроводных датчиков, встроенную и портативную электронику. Устройства сбора энергии (харвестеры) либо источники энергии на основе МЭ материалов могут обеспечить постоянный автономный поток энергии, который не требует замены или обслуживания. Количественная оценка использования харвестеров на магнитоэлектрическом материале GaAs измеряется в пределах от 1 до 10 мВт. По сравнению с традиционными источниками энергии, такими как батареи, автономная работа может снизить затраты, связанные с заменой батарей. Кроме того, автономные источники энергии позволяют встраивать электронные устройства в конструкции или размещать их в удаленных местах. В связи с развитием маломощной электроники (например, беспроводных датчиков, МЭМС) устройства сбора энергии на основе МЭ

структур привлекают значительное внимание исследовательского сообщества для исследований и практических применений.

Заключение

В данной работе рассматривается МЭ эффект в слоистой структуре на основе аморфного магнитоэлектрического сплава и монокристаллического арсенида галлия. Экспериментальные исследования проводились на МЭ слоистых структурах GaAs [100]. Выявлено, что в структуре Метглас/GaAs/Метглас максимальный МЭ эффект наблюдается в плоскости пластины (11-1). Полученные результаты согласуются с ранее разработанной теоретической моделью [5] и могут быть использованы для практического применения, так как монокристаллический арсенид галлия имеет большое значение d/ε , высокие радиационную стойкость и температурную стабильность.

Рассматривая возможность практического применения исследуемых структур, можно выделить одно из перспективных направлений исследований — это устройства сбора энергии на МЭ элементах (ME Energy Harvesting, МЭ источники энергии). Применение МЭ структуры Метглас/GaAs/Метглас в источниках энергии позволит повысить эффективность существующих МЭ устройств сбора энергии и, как следствие, увеличит количество вырабатываемой таким устройством энергии. В дальнейшем планируется оптимизация полученной композитной структуры для улучшения выходных характеристик и разработка прототипа промышленного МЭ устройства сбора энергии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-42-530001 p_a, а также при финансовой поддержке в рамках гранта для молодых ученых НовГУ 2020-2021 гг.

1. Ce-Wen Nan, Bichurin M.I., Shuxiang Dong et al. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions. *J. Appl. Phys.*, 2008, vol.103, p.031101.
2. Bedekar V., Bichurin M.I., Solovjev I. et al. Multimodal Energy Harvesting System. *Proc. SPIE 8035. Energy Harvesting and Storage: Materials, Devices, and Applications II*, 80350T (May 17, 2011).
3. Dong S., Zhai J., Li J. F. et al. Multimodal system for harvesting magnetic and mechanical energy. *APL*, 2008, vol.93, p.103511.
4. Petrov V.M., Bichurin M.I., Lavrentyeva K.V. et al. Enhanced Magnetoelectric Coupling in Layered Structure of Piezoelectric Bimorph and Metallic Alloy. *Journal of Electronic Materials*, 2016, vol. 45, is. 8, pp. 4197–4201. DOI: 10.1007/s11664-016-4628-9
5. Bichurin M.I., Petrov V.M., Leontiev V.S. et al. Magneto-electric effect in layered structures of amorphous ferromagnetic alloy and gallium arsenide. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 424.

ОСОБЕННОСТИ ТВЕРДОРАСТВОРНОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

В.В.Малашенко*****, А.Д.Гладкая****, Т.И.Малашенко*****

SPECIFIC FEATURES OF SOLID SOLUTION HARDENING OF METALS AND ALLOYS UNDER HIGH-STRAIN-RATE DEFORMATION

V.V.Malashenko*****, A.D.Gladkaya****, T.I.Malashenko*****

*Донецкий физико-технический институт им. А.А.Галкина, malashenko@donfti.ru

**Донецкий национальный университет

***Донецкая академия управления и государственной службы

****Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского

*****Донецкий национальный технический университет

Теоретически проанализирована высокоскоростная деформация металлов и сплавов, содержащих легирующие элементы. Получено выражение для вклада легирующих элементов в величину деформирующих напряжений. Твердорастворное упрочнение сплавов линейно возрастает при увеличении скорости пластической деформации. Концентрационная зависимость механических свойств при высокоскоростной деформации существенно отличается от аналогичной зависимости при квазистатической деформации. Это отличие обусловлено действием коллективных динамических эффектов. Концентрационная зависимость упрочнения при высокоскоростной деформации определяется конкуренцией взаимодействия дислокации с легирующими элементами и дислокациями ансамбля. Если доминирует взаимодействие с легирующими элементами, упрочнение увеличивается пропорционально квадратному корню из концентрации. Если преобладает коллективное взаимодействие дислокаций, упрочнение линейно возрастает при увеличении концентрации.

Ключевые слова: дислокации, сплавы, твердорастворное упрочнение, легирующие элементы

Для цитирования: Малашенко В.В., Гладкая А.Д., Малашенко Т.И. Особенности твердорастворного упрочнения металлов и сплавов при высокоскоростной деформации // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С.36-38. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).36-38](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).36-38)

The high strain rate deformation of metals and alloys, containing alloying elements is theoretically analyzed. An expression for the contribution of alloying elements to deforming stresses is obtained. Solid solution hardening of alloys increases linearly with increasing plastic deformation rate. The concentration dependence of the mechanical properties under high-strain-rate deformation differs essentially from the analogous dependence under quasi-static deformation. This difference is due to the action of collective dynamic effects. The concentration dependence of hardening under high-strain-rate deformation is determined by the competition between the interaction of the dislocation with alloying elements and dislocations of the ensemble. If interaction with alloying elements dominates, hardening increases in proportion to the square root of the concentration. If the collective interaction of dislocations predominates, the hardening increases linearly with increasing concentration.

Keywords: dislocations, alloys, solid solution hardening, alloying elements

For citation: Malashenko V.V., Gladkaya A.D., Malashenko T.I. Specific features of solid solution hardening of metals and alloys under high-strain-rate deformation // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.36-38. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).36-38](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).36-38)

Твердорастворное упрочнение металлов и сплавов, реализуемое посредством добавления в расплавы легирующих элементов, является одним из традиционных способов улучшения механических свойств этих функциональных материалов. Механическое поведение сплавов с легирующими добавками при квазистатической деформации изучено детально и основательно, однако в условиях высокоэнергетических воздействий на такие сплавы характер влияния этих добавок на механические свойства претерпевает существенные изменения [1]. Такие воздействия реализуются, в частности, при ковке и штамповке, лазерной и высокоскоростной обработке, динамическом канально-угловом прессовании, сварке взрывом [1-4].

Механические свойства твердых тел, как известно, в значительной степени определяются зарождением, размножением и движением дислокаций — линейных дефектов кристаллической структуры, являющихся основными носителями пластической деформации, а также их взаимодействием с другими структурными несовершенствами твердых тел. Легирующие примеси являются точечными дефектами типа центра дилатации. Их внедрение в сплавы приводит к возникновению дополнительных упругих полей, затрудняющих дислокационное движение, в результате чего происходит твердорастворное упрочнение материала. В случае квазистатической деформации дислокации преодолевают встречающиеся на своем пути препятствия с помощью термических

флуктуаций, поскольку их кинетическая энергия меньше уровня потенциального барьера, создаваемого легирующими элементами. Высокоскоростная деформация характеризуется надбарьерным скольжением дислокаций, которые при этом движутся со скоростями $10\text{--}10^3\text{ м/с}$, а скорость пластической деформации может достигать $10^3\text{--}10^8\text{ с}^{-1}$. Такие процессы чаще всего анализируются методом молекулярной динамики, однако он не позволяет получать аналитические зависимости механических свойств материала от характеристик легирующих примесей, в частности, от их концентрации и параметра несоответствия. Целью настоящей работы является получение аналитических выражений для величины дополнительных деформирующих напряжений сплавов, обусловленных наличием легирующих элементов.

Поставленная задача решается в рамках теории динамического взаимодействия структурных дефектов [5–8], основанной на модифицированной модели Гранато—Люкке, в рамках которой дислокация рассматривается как тяжелая упругая струна. При надбарьерном скольжении дислокации упругие поля, создаваемые атомами легирующих элементов, возбуждают поперечные дислокационные колебания в плоскости скольжения. При этом механизм диссипации заключается в необратимом переходе кинетической энергии поступательного движения дислокации в энергию ее изгибных колебаний. Этот механизм весьма чувствителен к виду спектра дислокационных колебаний, прежде всего к наличию в нем щели Δ

$$\omega^2(p_z) = s^2 p_z^2 + \Delta^2.$$

Здесь s — скорость распространения в кристалле поперечных звуковых волн.

Наличие щели в спектре дислокационных колебаний означает, что дислокация совершает колебания в параболической потенциальной яме. Однако эта яма перемещается по кристаллу вместе с колеблющейся дислокацией. Такая потенциальная яма может быть создана коллективным взаимодействием точечных дефектов и дислокаций ансамбля с каждой движущейся дислокацией [6]. Конкуренция этих взаимодействий определяет конкретный вид зависимости деформирующих напряжений от концентрации легирующего элемента и параметра его несоответствия.

Пусть ансамбль бесконечных краевых дислокаций движется под действием постоянного внешнего напряжения σ_0 в положительном направлении оси OX с постоянной скоростью v в плоскости XOZ в кристалле, содержащем хаотически распределенные атомы легирующего элемента. Линии дислокаций параллельны оси OZ , их векторы Бюргерса $\mathbf{b} = (b, 0, 0)$ одинаковы и параллельны оси OX . Положение k -й дислокации определяется функцией

$$X_k = vt + w_k. \quad (1)$$

Здесь w_k — случайная величина, описывающая изгибные колебания дислокации, возбужденные ее взаимодействием с хаотически распределенными дефектами. Среднее значение этой величины по длине дислокации и по хаотическому распределению дефектов равно нулю.

Уравнение движения дислокации может быть представлено в следующем виде

$$m \left\{ \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} - s^2 \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right\} = b[\sigma_0 + \sigma_{xy}] - B \frac{\partial X}{\partial t}, \quad (2)$$

где σ_{xy} — компонента тензора напряжений, создаваемых легирующими примесями на линии дислокации, m — масса единицы длины дислокации (массы всех дислокаций считаем одинаковыми), B — константа демпфирования, обусловленная фоновыми, магннными или электронными механизмами диссипации.

Как и в работе [6], используем плавное обрезание поля упругих напряжений атома легирующего элемента на расстояниях порядка его радиуса R

$$\sigma_{xy}(\mathbf{r}) = \mu R^3 \chi \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \frac{1 - \exp(-r/R)}{r}. \quad (3)$$

Здесь μ — модуль сдвига, χ — параметр несоответствия атома легирующего элемента, который определяется выражением

$$\chi = \left| \frac{R - R_M}{R_M} \right|, \quad (4)$$

где R_M — радиус атома матрицы. Фурье-образ этой компоненты упругого поля, который необходим для выполнения дальнейших вычислений, имеет вид

$$\sigma_{xy}(\mathbf{p}) = 4\pi\mu R^3 \chi \frac{p_x p_y}{p^2} \frac{R^2}{p^2 + R^2}. \quad (5)$$

Атомы легирующего элемента распределены по кристаллу случайным образом. При выполнении вычислений воспользуемся стандартной процедурой усреднения по хаотическому распределению этих атомов и по длине дислокации.

Основываясь на результатах теории динамического взаимодействия структурных дефектов [6], получим выражение для вклада атомов легирующего элемента в величину деформирующих напряжений в следующем виде

$$\sigma = cK \int_{-\infty}^{\infty} dp_y \int_{\frac{\Delta}{v}}^{\infty} dp_x \frac{p_x |\sigma_{xy}(p_x, p_y, 0)|^2}{\sqrt{p_x^2 - \frac{\Delta^2}{v^2}}}. \quad (6)$$

Здесь c — концентрация легирующего элемента, K — константа, зависящая от упругих свойств кристалла.

Рассмотрим случай, когда плотность дислокаций невысока, и главный вклад в формирование спектральной щели вносит коллективное взаимодействие легирующих примесей с дислокацией. Такая ситуация реализуется при выполнении условия

$$\frac{1}{b^2} \chi \sqrt{c} > \rho. \quad (7)$$

Выполним численные оценки. Для типичных значений $\epsilon = 10^{-1}$, $b = 3 \cdot 10^{-10}\text{ м}$, $c = 10^{-2}$ и плотности дислокаций, не превышающей $\rho = 10^{14}\text{ м}^{-2}$, это условие выполняется. В этом случае уравнение для нахождения спектральной щели имеет вид

$$\Delta^2 = \frac{2cb^2\mu^2\chi^2}{\pi m^2} \iiint d^3p \frac{1}{\Delta^2 + c^2 p_z^2 - p_x^2 v^2} \frac{p_x^4 p_y^2}{p^4} \frac{R^2}{(p^2 + R^2)^2}. \quad (8)$$

Выполняя необходимые вычисления, получаем, что введение легирующих элементов повышает уровень деформирующих напряжений на величину

$$\sigma = \frac{4\pi(1-\gamma)\mu\chi}{\rho bs} \dot{\varepsilon} \sqrt{c}, \quad (9)$$

где $\dot{\varepsilon}$ — скорость пластической деформации, γ — коэффициент Пуассона.

Такая зависимость экспериментально наблюдалась в работе [9].

Если же плотность подвижных дислокаций достигает значений $\rho = 10^{15} \text{ м}^{-2}$ и выше, главный вклад в формирование спектральной щели вносит коллективное взаимодействие дислокаций ансамбля, а сама щель тогда описывается выражением

$$\Delta = \sqrt{\frac{\pi\mu\rho b^2}{6m(1-\gamma)}}. \quad (10)$$

В этом случае величина упрочнения характеризуется линейной зависимостью от концентрации легирующего компонента

$$\sigma = \frac{2(1-\gamma)\chi^2\mu}{\rho^2 b^3 s} \dot{\varepsilon} c. \quad (11)$$

Такая зависимость наблюдалась в экспериментальной работе [10].

Заключение

Из проведенного анализа следует, что при высокоскоростной деформации величина твердорастворного упрочнения линейно возрастает с увеличением скорости пластической деформации, а ее концентрационная зависимость определяется соотношением концентрации легирующего компонента и плотности дислокаций. В случае доминирования коллективного взаимодействия атомов легирующего компонента имеем корневую зависимость, если же формирование спектра колебаний определяется коллективным взаимодействием дислокаций, зависимость от концентрации становится линейной.

Полученные результаты могут быть полезными при определении оптимальной концентрации легирующих добавок в сплавах, изделия из которых в процессе эксплуатации подвергаются высокоэнергетическим воздействиям.

- Малашенко В.В. Зависимость динамического предела текучести бинарных сплавов от плотности дислокаций при высокоэнергетических воздействиях // Физика твердого тела. 2020. Т.62. №10. С.1683-1685. DOI: <https://doi.org/10.21883/FTT.2020.10.49919.075>
- Малашенко В.В. Влияние коллективных эффектов на концентрационную зависимость предела текучести сплавов при высокоэнергетических воздействиях // Письма в ЖТФ. 2020. Т.46. №18. С.39-41. DOI: <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.18.50001.18399>
- Варюхин В.Н., Малашенко В.В. Динамические эффекты в дефектной системе кристалла // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82. №9. С.1213-1218. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0367676518090259>
- Malashenko V.V. Dynamic drag of edge dislocation by circular prismatic loops and point defects // Physica B: Phys. Cond. Mat. 2009. Vol.404. №21. P.3890-3893. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2009.07.122>
- Asay J.R., Fowles G.R., Durall G.E. et al. Effect of point defect on elastic precursor decay in LiF // Journal of Appl. Phys. 1972. Vol.43. №5. P.2132-2145. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1661464>
- Charit I., Seok C.S., Murty K.L. Synergistic effects of interstitial impurities and radiation defects on mechanical characteristics of ferritic steels // Journal of Nuclear Materials. 2007. Vol.361. №2. P.262-273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2006.12.003>

References

- Smith R.F., Eggert J.H., Rudd R.E. et al. High strain-rate plastic flow in Al and Fe. Journal of Applied Physics, 2011, vol.110, iss.12. Article number: 123515. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3670001>
- Lee J., Veysset D., Singer J. et al. High strain rate deformation of layered nanocomposites. Nature Communications, 2012, no.3. Article number: 1164. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms2166>
- Batani D. Matter in extreme conditions produced by lasers. EPL, 2016, vol.114, no.6. Article number: 65001. DOI: <https://doi.org/10.1209/0295-5075/114/65001>
- Tramontina D., Erhart P., Germann T. et al. Molecular dynamics simulations of shock-induced plasticity in tantalum // High Energy Density Physics, 2014, vol.10, no.1, pp.9-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hedp.2013.10.007>
- Malashenko V.V. Zavisimost' dinamicheskogo predela tekuchesti binarnykh spлавov ot plotnosti dislokatsiy pri vysokoenergeticheskikh vozdeystviyakh [Dependence of Dynamic Yield Stress of Binary Alloys on the Dislocation Density under High-Energy Impacts]. Fizika tverdogo tela, 2020, vol. 62, no.10, pp. 1683-1685.
- Malashenko V.V. Vliyaniye kolektivnykh effektiv na kontsentratsionnuyu zavisimost' predela tekuchesti spлавov pri vysokoenergeticheskikh vozdeystviyakh [The Influence of Collective Effects on the Concentration Dependence of the Yield Stress of Alloys under High-Energy Impacts]. Pisma v ZHTF, 2020, vol 46, no.18, pp. 39-41.
- Varyukhin V.N., Malashenko V.V. Dinamicheskiye efekty v defektnoy sisteme kristala [Dynamic Effects in a Defective System of Crystal] Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya, 2018, vol.82, no. 9, pp.37-42.
- Malashenko V.V. Dynamic drag of edge dislocation by circular prismatic loops and point defects. Physica B: Phys. Cond. Mat., 2009, vol.404, no.21, pp.3890-3893. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2009.07.122>
- Asay J.R., Fowles G.R., Durall G.E. et al. Effect of point defect on elastic precursor decay in LiF. Journal of Appl. Phys., 1972, vol.43, no.5, pp.2132-2145. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1661464>
- Charit I., Seok C.S., Murty K.L. Synergistic effects of interstitial impurities and radiation defects on mechanical characteristics of ferritic steels. Journal of Nuclear Materials, 2007, vol.361, no.2, pp.262-273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2006.12.003>
- Smith R.F., Eggert J.H., Rudd R.E. et al. High strain-rate plastic flow in Al and Fe // Journal of Applied Physics. 2011. V.110. Issue 12. Article number: 123515. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3670001>
- Lee J., Veysset D., Singer J. et al. High strain rate deformation of layered nanocomposites // Nature Communications. 2012. №3. Article number: 1164. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms2166>
- Batani D. Matter in extreme conditions produced by lasers // EPL. 2016. V.114. №6. Article number: 65001. DOI: <https://doi.org/10.1209/0295-5075/114/65001>
- Tramontina D., Erhart P., Germann T. et al. Molecular dynamics simulations of shock-induced plasticity in tantalum // High Energy Density Physics. 2014. V.10. №1. P.9-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hedp.2013.10.007>

EXPLORATORY DEVELOPMENT OF THE LONGITUDINAL AND THICKNESS MODES OF THE MAGNETOELECTRIC EFFECT IN A MAGNETOSTRICTIVE-PIEZOELECTRIC TWO-LAYER STRUCTURE METGLAS/SILICON CARBIDE

O.V.Sokolov, S.N.Ivanov, D.A.Petrov, M.I.Bichurin

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ И ТОЛЩИННОЙ МОД МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В МАГНИТОСТРИКЦИОННО-ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДВУХСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЕ МЕТГЛАС/КАРБИД КРЕМНИЯ

О.В.Соколов, С.Н.Иванов, Д.А.Петров, М.И.Бичурин

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, o-v-sokolov@mail.ru

This article presents the results of a study of the longitudinal and thickness modes in the field of electromechanical resonance in a magnetoelectric composite structure. Magnetoelectric structures of the composition Metglas/4H-SiC and Metglas/6H-SiC were theoretically explored. When obtaining theoretical results, the material parameters of the constituent phases of the composite structures were used. The calculated characteristics are compared for two different polytypes of silicon carbide 4H-SiC and 6H-SiC. It was found that the value of the resonance magnetoelectric coefficient in the Metglas/6H-SiC structure is higher than in the Metglas/4H-SiC structure for both the longitudinal and the thickness modes. The results obtained can be used in the future in the design of active semiconductor devices based on the ME effect.

Keywords: magnetoelectric effect, magnetoelectric structure, silicon carbide

For citation: Sokolov O.V., Ivanov S.N., Petrov D.A., Bichurin M.I. Exploratory development of the longitudinal and thickness modes of the magnetoelectric effect in a magnetostriptive-piezoelectric two-layer structure Metglas/silicon carbide // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.39-42. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).39-42](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).39-42)

Представлены результаты исследования продольной и толщинной мод в области электромеханического резонанса в магнитоэлектрической композитной структуре. Были теоретически исследованы магнитоэлектрические структуры состава Метглас / 4H-SiC и Метглас / 6H-SiC. При получении теоретических результатов были использованы материальные параметры составляющих фаз композитных структур. Проведено сравнение расчетных характеристик для двух различных полиморфов карбида кремния 4H-SiC и 6H-SiC. Выяснено, что величина резонансного магнитоэлектрического коэффициента в структуре Метглас / 6H-SiC больше, чем в структуре Метглас / 4H-SiC как для продольной, так и для толщинной моды. Полученные результаты можно использовать в дальнейшем при проектировании активных полупроводниковых устройств, основанных на МЭ эффекте.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, магнитоэлектрическая структура, карбид кремния

Для цитирования: Соколов О.В., Иванов С.Н., Петров Д.А., Бичурин М.И. Исследование продольной и толщинной мод магнитоэлектрического эффекта в магнитоэлектрической двухслойной структуре Метглас/карбид кремния // Вестник Новгород. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С.39-42. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).39-42](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).39-42)

Introduction

The magnetoelectric (ME) effect manifests itself as the induction of electric polarization in a material in a magnetic field or magnetization in an electric field. In magnetostriptive-piezoelectric layered structures, the ME effect is due to the mechanical interaction of the magnetic and electrical subsystems; therefore, in the region of electromechanical resonance (EMR), for example, longitudinal or thickness, a significant increase in the ME coefficient is observed.

Quantitatively, the ME effect is characterized by the ME voltage coefficient α_E , which is equal to the ratio of the intensity of the induced alternating electric field to the intensity of the applied magnetic alternating field under conditions of an open electric circuit. The value of the coefficient is determined by the dimensions of the structure, magnetic, dielectric, piezoelectric and mechanical parameters of its constituent components. In

contrast to single-phase materials, the ME interaction between the piezoelectric and magnetostriptive phases of the composite material leads to large values of the ME coefficients [1-3]. It was found that the values of the ME susceptibility at room temperature are several orders of magnitude higher than in the known single-phase ME materials. This allows the use of magnetostriptive-piezoelectric composite materials in multifunctional devices such as ME transducers, sensors, microwave devices, etc. [4,5]. The purpose of this article is a detailed theoretical study of the longitudinal and thickness modes of the magnetoelectric effect in the EMR region in the magnetostriptive-piezoelectric two-layer structures Metglas/4H-SiC and Metglas/6H-SiC.

Piezoelectric Coefficients and Compliance Coefficients of Silicon Carbide

4H-SiC and 6H-SiC belong to the C_{6v}^4 -P6₃mc symmetry group (hexagonal system). Therefore, the

required components of the compliance tensor are expressed in terms of the known reference data on the stiffness coefficients [6] as follows

$$\begin{aligned} p_{s_{11}} &= \frac{p_{c_{11}} p_{c_{33}} - p_{c_{13}}^2}{(p_{c_{11}} - p_{c_{12}})(p_{c_{11}} p_{c_{33}} + p_{c_{12}} p_{c_{33}} - 2p_{c_{13}}^2)}, \\ p_{s_{12}} &= \frac{p_{c_{13}}^2 - p_{c_{12}} p_{c_{33}}}{(p_{c_{11}} - p_{c_{12}})(p_{c_{11}} p_{c_{33}} + p_{c_{12}} p_{c_{33}} - 2p_{c_{13}}^2)}, \\ p_{s_{13}} &= \frac{-p_{c_{13}}}{p_{c_{11}} p_{c_{33}} + p_{c_{12}} p_{c_{33}} - 2p_{c_{13}}^2}, \\ p_{s_{33}} &= \frac{p_{c_{11}} + p_{c_{12}}}{p_{c_{11}} p_{c_{33}} + p_{c_{12}} p_{c_{33}} - 2p_{c_{13}}^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

The necessary components of the piezoelectric tensor at constant mechanical stress are expressed through the known reference data on the piezoelectric coefficients at constant strain [7] as follows

$$\begin{aligned} d_{31} &= d_{32} = (p_{s_{11}} + p_{s_{12}})e_{31} + p_{s_{13}}e_{33}, \\ d_{33} &= 2p_{s_{13}}e_{31} + p_{s_{33}}e_{33}. \end{aligned} \quad (2)$$

Magnetoelectric effect in the region of the longitudinal mode

Let us consider longitudinal vibrations in a two-layer magnetostrictive-piezoelectric structure Metglas/silicon carbide. We will assume that the sample has the shape of a thin bar, whose thickness and width are much less than the length. In this case, we can consider only one component of the stress and strain tensor. The piezoelectric phase in the form of silicon carbide is cut from a plate lying in the (0001) plane, the long side is directed along the $\langle 2-1-10 \rangle$ crystallographic direction.

Total composite thickness:

$$t = p_t + m_t. \quad (3)$$

Volume fractions of piezoelectric and magnetostrictive phases:

$$\begin{aligned} p_v &= \frac{p_t}{t}, \\ m_v &= \frac{m_t}{t}. \end{aligned} \quad (4)$$

Effective composite density:

$$\rho = p_v p \rho + m_v m \rho. \quad (5)$$

The axis X is drawn along the interface between the magnetostrictive and piezoelectric phases:

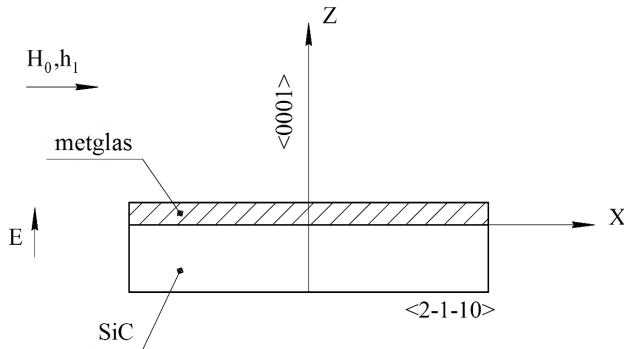


Figure 1. Direction of the applied magnetic fields to the ME composite in the case of the longitudinal ME effect

A detailed derivation of the formula for the ME voltage coefficient is given in [6]. Therefore, here we give only the final expression

$$\alpha_E = -\frac{2^m v^p t h_{31} \bar{q}_{11} \beta_{33}^S \tan(\eta)}{k t l \beta_{33}^S \langle c_{11} \rangle + 2 h_{31}^2 p t \tan(\eta)}. \quad (6)$$

Figure 2 shows the calculated theoretical dependences of the ME voltage coefficient on the frequency of the alternating magnetic field. For the calculation, the following geometric dimensions were used $p_t = 0,5$ mm, $m_t = 29$ mkm, $l = 1$ cm, resonance quality factor $Q = 130$; material parameters 4H-SiC $p_{s_{11}}^E = 2,08 \cdot 10^{-12}$ m²/N, $d_{31} = -3,96 \cdot 10^{-13}$ m/V; 6H-SiC $p_{s_{11}}^E = 2,09 \cdot 10^{-12}$ m²/N, $d_{31} = -4,06 \cdot 10^{-13}$ m/V.

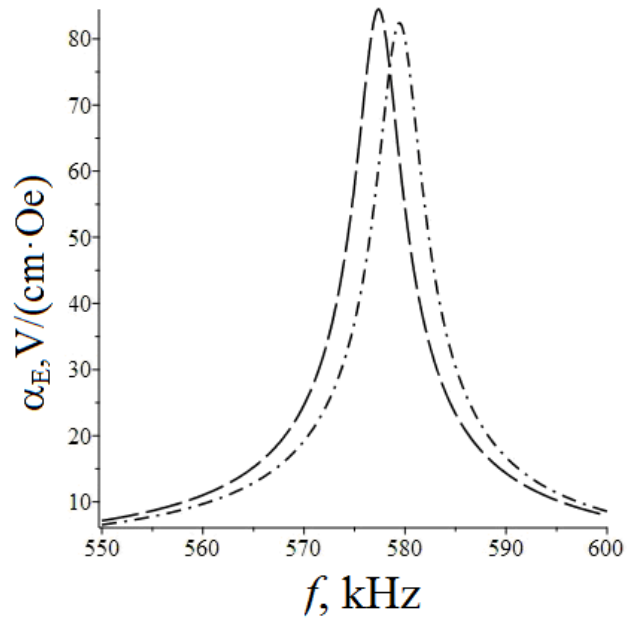


Figure 2. Frequency dependence of the ME voltage coefficient for the longitudinal mode. The dash-dotted line is 4H-SiC, the long-dashed line is 6H-SiC

As can be seen from Fig. 2, the resonance frequency for the 6H-SiC polytype is slightly lower than for 4H-SiC, and the magnitude of the resonant ME voltage coefficient, on the contrary, is somewhat higher.

Magnetoelectric effect in the region of the thickness mode

To excite the thickness mode, the dc and ac magnetic fields must be directed along the thickness of the ME structure:

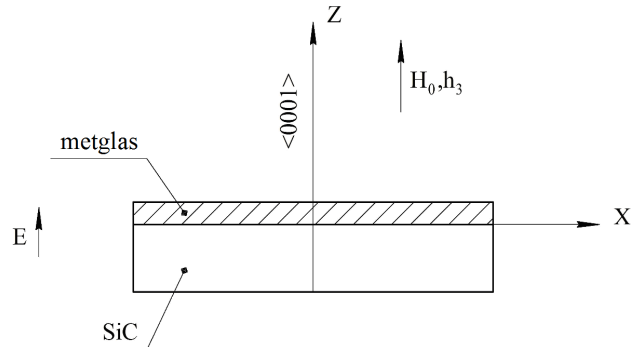


Figure 3. Direction of the applied magnetic fields to the ME composite in the case of the thickness ME effect.

Third components of strain tensors for magnetostrictive and piezoelectric phases:

$$\begin{aligned} {}^mS_3 &= \frac{\partial {}^m u_3}{\partial z}, \\ {}^pS_3 &= \frac{\partial {}^p u_3}{\partial z}. \end{aligned} \quad (7)$$

The third components of the stress tensor and the electric voltage vector of the piezoelectric:

$${}^pT_3 = \bar{c}_{33}^D {}^pS_3 - \bar{h}_{33} D_3, \quad (8)$$

$$E_3 = -\bar{h}_{33} {}^pS_3 + \bar{\beta}_{33}^S D_3, \quad (9)$$

where

$$\begin{aligned} \bar{c}_{33}^D &= \left({}^pS_{33}^E - \frac{d_{33}^2}{\epsilon_{33}^T \epsilon_0} \right)^{-1}, \\ \bar{h}_{33} &= \frac{\bar{c}_{33}^D d_{33}}{\epsilon_{33}^T \epsilon_0}, \\ \bar{\beta}_{33}^S &= \frac{1 + \bar{h}_{33} d_{33}}{\epsilon_{33}^T \epsilon_0}. \end{aligned} \quad (10)$$

The third component of the stress tensor of the magnetostrictive phase:

$${}^mT_3 = {}^mY {}^mS_3 - \bar{q}_{33} h_3, \quad (11)$$

where $\bar{q}_{33} = {}^mY q_{33}$.

Equations of thickness vibrations for magnetostrictive and piezoelectric phases:

$$\begin{aligned} {}^m\rho \frac{\partial^2 {}^m u_3}{\partial \tau^2} &= \frac{\partial {}^mT_3}{\partial z}, \\ {}^p\rho \frac{\partial^2 {}^p u_3}{\partial \tau^2} &= \frac{\partial {}^pT_3}{\partial z}. \end{aligned} \quad (12)$$

Let us also substitute (8) and (11) in the equations of thickness vibrations (12):

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 {}^m u_3}{\partial z^2} + {}^m k^2 {}^m u_3 &= 0, \\ \frac{\partial^2 {}^p u_3}{\partial z^2} + {}^p k^2 {}^p u_3 &= 0, \end{aligned} \quad (13)$$

where

$$\begin{aligned} {}^m k &= \omega \sqrt{\frac{{}^m \rho}{{}^m Y}}, \\ {}^p k &= \omega \sqrt{\frac{{}^p \rho}{\bar{c}_{33}^D}}. \end{aligned} \quad (14)$$

General solutions of equations of motion (13):

$$\begin{aligned} {}^p u_3 &= A \cos({}^p k z) + B \sin({}^p k z), \\ {}^m u_3 &= C \cos({}^m k z) + D \sin({}^m k z). \end{aligned} \quad (15)$$

Open circuit condition:

$$D_3 = 0. \quad (16)$$

Boundary conditions for free fixing of the upper and lower edges of the magnetoelectric composite

$$\begin{aligned} {}^m T_3|_{z=m_t} &= 0, \\ {}^m u_3|_{z=0} &= {}^m u_3|_{z=0}, \\ {}^m T_3|_{z=0} &= {}^p T_3|_{z=0}, \\ {}^p T_3|_{z=-p_t} &= 0. \end{aligned} \quad (17)$$

From (17) we obtain a linear system of four inhomogeneous algebraic equations with respect to four unknowns A, B, C, D . Solving this system, we find

$$\begin{aligned} A &= \frac{\bar{q}_{33} r_3 (r_1 - 1) h_3}{\bar{c}_{33}^D {}^p k r_1 r_4 + {}^m Y {}^m k r_2 r_3}, \\ B &= -\frac{\bar{q}_{33} r_4 (r_1 - 1) h_3}{\bar{c}_{33}^D {}^p k r_1 r_4 + {}^m Y {}^m k r_2 r_3}, \end{aligned} \quad (18)$$

where

$$\begin{aligned} r_1 &= \cos({}^m k m_t), \\ r_2 &= \sin({}^m k m_t), \\ r_3 &= \cos({}^p k p_t), \\ r_4 &= \sin({}^p k p_t). \end{aligned} \quad (19)$$

Let's find the electric voltage across the piezoelectric:

$$U = \int_{-p_t}^0 E_3 dz = -\bar{h}_{33} [A(1 - r_3) + B r_4]. \quad (20)$$

Substituting (18) in (20) we find the ME voltage coefficient:

$$\alpha_E = \frac{\bar{E}_3}{h_3} = -\frac{\bar{q}_{33} \bar{h}_{33} (1 - r_1)(1 - r_3)}{t(\bar{c}_{33}^D {}^p k r_1 r_4 + {}^m Y {}^m k r_2 r_3)}. \quad (21)$$

Below in Fig. 4 shows the dependence of the ME voltage coefficient on the frequency of the alternating magnetic field. For the calculation, the same geometrical dimensions and figure of merit were used as for the longitudinal mode; material parameters 4H-SiC ${}^pS_{33}^E = 1,75 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, $d_{33} = 7,06 \cdot 10^{-13} \text{ m/V}$; 6H-SiC ${}^pS_{33}^E = 1,79 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, $d_{33} = 8,08 \cdot 10^{-13} \text{ m/V}$.

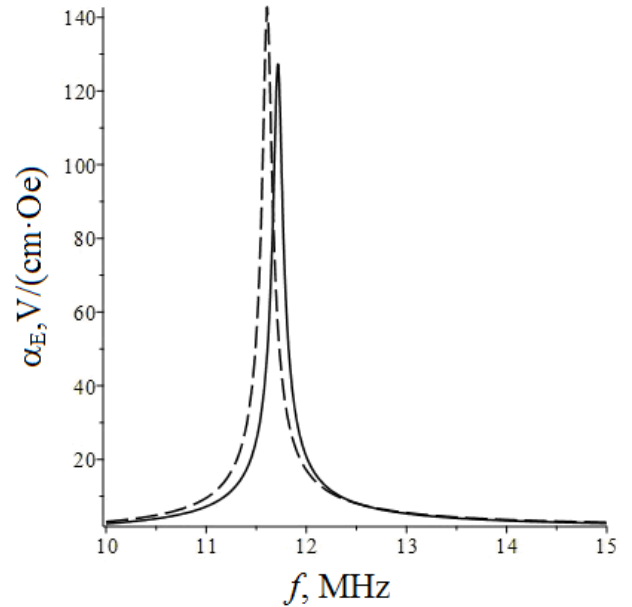


Figure 4. Frequency dependence of the ME voltage coefficient for the thickness mode. The solid line is 4H-SiC, the dashed line is 6H-SiC

Fig. 4 shows that the resonant frequency for the 6H-SiC polytype is somewhat lower than for 4H-SiC, and the magnitude of the resonant ME voltage coefficient, on the contrary, is somewhat higher.

Conclusion

The article discusses a theoretical model of the magnetoelectric effect for longitudinal and thickness modes in the EMR region. Two-layer samples consisting of a magnetostrictive Metglas material and piezoelectric semiconductor materials 4H-SiC and 6H-SiC were studied as structures under study.

In the theoretical calculation of the composite structures under study, the resonance value of the ME coefficient for the 6H-SiC polytype turned out to be somewhat higher than for the 4H-SiC polytype, both for the longitudinal mode and for the thickness mode.

Semiconductors 4H-SiC and 6H-SiC are promising for use as piezoelectrics in ME composites. Although they have slightly lower piezoelectric moduli than traditional piezoelectric materials, they have a lower relative permittivity, which contributes to an increase in the ME coefficients. It is also promising to use the active semiconductor properties of the considered materials in devices based on the ME effect.

The study was carried out with the financial support of the RFBR grant No. 19-07-00391 A.

1. Bichurin M.I., Petrov V.M. Srinivasan G. Theory of magnetoelectric effects in ferromagnetic ferroelectric layer composites // J. Appl. Phys. 2002. V.92. №12. P.7681-7683.
2. Bichurin M.I., Petrov V.M., and Srinivasan G. Theory of low-frequency magnetoelectric coupling in magnetostrictive-piezoelectric bilayers // Phys. Rev. 2003. B 68. P.054402.
3. Bichurin M.I., Petrov V.M., Priya S. Magnetoelectric multiferroic composites // Ferroelectrics - Physical Effects / Ed. M.Lallart. Rijeka: InTech, 2011. P.277-302.
4. Magnetoelectricity in Composites / Eds. M.I.Bichurin and D.Viehland. Singapore: Pan Stanford Publ., 2011. 286 p.
5. Bichurin M., Petrov V., Petrov R., Tatarenko A. Magnetoelectric Composites. Singapore: Pan Stanford Publ., 2019. 280 p.

6. Mirgorodsky A. P., Smirnov M. B., Abdelmounim E. et al. Molecular approach to the modeling of elasticity and piezoelectricity of SiC polytypes // Phys. Rev. B. 1995. V.52. №6. P.3993. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.52.3993>
7. Cimalla V., Pezoldt J., Ambacher O. Group III nitride and SiC based MEMS and NEMS: materials properties, technology and applications // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V.40. №20. P.6386. DOI: <http://doi.org/10.1088/0022-3727/40/20/S19>
8. Соколов О.В., Леонтьев В.С. Моделирование продольной моды магнитоэлектрического эффекта в слоистой структуре метглас/ниобат лития // Вестник НовГУ. 2018. №4 (110). С.24-27.

References

1. Bichurin M.I., Petrov V.M. Srinivasan G. Theory of magnetoelectric effects in ferromagnetic ferroelectric layer composites. J. Appl. Phys., 2002, vol.92, no.12, pp.7681-7683.
2. Bichurin M.I., Petrov V.M., and Srinivasan G. Theory of low-frequency magnetoelectric coupling in magnetostrictive-piezoelectric bilayers. Phys. Rev., 2003, B 68, pp.054402.
3. Bichurin M.I., Petrov V.M., Priya S. Magnetoelectric multiferroic composites. Ferroelectrics - Physical Effects / Ed. By M.Lallart. Rijeka: InTech, 2011, pp.277-302.
4. Magnetoelectricity in Composites / Eds. M.I.Bichurin and D.Viehland. Singapore, Pan Stanford Publ., 2011, 286 p.
5. Bichurin M., Petrov V., Petrov R., Tatarenko A. Magnetoelectric Composites. Singapore: Pan Stanford Publ., 2019. 280 p.
6. Mirgorodsky A.P., Smirnov M.B., Abdelmounim E. et al. Molecular approach to the modeling of elasticity and piezoelectricity of SiC polytypes. Phys. Rev. B., 1995, v.52, no.6, p.3993. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.52.3993>
7. Cimalla V., Pezoldt J., Ambacher O. Group III nitride and SiC based MEMS and NEMS: materials properties, technology and applications. J. Phys. D: Appl. Phys., 2007, vol.40, no.20, p.6386. DOI: <http://doi.org/10.1088/0022-3727/40/20/S19>
8. Sokolov O.V., Leont'ev V.S. Modelirovanie prodol'noy mody magnitoelektricheskogo effekta v sloistoy strukture metglas/niobat litiya [Modeling of a longitudinal mode of magnetoelectric effect in a Metglass/Lithium niobate layered structure]. Vestnik NovSU, 2018, no.4 (110), pp.24-27.

АВТОМОДЕЛЬНОСТЬ КАК ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ СВОЙСТВО НЕЛОКАЛЬНОЙ АНОМАЛЬНОЙ ДИФФУЗИИ

В.В.Учайкин

AUTOMODELITY AS A CHARACTERISTIC PROPERTY OF NONLOCAL ANOMALOUS DIFFUSION

V.V.Uchaikin

Ульяновский государственный университет, vuchaikin@gmail.com

Краткое (на популярном уровне) изложение связи между негауссовым семейством устойчивых законов и самоподобием описываемых ими нелокальных процессов. Характеристическое свойство самоподобия позволяет расположить баллистическую, броуновскую и Леви-модель движения в логически связанную цепочку с характеристическими показателями $\alpha = 1, 2$ и $0 < \alpha < 2$, определяющими степени дифференциальных операторов, которые описывают эти движения. Семейство моделей, порождаемых дробными значениями α , характеризуется специфическим свойством нелокальности, отражающимся в физической интерпретации в терминах фрактальности, если речь идет о пространственной производной, и эрeditarности — в случае дифференцирования по времени.

Ключевые слова: диффузия, случайные блуждания, устойчивые законы, дробные производные

Для цитирования: Учайкин В.В. Автомоделность как характеристическое свойство нелокальной аномальной диффузии // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С.43-46. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).43-46](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).43-46)

A brief presentation of the relationship between a non-Gaussian family of stable laws and the self-similarity of the nonlocal processes described by them. The characteristic property of self-similarity makes it possible to arrange the ballistic, Brownian, and Levy-models of motion in a logically connected chain with characteristic exponents $\alpha = 1, 2$ and $0 < \alpha < 2$, which determine the degrees of differential operators describing these movements. The family of models generated by fractional values of α is characterized by a specific property of nonlocality, which is reflected in the physical interpretation in terms of fractality, if we are talking about the spatial derivative, and heredity, in the case of time-differentiation.

Keywords: diffusion, random walks, stable laws, fractional derivatives

For citation: Uchaikin V.V. Automodelity as a characteristic property of nonlocal anomalous diffusion // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.43-46. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).43-46](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).43-46)

1. Автомоделность

На первый взгляд, нет ничего общего между динамическим типом движения, когда частица движется по гладкой кривой (например, по прямой) в пространстве, и стохастическим типом, когда траектория представляет собой чрезвычайно нерегулярную, всюду изломанную линию (пример — броуновская траектория). Однако общее, по крайней мере, между прямой и броуновской кривой, есть. Для обоих типов движения нет больших и малых времен, они *автомоделны*. Прямая остается прямой на всех масштабах, как и броуновская траектория остается броуновской.

Автомоделность (самоподобие, масштабная инвариантность, скейлинг — это все синонимы автомоделности) — особая симметрия системы, состоящая в том, что изменение масштабов одних переменных может быть скомпенсировано преобразованием масштабов других [1]. Постоянная H , называемая показателем Херста, определяет порядок автомоделности.

В терминах случайной переменной $X(t)$ (для простоты ограничиваемся одномерным процессом) свойство автомоделности формулируется в виде

$$X(t) \stackrel{d}{=} t^H X(1),$$

или

$$X(at) \stackrel{d}{=} a^H X(t),$$

при $a > 0$ и любом фиксированном t . Вообще, случайный процесс $\{X(t), T\}$ называется автомоделным, если автомоделны распределения всех его конечномерных векторов:

$$(X(at_1), \dots, X(at_n)) \stackrel{d}{=} (a^H X(t_1), \dots, a^H X(t_n))$$

Для автомоделности же однородного марковского процесса достаточно автомоделности одномерного распределения.

Автомоделность одновременной плотности распределения $p(x, t)$ выражается соотношением

$$p(x, t) = t^{-H} p(xt^{-H}, 1).$$

В баллистическом движении со скоростью v

$$X(t) = vt$$

и

$$X(at) = avt = a^H X(t), H = 1.$$

В броуновском движении с коэффициентом диффузии K

$$X(t) \stackrel{d}{=} \sqrt{2Kt} G$$

и

$$X(at) \stackrel{d}{=} \sqrt{2Kat} G = a^{1/2} X(t), H = 1/2.$$

В представлении плотности это свойство выражается соотношением:

$$p(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2Kt}} e^{-x^2/4Kt} = t^{-H} p(xt^{-H}, 1).$$

На самом деле существует целое семейство автомодельных процессов, по отношению к которому баллистическое и броуновское движения оказываются частными случаями.

2. Леви-процессы

Определим теперь L -процесс как однородный марковский процесс с α -автомодельным одномерным распределением

$$p(x, t) = t^{-1/\alpha} g^{(\alpha)}(xt^{-1/\alpha}),$$

где $\alpha = 1/H$, а $g^{(\alpha)}(x)$ — неизвестная пока плотность распределения.

Очевидно, что такая замена не может привести к сужению класса рассматриваемых процессов: броуновское движение удовлетворяет этому условию и остается в классе L с $\alpha = 2$. Появятся ли при этом какие-то новые процессы? Ответ на этот вопрос связан с тем, существуют или нет отличные от гауссова распределения $p(x, t)$ L -процесса, удовлетворяющие условию автомодельности.

Рассмотрим два момента времени: t и $t + \tau$. Случайные координаты L -процесса частицы в эти моменты связаны соотношением

$$X(t + \tau) = X(t) + X(\tau).$$

При условии $X(0) = 0$ случайные величины $X(t)$ и $X(\tau)$ являются приращениями процесса в непересекающихся интервалах $(0, t)$ и $(t, t + \tau)$ и, стало быть, независимы. Плотность распределения их суммы дается сверткой плотностей слагаемых:

$$p(x, t + \tau) = p(x, t) * p(x, \tau) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} p(x - x', t) p(x', \tau) dx'.$$

Удобно от плотностей перейти к характеристическим функциям

$$\tilde{p}(k, t) = \langle \exp\{ikX(t)\} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} e^{ikx} p(x, t) dx,$$

для которых операция свертки превращается в произведение

$$\tilde{p}(k, t + \tau) = \tilde{p}(k, t) \tilde{p}(k, \tau),$$

а условие автомодельности принимает вид

$$\tilde{p}(k, t) = \tilde{g}^{(\alpha)}(kt^{1/\alpha}).$$

3. Устойчивые законы

Полученные выше соотношения приводят к функциональному уравнению

$$\tilde{g}^{(\alpha)}(k(t + \tau)^{1/\alpha}) = \tilde{g}^{(\alpha)}(kt^{1/\alpha}) \tilde{g}^{(\alpha)}(k\tau^{1/\alpha}),$$

определяющему класс *строго устойчивых законов*, называемых далее для краткости просто устойчивыми. Характеристические функции $\tilde{g}^{(\alpha)}(k)$ выражаются в элементарных функциях и могут быть записаны в нескольких формах [2].

Как отмечалось выше, винеровский процесс входит в класс L -процессов. Он характеризуется нормальным распределением с плотностью

$$g^{(2)}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-x^2/4)$$

и характеристической функцией

$$\tilde{g}^{(2)}(k) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{ikx} g(x, 2) dx = \exp(-k^2).$$

Чтобы найти характеристические функции остальных членов этого семейства, введем вторую характеристику

$$\psi^{(\alpha)}(k) = \ln \tilde{g}^{(\alpha)}(k),$$

для которой свойство устойчивости эквивалентно аддитивности

$$\psi^{(\alpha)}(c_1 k) + \psi^{(\alpha)}(c_2 k) = \psi^{(\alpha)}(ck),$$

где

$$c = (c_1^\alpha + c_2^\alpha)^{1/\alpha}.$$

Распространяя это соотношение на сумму произвольного числа n одинаково распределенных слагаемых ($c_1 = c_2 = \dots = c_n = 1$), получим

$$n\psi^{(\alpha)}(k) = \psi^{(\alpha)}(n^{1/\alpha}k).$$

Согласно свойству

$$\psi^{(\alpha)}(-k) = [\psi^{(\alpha)}(k)]^*,$$

(здесь * означает комплексное сопряжение) достаточно определить функцию $\psi^{(\alpha)}(k)$ для положительных значений аргумента $k > 0$. Учитывая ее непрерывность в окрестности начала координат и вытекающее из определения характеристической функции условие

$$\psi^{(\alpha)}(0) = 0,$$

приходим к равенству

$$|\psi^{(\alpha)}(k)| = \text{const} \cdot k^\alpha, \quad (k > 0, \alpha > 0),$$

из которого следует, что

$$\psi^{(\alpha)}(k) = -k^\alpha [c_0 - ic_1].$$

Характеристическая функция удовлетворяет условию

$$|\tilde{g}(k)| \leq 1,$$

поэтому

$$\text{Re} \psi^{(\alpha)}(k) \leq 0,$$

и вещественная постоянная c_0 должна быть положительной. С другой стороны, из условия

$$\tilde{g}''(0) = -\langle S^2 \rangle$$

(здесь S — случайная величина с характеристической функцией $\tilde{g}(k)$) следует, что

$$[\psi^{(\alpha)}]''(0) = -\langle S^2 \rangle + \langle S^2 \rangle \equiv -D \leq 0.$$

Вычислив вторую производную,

$$[\psi^{(\alpha)}(k)]'' = -[c_0 - ic_1]\alpha(\alpha - 1)k^{\alpha-2},$$

и устремив $k \rightarrow 0$, можно убедиться, что при $\alpha = 2$ дисперсия D конечна (вследствие вещественности последней постоянная c_1 должна быть равна нулю), при $\alpha < 2$ она бесконечна (в этом случае величина c_1 роли не играет), и при $\alpha > 2$ предельное значение производной равно нулю. Последнее означает, что второй момент функции

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2 g(x) dx = 0.$$

Для не сосредоточенного в нуле распределения это может означать только, что произведение $x^2 g(x)$ является знакопеременным, и, стало быть, $g(x)$ не является плотностью вероятности. Таким образом, область допустимых значений параметра α есть $(0, 2]$.

Постоянные c_0 и c_1 могут быть представлены в нескольких формах. В одной из них

$$c_0 = 1, \quad c_1 = \beta \text{tg}(\alpha\pi/2),$$

где второй вещественный параметр $\beta \in [-1, 1]$ характеризует асимметрию распределения. Таким образом, характеристическая функция одномерного устойчивого закона на положительной полуоси имеет вид:

$$\tilde{g}^{(\alpha, \beta)}(k) = \exp\{-k^\alpha [1 - i\beta \operatorname{tg}(\alpha\pi/2)]\}, \quad k > 0.$$

Аналогичные вычисления для отрицательной полуоси дают

$$\tilde{g}^{(\alpha, \beta)}(k) = \exp\{-(-k)^\alpha [1 + i\beta \operatorname{tg}(\alpha\pi/2)]\}, \quad k < 0.$$

Объединяя эти формулы в одну, получим:

$$\tilde{g}^{(\alpha, \beta)}(k) = \exp\{-|k|^\alpha [1 - i\beta \operatorname{tg}(\alpha\pi/2) \operatorname{sign} k]\}, \quad -\infty < k < \infty. \quad (\text{A})$$

Это стандартное представление устойчивой характеристической функции в форме А.

Часто используется представление в форме С, получаемое введением в показатель экспоненты масштабного множителя, подобранного таким образом, чтобы характеристическая функция приняла вид

$$\tilde{g}(k; \alpha, \theta) = \exp\{-|k|^\alpha \exp[-i(\theta\pi/2) \operatorname{sign} k]\}, \quad (\text{C})$$

Здесь $\alpha \in [0, 2]$ — характеристический показатель устойчивого закона, а $\beta \in [-1, 1]$ и $\theta \in [-\theta_\alpha, \theta_\alpha]$, $\theta_\alpha = \min\{1, 2/\alpha - 1\}$ — параметры асимметрии.

Задаваемые этими характеристическими функциями *устойчивые случайные величины* будем обозначать через $S^{(\alpha, \beta)}$ и $S(\alpha, \theta)$ соответственно.

4. Обобщенная предельная теорема

Открытие Полем Леви класса устойчивых распределений, возможно, было одним из самых крупных событий в теории вероятностей XX в. Они освободили ЦПТ от ограничения, налагаемого требованием конечности дисперсии, и открыли возможность суммирования случайных величин с бесконечными дисперсиями. Оказалось, что если только существует невырожденное (не сосредоточенное в одной точке) предельное распределение нормированной суммы $(\sum_{j=1}^n X_j - A_n)/B_n$ при $n \rightarrow \infty$ и подходящим образом выбранных последовательностях A_n и $B_n > 0$, то это распределение обязательно будет устойчивым. При этом $B_n = h(n)n^{1/\alpha}$, где $h(n)$ — медленно меняющаяся функция (типа логарифма или какой-нибудь его степени), а α — характеристический показатель. Если для случайной величины X с функцией распределения $F(x)$ можно подобрать такие A_n и B_n , то говорят, что X принадлежит области притяжения устойчивого закона. В противном случае она не принадлежит области притяжения никакого закона: только устойчивые законы обладают областями притяжения.

Чтобы проверить, принадлежит ли области притяжения случайная величина X , надо, прежде всего, вычислить дисперсию или просто второй момент $\langle X^2 \rangle$. Если он конечен, X находится в области притяжения нормального закона. Если $\langle X^2 \rangle = \infty$, необходимо проверить асимптотику «хвостов» распределения X . Если оказывается, что

$$P(|X| > x) \sim h(x)x^{-\alpha}, \quad x \rightarrow \infty,$$

то ответ положительный, если же асимптотика имеет иной вид, ответ отрицательный. Мы ограничимся далее лишь случаем «нормального» (не путать с гауссовым!) притяжения, когда $h(x) \rightarrow \text{const} \rightarrow 0$ при $x \rightarrow \infty$.

Пусть теперь известно, что X принадлежит области притяжения устойчивого закона. Как узнать его параметры α и β (или θ)? Ответ на этот вопрос как раз и дает

Обобщенная предельная теорема (ОПТ).

Пусть случайные величины X_j независимы, одинаково распределены и удовлетворяют условиям

$$P(X > x) \sim a_+ x^{-\alpha}, \quad x \rightarrow \infty,$$

$$P(X < -x) \sim a_- x^{-\alpha}, \quad x \rightarrow \infty,$$

$0 < \alpha \leq 2$, $a_+ \geq 0$, $a_- \geq 0$ и $a_+ + a_- > 0$. Тогда найдутся такие последовательности A_n и $B_n > 0$, что при $n \rightarrow \infty$

$$\left(\sum_{j=1}^n X_j - A_n\right)/B_n \xrightarrow{d} S^{(\alpha, \beta)},$$

где $\beta = (a_+ - a_-)/(a_+ + a_-)$.

Разумеется, существует бесконечное множество последовательностей нормирующих коэффициентов A_n и B_n с одним и тем же асимптотическим поведением при $n \rightarrow \infty$.

5. Аномальная диффузия

Термин «аномальная диффузия» применяется в случае, если ширина диффузионного пакета Δt увеличивается со временем медленнее или быстрее, чем в нормальном (гауссовом) случае, когда $\Delta t \propto t^{1/2}$. В последние десятилетия исследуются разнообразные процессы аномальной диффузии: перенос заряда в аморфных полупроводниках, динамика полимерных систем, диффузия на фрактальных структурах, процессы в квантовой оптике, плазме и т.д. (см [4]).

Хорошо известно, что, несмотря на многообразие конкретных механизмов, приводящих к нормальным диффузионным процессам, главная особенность этих процессов может быть получена в рамках схемы скачкообразного ступенчатого процесса с непрерывным временем (в зарубежной литературе этот процесс обозначается аббревиатурой CTRW — *continuous time random walk*). Это позволяет надеяться, что CTRW-модель может также описать некоторые общие особенности большого числа различных аномальных процессов без рассмотрения их специфических механизмов.

Простейшая (одномерная) версия CTRW-модели предполагает, что длины различных прыжков R_j , а также времена пребывания в ловушках T_j представляют собой набор взаимно независимых случайных величин. Предполагается, что свободные пробеги имеют распределение со степенным хвостом

$$P\{R > r\} \propto r^{-\alpha}, \quad \alpha > 0, \quad r \rightarrow \infty,$$

распределение времен пребывания в ловушках удовлетворяет условию

$$P\{T > t\} \propto t^{-\beta}, \quad \beta > 0, \quad t \rightarrow \infty.$$

Понятие диффузия используется, когда речь идет об асимптотическом поведении этого процесса при $t \rightarrow \infty$. Если $\alpha > 2$ и $\beta > 1$ мы наблюдаем нормальную диффузию, все остальные значения α и β приводят к аномальной диффузии с характеристическими показателями α , β .

Возможно, самый простой способ выйти на асимптотику рассматриваемого процесса, отталкиваясь от трансформанты

$$\tilde{p}(k, \lambda) = \frac{1 - \tilde{q}(\lambda)}{\lambda[1 - \tilde{q}(\lambda)\tilde{p}(k)]},$$

заключается в использовании в качестве $p(x)$ и $q(t)$ самих устойчивых плотностей $g(x; \alpha, \theta)$ и $g(x; \omega, 1)$, $0 < \alpha \leq 2$, $\omega \leq 1$. Законность такой подстановки обусловлена тем, что каждый устойчивый закон принадлежит своей области притяжения. Тем самым условие теоремы об аномальной диффузии выполняется. В то же время асимптотическое выражение $p(x, t)$ определяется только асимптотиками функций $p(x)$ и $q(t)$, а все распределения, принадлежащие фиксированной области притяжения, в том числе и устойчивое, имеют одну и ту же (с точностью до постоянного множителя) асимптотику. Следовательно, выбирая в качестве $p(x)$ и $q(t)$ устойчивые плотности, мы нисколько не теряем в общности.

Согласно тауберовым теоремам, в восстановлении распределения $p(x, t)$ при больших x и t основную роль играет поведение трансформанты Фурье—Лапласа $\tilde{p}(k, \lambda)$ в области малых значений аргументов, где

$$\tilde{p}(k) = \tilde{g}(k; \alpha, \theta) = \exp\{-|k|^\alpha \exp[-i\alpha\theta\pi/2 \operatorname{sign} k]\} \sim 1 - |k|^\alpha \exp\{-i\alpha\theta\pi/2 \operatorname{sign} k\}, \quad k \rightarrow 0$$

и

$$\tilde{q}(\lambda) = \tilde{g}(-i\lambda; \omega, 1) = e^{-\lambda^\omega} \sim 1 - \lambda^\omega, \quad \lambda \rightarrow 0.$$

Несложные преобразования приводят к следующему уравнению для главной асимптотики

$$\lambda^\omega \tilde{p}^{as}(k, \lambda) = -|k|^\alpha \exp\{-i\alpha\theta\pi/2 \operatorname{sign} k\} \tilde{p}^{as}(k, \lambda) + \lambda^{\omega-1},$$

которое может быть также представлено в виде

$$\lambda^\omega \hat{p}^{as}(x, \lambda) = L^{(\alpha, \beta)} \hat{p}^{as}(x, \lambda) + \lambda^{\omega-1} \delta(x),$$

обобщающем уравнение движения Леви на немарковский тип процесса.

Произведение же $\lambda^\omega \hat{p}^{as}(x, \lambda)$ и функция $\lambda^{\omega-1}$ являются трансформантами Лапласа дробной производной Римана—Лиувилля

$${}_0 D_t^\omega p(x, t) = \frac{1}{\Gamma(1-\omega)} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t \frac{p(x, \tau) d\tau}{(t-\tau)^\omega}$$

и обобщенной функции

$$\frac{t^{-\omega}}{\Gamma(1-\omega)} \delta(x).$$

Таким образом, главная асимптотическая (при $t \rightarrow \infty$) часть распределения $p(x, t)$ удовлетворяют уравнению в частных производных дробного порядка

$${}_0 D_t^\omega p^{as}(x, t) = L^{(\alpha, \beta)} p^{as}(x, t) + \frac{\tau^{-\omega}}{\Gamma(1-\omega)} \delta(x),$$

которое мы будем называть *уравнением аномальной диффузии (АД-уравнением)*.

6. Обобщенный закон Фика

Многомерный аналог АД-уравнения в изотропном случае включает в себя лапласиан дробного порядка:

$${}_0 D_t^\omega f(\mathbf{x}, t) = -K(-\Delta)^{\alpha/2} f(\mathbf{x}, t) + \frac{\tau^{-\omega}}{\Gamma(1-\omega)} \delta(\mathbf{x}).$$

Будучи преобразованным (путем дробного дифференцирования порядка $1 - \omega$ обеих частей) к виду

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -K(-\Delta)^{\alpha/2} {}_0 D_t^{1-\omega} f(\mathbf{x}, t) + \delta(\mathbf{x}) \delta(t),$$

АД-уравнение может быть представлено в виде системы двух уравнений

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\operatorname{div} \mathbf{j},$$

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = K(-\Delta)^{\alpha/2} {}_0 D_t^{1-\omega} f(\mathbf{x}, t),$$

первое из которых является уравнением непрерывности, определяющим вектор плотности тока вероятности $\mathbf{j}$, а второе — *обобщенным законом Фика*, заданным в неявной форме.

При $\alpha = 2$ и $\omega = 1$ обобщенный закон принимает вид обычного закона Фика

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = -K \Delta f(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{j} = -K \operatorname{grad} f(\mathbf{x}, t).$$

При $\alpha = 2$ и $\omega \neq 1$ мы имеем дело с субдиффузионным обобщением:

$$\mathbf{j} = -K \operatorname{grad} {}_0 D_t^{1-\omega} f(\mathbf{x}, t) = -K {}_0 D_t^{1-\omega} \operatorname{grad} f(\mathbf{x}, t).$$

Наличие в правой части производной по времени дробного порядка

$${}_0 D_t^{1-\omega} \operatorname{grad} f(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{\Gamma(\omega)} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t \frac{\operatorname{grad} f(\mathbf{x}, \tau) d\tau}{(t-\tau)^{1-\omega}}$$

отражает влияние памяти процесса на распространение диффузионного пакета: плотность тока в данный момент определяется не мгновенным градиентом плотности в данный момент, а его эволюцией в течение всего предшествующего периода диффузии. Эта особенность обусловлена наличием в среде случайно распределенных ловушек с распределением времени удержания степенного типа. Замедленная таким образом диффузия называется *субдиффузией* и носит немарковский, но локальный характер.

При $\alpha < 2$ и $\omega = 1$ имеет место ускоренный режим диффузии, называемый *супердиффузией*. В этом режиме

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = K(-\Delta)^{\alpha/2} f(\mathbf{x}, t)$$

и скорость изменения плотности в данной точке определяется не градиентом в ней, а распределением диффундирующей субстанции в большой ее окрестности (влияние больших пробегов с асимптотически степенным характером распределения). Супердиффузия (называемая также диффузией Леви или полетами Леви) — марковский, но нелокальный (поскольку лапласиан в дробной степени является интегральным по пространству оператором). Важно иметь в виду, что не только закон изменения ширины аномального диффузионного пакета, но и сама его форма отличаются от таковых, наблюдаемых в нормальной диффузии.

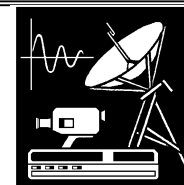
В случае $\alpha < 2$ и $\omega < 1$ процесс аномальной диффузии является немарковским и нелокальным.

1. Математическая физика. Энциклопедия / Под ред. Л.Д. Фаддеева. М.: Большая Российская энциклопедия. 1998. 692 с.
2. Uchaikin V.V., Zolotarev V.M. Chance and Stability. Utrecht, The Netherlands: VSP, 1999. 570 p.
3. Учайкин В.В. Автомодельная аномальная диффузия и устойчивые законы // Успехи физических наук. 2003. Т. 173. №8. С. 847-876.
4. Учайкин В.В. Метод дробных производных. Ульяновск: Артишок, 2008. 512 с.

References

1. Faddeev L.D. Matematicheskaya fizika. Entsiklopediya [Mathematical Physics. Encyclopaedia]. Moscow, Bol'shaya Rossiyskaya Entsiklopediya Publ., 1998. 692 p.
2. Uchaikin V.V., Zolotarev V.M. Chance and Stability, VSP, Utrecht, The Netherlands, 1999. 570 p.
3. Uchaikin V.V. Avtomodel'naya anomal'naya diffuziya i ustoychivye zakony [Anomalous self-similar diffusion and Levy-stable laws]. Uspekhi fizicheskikh nauk, 2003, vol. 173, no. 8, pp. 847-876.
4. Uchaikin V.V. Metod drobnnykh proizvodnykh [Method of Fractional Derivatives]. Ul'yanovsk, Artishok Publ., 2008. 512 p.

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ



УДК 519.7

DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).47-51](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).47-51)СИММЕТРИЧНАЯ 2-АДИЧЕСКАЯ СЛОЖНОСТЬ БИНАРНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ С ПЕРИОДОМ $4q$ И ОПТИМАЛЬНОЙ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ МАГНИТУДОЙ

В.А.Едемский, А.В.Иванов

SYMMETRIC 2-ADIC COMPLEXITY OF BINARY SEQUENCES WITH PERIOD $4Q$ AND OPTIMAL AUTOCORRELATION MAGNITUDE

V.A.Edemskiy, A.V.Ivanov

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Vladimir.Edemsky@novsu.ru

Рассмотрены бинарные последовательности с периодом $4q$, где q — нечетное простое число, и оптимальной автокорреляционной магнитудой. Последовательности определяются с использованием классов биквадратичных вычетов по простому модулю и прямого произведения колец классов вычетов. Показано, что они имеют высокую симметричную 2-адическую сложность, определяемую как наименьшее число ячеек регистра сдвига с обратной связью по переносу, который может генерировать последовательность. Симметричная 2-адическая сложность предпочтительнее 2-адической сложности при оценке непредсказуемости бинарных последовательностей. Метод исследования основан на применении обобщенных гауссовых сумм над кольцами классов вычетов. Бинарные последовательности, обладающие высокой линейной и 2-адической сложностью, хорошими автокорреляционными свойствами, представляют интерес для криптографических приложений, в частности при потоковом шифровании.

Ключевые слова: бинарные последовательности, симметричная 2-адическая сложность, биквадратичные вычеты

Для цитирования: Едемский В.А., Иванов А.В. Симметричная 2-адическая сложность бинарных последовательностей с периодом $4q$ и оптимальной автокорреляционной магнитудой // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С. 47-51. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).47-51](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).47-51)

Binary sequences with a period of $4q$ (where q is an odd prime) and an optimal autocorrelation magnitude are considered. Sequences are defined using prime modulus biquadratic residue classes and direct product of residue class rings. It is shown that they have a high symmetric 2-adic complexity. The 2-adic complexity of a sequence is defined as the smallest number of carry-feedback shift register cells that is capable to generate a sequence. Symmetric 2-adic complexity is preferred over 2-adic complexity when evaluating the unpredictability of binary sequences. The research method is based on the application of generalized Gaussian sums over rings of residue classes. Binary sequences with high linear and 2-adic complexity and good autocorrelation properties are of interest for cryptographic applications, in particular, for stream encryption.

Keywords: binary sequences, symmetric 2-adic complexity, biquadratic residues

For citation: Edemskiy V.A., Ivanov A.V. Symmetric 2-adic complexity of binary sequences with period $4q$ and optimal autocorrelation magnitude // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.47-51. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).47-51](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).47-51)

Введение

Бинарные псевдослучайные последовательности широко применяются в различных областях. Автокорреляция, линейная сложность и 2-адическая сложность являются значимыми характеристиками бинарных последовательностей, важными для их применения в криптографии и связи. Бинарная последовательность длины $4N$ называется последовательностью с оптимальной автокорреляционной магнитудой, если значения ее периодической автокорреляционной функции принадлежат множеству $\{0, \pm 4\}$, когда значения аргумента не кратно периоду. Семейство бинарных последовательностей с оптимальной автокорреляционной магнитудой и периодом $4q$, где

q — простое число и $q \equiv 5 \pmod{8}$, рассмотрено в [1]. Эти последовательности формируются на основе классов биквадратичных вычетов и прямого произведения колец классов вычетов по простому модулю q и модулю четыре.

Линейная сложность и 2-адическая сложность последовательности определяются, соответственно, как длина наименьшего линейного регистра сдвига с обратной связью и регистра сдвига с обратной связью по переносу, который может генерировать последовательность [2-4]. Понятие регистра сдвига с обратной связью по переносу предложено в [3], там же введено определение 2-адической сложности последовательности и рассмотрен алгоритм ее вычисления. В отличие от линейной сложности, которая хорошо изучена

для различного вида последовательностей, сформированных на классах степенных вычетов, 2-адическая сложность бинарных последовательностей изучена в меньшей степени. Основные публикации посвящены бинарным последовательностям с оптимальной автокорреляцией [5-9].

Согласно [1], если $z = \{z_i\}$ — бинарная последовательность с периодом N и $S(x) = \sum_{i=0}^{N-1} z_i x^i \in \mathbb{Z}[x]$, тогда 2-адическая сложность последовательности z может быть определена как

$$\Phi(z) = \left\lfloor \log_2 \left(\frac{2^N - 1}{\text{НОД}(S(2), 2^N - 1)} \right) \right\rfloor,$$

где $\lfloor x \rfloor$ — наибольшее целое число, что меньше или равно x . Таким образом, исследование 2-адической сложности сводится к нахождению наибольшего общего делителя двух чисел. Далее, в [10] предложена другая мера оценки непредсказуемости бинарной последовательности, а именно симметричная 2-адическая сложность последовательности, определяемая как $\bar{\Phi}(z) = \min(\Phi(z), \Phi(\tilde{z}))$, где последовательность $\tilde{z}$ задается как $\tilde{z} = (z_{N-1}, z_{N-2}, \dots, z_0)$. Согласно [10], для оценки секретности последовательности ее симметричная 2-адическая сложность предпочтительнее.

В этой статье изучим 2-адическую и симметричную 2-адическую сложность бинарных последовательностей из [1]. Часть результатов была представлена в [11]. Ранее в [12] показано, что эти последовательности обладают высокой линейной сложностью.

Определение последовательности

Напомним определение последовательностей из [1]. Пусть q — простое число, такое что $q \equiv 1 \pmod{4}$ и g — примитивный корень по модулю q . По определению положим, что $D_0 = \{g^{4s} \bmod q; s = 1, \dots, (q-1)/4\}$ и $D_n = g^n D_0, n = 1, 2, 3$. Тогда D_0 — класс биквадратичных вычетов по модулю q , а D_n — его классы смежности в мультипликативной группе обратимых элементов кольца классов вычетов по модулю q . Классы вычетов $D_n, n = 0, 1, 2, 3$ также называются циклотомическими классами четвертого порядка по модулю q [13].

Отображение $\phi(a) = (a \bmod 4, a \bmod q)$ является изоморфизмом кольца классов вычетов $\mathbb{Z}_{4q}$ по модулю $4q$ и прямого произведения колец $\mathbb{Z}_4 \times \mathbb{Z}_q$. Рассмотрим последовательность, определенную как в [1], по правилу

$$z_i = \begin{cases} 1, & \text{если } i \bmod q \in C, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (1)$$

для $C = \phi^{-1}(\{0\} \times (D_l \cup D_m) \cup \{1\} \times (D_l \cup D_k) \cup \{2\} \times (D_m \cup D_n) \cup \{3\} \times (D_l \cup D_m) \cup G \times \{0\})$, где l, m, n и k попарно различные индексы между 0 и 3, $G = \{0, 2\}$ или

$G = \{1, 3\}$. Согласно [1], последовательность z имеет период $4q$ и оптимальную автокорреляционную магнитуду при $q = x^2 + 4$ и $(l, m, n, k) = (0, 1, 2, 3); (0, 3, 2, 1); (2, 3, 0, 1); (1, 0, 3, 2); (1, 2, 3, 0); (2, 1, 0, 3); (3, 0, 1, 2); (3, 2, 1, 0)$.

Из представления $q = x^2 + 4, x \equiv 1 \pmod{4}$ в виде суммы квадратов двух целых чисел следует, что $q \equiv 5 \pmod{8}$.

Следующее утверждение является основным результатом статьи.

Теорема 1. Пусть z — бинарная последовательность с периодом $4q$, определенная по формуле

(1) для $q = x^2 + 4$, где $x \equiv 1 \pmod{4}$ и

$$(l, m, n, k) = (0, 1, 2, 3); (0, 3, 2, 1); (2, 3, 0, 1); (1, 0, 3, 2); (1, 2, 3, 0); (2, 1, 0, 3); (3, 0, 1, 2); (3, 2, 1, 0).$$

Тогда ее симметричная 2-адическая сложность равна $\bar{\Phi}(z) = 4q - 3$ для $q > 5$ и $\bar{\Phi}(z) = 4q - 5$ для $q = 5$.

Согласно теореме 1 рассматриваемые последовательности обладают высокой симметричной 2-адической сложностью.

Для доказательства теоремы воспользуемся методом, изложенным во введении, а именно покажем, что $\bar{\Phi}(z) = \left\lfloor \log_2 \left(\frac{2^{4q} - 1}{5} \right) \right\rfloor$ для $q > 5$ и $\bar{\Phi}(z) = \left\lfloor \log_2 \left(\frac{2^{20} - 1}{25} \right) \right\rfloor$ для $q = 5$, что равносильно утверждению теоремы 1.

Согласно введению, для доказательства последних двух формул достаточно изучить $\text{НОД}(S_z(2), 2^{4q} - 1)$, $\text{НОД}(S_{\tilde{z}}(2), 2^{4q} - 1)$, где $S_z(X) = \sum_{i=0}^{4q-1} z_i X^i \in \mathbb{Z}[X]$ и $S_{\tilde{z}}(X) = \sum_{i=0}^{4q-1} \tilde{z}_i X^i \in \mathbb{Z}[X]$. С этой целью рассмотрим далее обобщенные гауссовы суммы, введенные в [14].

Обобщенные гауссовы суммы и их свойства

Гауссовы суммы, определяемые как $\eta_t = \sum_{i \in D_t} \alpha^i, t = 0, 1, 2, 3$, где α — комплексный или алгебраический корень q -й степени из единицы, широко применяются при исследовании линейной сложности циклотомических и обобщенных циклотомических последовательностей, а также 2-адической сложности [12, 13, 9]. В [14] при исследовании 2-адической сложности бинарных последовательностей из [15] предложены обобщенные гауссовы суммы, когда рассматриваются суммы по циклотомическим классам степеней 2, а не комплексных или алгебраических корней q -й степени из единицы. В этом разделе изучим некоторые свойства обобщенных гауссовых сумм, рассмотренных ранее в [14], только здесь будем рассматривать их над $\mathbb{Z}_{2^{4q-1}}$ — кольцом классов вычетов по модулю $16^q - 1$, а не над $\mathbb{Z}_{2^{2q-1}}$, как в [14].

Пусть $\zeta_t = \sum_{i \in D_t} 16^i, t = 0, 1, 2, 3$. Тогда $\zeta_0 + \zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3 \equiv -1 \pmod{(16^q - 1)/15 - 1}$.

Лемма 2. Если $a = 0, 1, 2, 3$ и $q \equiv 5 \pmod{8}$, то

$$\sum_{t \in \{a\} \times D_i} 2^t \equiv 2^{aq} \zeta_{j-2} \pmod{2^{4q} - 1}.$$

Доказательство. Если $t = \phi^{-1}(a, b)$, тогда $t \equiv qa + (q+3)3^{-1}b \pmod{4q}$, где 3^{-1} — обратный элемент к 3 по модулю q . В самом деле, $t \equiv a \pmod{4}$ и $t \equiv b \pmod{q}$ для $q \equiv 1 \pmod{4}$. Следовательно,

$$\sum_{t \in \{a\} \times D_i} 2^t \equiv 2^{aq} \sum_{b \in D_i} 2^{(q+3)3^{-1}b} \pmod{2^{4q} - 1}.$$

Для любого числа $b \in D_i$ при $q \equiv 5 \pmod{8}$ существует элемент $c \in D_{i-2}$, такой, что $b \equiv 4c \pmod{q}$. Тогда $(q+3)b \equiv 4(q+3)c \pmod{4q}$ и

$$\sum_{b \in D_i} 2^{(q+3)3^{-1}b} \equiv \sum_{c \in D_{i-2}} 16^{(q+3)3^{-1}c} \equiv \sum_{c \in D_{i-2}} 16^c \pmod{2^{4q} - 1}.$$

Утверждение леммы следует из последнего сравнения.

Следствие 3. $\sum_{t \in \{a\} \times D_i} 2^t \equiv 2^a (q-1)/4 \pmod{5}$.

Пусть $\omega_i = \sum_{t \in D_i \cup D_{i+2}} 16^t, i = 0, 1$. Тогда по определению видим, что $\omega_0 = \zeta_0 + \zeta_2$, $\omega_1 = \zeta_1 + \zeta_3$ и $\omega_0 + \omega_1 \equiv -1 \pmod{(16^q - 1)/15}$.

Обозначим через χ квадратичный характер $GF(q)$ — конечного поля порядка q и определим $H = \omega_0 - \omega_1 = \sum_{i \in GF^*(q)} 16^i \chi(i)$. Тогда, как в [14], получаем следующее утверждение.

Лемма 4. $H^2 \equiv q - (16^q - 1)/15 \pmod{16^q - 1}$.

Далее, рассмотренные свойства обобщенных гауссовых сумм будут применяться при исследовании $\text{НОД}(S_z(2), 2^{4q} - 1)$, $\text{НОД}(S_{\bar{z}}(2), 2^{4q} - 1)$.

Симметричная 2-адическая сложность последовательности

В этом разделе докажем теорему 1. Рассмотрим первые два случая, когда $(l, m, n, k) = (0, 1, 2, 3)$ и $(l, m, n, k) = (1, 0, 3, 2)$. Прежде всего, заметим, что $S_z(2) \equiv 2 + 2^q \pmod{3}$ или $S_z(2) \equiv 2^q + 2^{3q} \pmod{3}$. Следовательно, 3 не является делителем $S_z(2)$ и $S_{\bar{z}}(2)$.

Далее, согласно следствию 3 справедливо следующее сравнение:

$$S_z(2) \equiv \sum_{i \in G} 2^i + (1 + 2^q + 2^{2q} + 2^{3q})(q-1)/2 \pmod{5}.$$

Следовательно, $S_z(2) \equiv 0 \pmod{5}$, так как $2^{2q} \equiv -1 \pmod{5}$ и 5 — делитель $\text{НОД}(16^q - 1, S_z(2))$. Предположим, что 25 делит $2^{2q} + 1$, тогда $2^{4q} \equiv 1 \pmod{25}$. В этом случае $q = 5$. Аналогично, можно показать, что 5 — делитель, а 25 — не делитель $\text{НОД}(16^q - 1, S_{\bar{z}}(2))$ для $q > 5$. Таким образом, случай $q = 5$ необходимо рассмотреть отдельно.

1. Пусть $q > 5$.

Введем вспомогательный многочлен $T_z(x) = \sum_{i=0}^{4q-1} (-1)^{z_i} X^i \in \mathbb{Z}[X]$. Тогда, воспользовавшись соотношением из [6], получаем, что

$$\begin{aligned} & -2S_z(X)T_z(X^{-1}) \equiv \\ & \equiv 4q + \sum_{\tau=1}^{4q-1} A_z(\tau)X^\tau - T(X^{-1}) \sum_{i=0}^{4q-1} X^i \pmod{X^{4q} - 1}, \end{aligned}$$

где $A_z(\tau)$ — периодическая автокорреляционная функция последовательности z .

Из последнего сравнения имеем:

$$-2S_z(2)T_z(2^{-1}) \equiv 4q + \sum_{\tau=1}^{4q-1} A_w(\tau)2^\tau \pmod{2^{4q} - 1}. \quad (2)$$

Согласно [1], для $(l, m, n, k) = (0, 1, 2, 3)$ или $(l, m, n, k) = (1, 0, 3, 2)$ и $q = x^2 + 4y^2$ периодическая автокорреляционная функция последовательности z определяется как:

$$A_z(\tau) = \begin{cases} -4, & \text{если } \tau \pmod{4} = 0, \tau \pmod{q} \neq 0 \text{ или } \tau = q, 3q, \\ -4y, & \text{если } \tau \pmod{4} = 1 \text{ или } 3 \text{ и } \tau \pmod{q} \in D_0 \cup D_2, \\ 0, & \text{если } \tau \pmod{4} = 2, \tau \pmod{q} \neq 0, \\ 4y, & \text{если } \tau \pmod{4} = 1 \text{ или } 3 \text{ и } \tau \pmod{q} \in D_1 \cup D_3, \\ 4, & \text{если } \tau = 2q. \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, по лемме 2, формулам (2) и (3) получаем, что

$$\begin{aligned} & -2S_z(2)T_z(2^{-1}) \equiv 4q - 4 \cdot 2^q + 4 \cdot 2^{2q} - 4 \cdot 2^{3q} - \\ & - 4(\zeta_0 + \zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3) - 4y(2^q + 2^{3q})(\zeta_0 + \zeta_2) + \\ & + 4y(2^q + 2^{3q})(\zeta_1 + \zeta_3) \pmod{2^{4q} - 1} \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} & -2S_z(2)T_z(2^{-1}) \equiv 4q - 4 \cdot 2^q + 4 \cdot 2^{2q} - 4 \cdot 2^{3q} - \\ & - 4((16^q - 1)/15 - 1) - 4y(2^q + 2^{3q})H \pmod{2^{4q} - 1}. \quad (4) \end{aligned}$$

По условию $|y| = 1$. Пусть d — простой делитель $\text{НОД}(16^q - 1, S_z(2))$. Далее, рассмотрим два случая.

а) Пусть d делит $2^q - 1$ и $d > 5$. В этом случае, согласно формуле (4), $q \equiv 2yH \pmod{d}$. Следовательно, по лемме 4 имеем, что $q^2 \equiv 4q \pmod{d}$ и $q \equiv 4 \pmod{d}$. Последнее сравнение невозможно.

б) Пусть d делит $2^q + 1$ и $d > 5$. Здесь, согласно соотношению (4), $q + 4 \equiv 2yH \pmod{d}$. Следовательно, по лемме 4 видим, что $q^2 + 8q + 16 \equiv 4q \pmod{d}$ и $q^2 + 4q + 16 \equiv 0 \pmod{d}$. Так как d — простое, то $d = 1 + 2jq, j \geq 1$ и

$$0 \equiv 2j(q^2 + 4q + 16) \equiv -q - 4 + 32j \pmod{d}.$$

Здесь число $q + 4$ — нечетное, значит $-q - 4 + 32j = (1 + 2f)(1 + 2jq)$, $j \in \mathbb{Z}$. Тогда $f = 0$, $q = 13, j = 3$ и $d = 73$. Но 73 не делит $2^{13} + 1$ и получаем противоречие.

Далее, последовательность $\tilde{z}$ на периоде равна $z_{4q-1}, \dots, z_1, z_0$, следовательно, $A_{\tilde{z}}(\tau) = A_z(-\tau)$. По условию, $q \equiv 5 \pmod{5}$, значит $-\tau \pmod{q} \in D_{i+2}$, если

14. Zhang L., Zhang J., Yang M., Feng K. On the 2-Adic Complexity of the Ding-Helleseth-Martinsen Binary Sequences // IEEE Trans. Inform. Theory. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIT.2020.2964171>
15. Ding C., Helleseeth T., Martinsen H. New families of binary sequences with optimal three-valued autocorrelation // IEEE Trans. Inf. Theory. 2001. V.47(1). P.428-433.

References

1. Sun Y., Shen H. New Binary Sequences of Length $4p$ with Optimal Autocorrelation Magnitude // Ars Combinatoria (A Canadian Journal of Combinatorics). 2008. V. LXXXIX (89). P.255-262.
2. Lidl R., Niederreiter H. Finite Fields. Addison-Wesley, 1983, 812 p. (Rus. ed.: Konechnye polya. Moscow, Mir Publ., 1988. 820 p).
3. Klapper A., Goresky M. Feedback shift registers, 2-adic span, and combiners with memory. Journal of Cryptology, 1997, vol.10, pp.111-147.
4. Klapper A., Goresky M. Cryptanalysis based on 2-adic rational approximation. LNCS, 1995, vol.963, pp.262-273.
5. Sun Y., Wang Q., Yan T. The exact autocorrelation distribution and 2-adic complexity of a class of binary sequences with almost optimal autocorrelation. Cryptography and Communications, 2018, vol.10 (3), pp.467-477.
6. Sun Y., Yan T., Chen Z. The 2-adic complexity of a class of binary sequences with optimal autocorrelation magnitude. Cryptography and Communications, 2020, vol.12, pp.675-683.
7. Xiao Z., Zeng X., Sun Z. 2-Adic complexity of two classes of generalized cyclotomic binary sequences. International Journal of Foundations of Comput. Sci., 2016, vol.27 (7), pp.879-893.
8. Xiong H., Qu L., Li C. A new method to compute the 2-adic complexity of binary sequences. IEEE Trans. Inform. Theory, 2014, vol.60, pp.2399-2406.
9. Xiong H., Qu L., Li C. 2-Adic complexity of binary sequences with interleaved structure. Finite Fields and Their Applications, 2015, vol.33, pp.14-28.
10. Hu H., Feng D. On the 2-adic complexity and the k -error 2-adic complexity of periodic binary sequences. IEEE Trans. Inf. Theory, 2008, vol.54(2), pp.874-883.
11. Edemskiy V.A., Antonova O.V. On symmetric 2-adic complexity of binary sequences based on biquadratic residues. Mathematical methods in engineering and technology: Proc. of int. conf. Saint Petersburg, Publishing house of Polytechnic university, 2020, vol.12 (2), pp.79-81.
12. Lineynaya slozhnost' obobshchennykh tsiklotomicheskikh posledovatel'nostey s periodom $2mpn$ [Linear complexity of generalized cyclotomic sequences with period $2mpn$]. Prikladnaya diskretnaya matematika, 2012, no.3(17), pp.5-12.
13. Cusick T., Ding C., Renvall A. Stream Ciphers and Number Theory. Elsevier Science, 2004. 492 p.
14. Zhang L., Zhang J., Yang M., Feng K. On the 2-Adic Complexity of the Ding-Helleseth-Martinsen Binary Sequences // IEEE Trans. Inform. Theory. 2020. DOI:10.1109/TIT.2020.2964171
15. Ding C., Helleseeth T., Martinsen H. New families of binary sequences with optimal three-valued autocorrelation. IEEE Trans. Inf. Theory, 2001, vol.47(1), pp.428-433.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ В ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СПЕКТРОЗОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ, ИМЕЮЩЕЙ ПЕРЕКРЫВАЮЩИЕСЯ УЧАСТКИ ЗОН РЕГИСТРАЦИИ ЛУЧИСТЫХ ПОТОКОВ

М.А.Калитов, Н.П.Корнышев

SIGNALS TRANSFORMATION IN THE MULTISPECTRAL TELEVISION SYSTEM WITH OVERLAPPING SPECTRAL RANGES

M.A.Kalitov, N.P.Kornyshev

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Nikolai.Kornyshev@novsu.ru

Обсуждаются вопросы математического описания дифференциального, мультипликативного и комбинированного методов цифровой обработки спектрозональных изображений. Описывается методика проведения эксперимента по качественной и количественной сравнительной оценке изображений. Приводятся результаты качественной и количественной оценки изображений, получаемых при различных вариантах обработки. Анализируется соответствие значений цветовых коэффициентов при использовании различных методов цифровой обработки спектрозональных изображений. Делается вывод о соответствии математического описания сигнальных процессов в телевизионной спектрозональной системе, имеющей перекрывающиеся участки зон регистрации лучистых потоков, результатам экспериментального исследования.

Ключевые слова: спектрозональная визуализация, обработка спектрозональных изображений

Для цитирования: Калитов М.А., Корнышев Н.П. Преобразование сигналов в телевизионной спектрозональной системе, имеющей перекрывающиеся участки зон регистрации лучистых потоков // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С.52-59. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).52-59](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).52-59)

The issues of mathematical description of differential, multiplicative, and combined methods of digital processing of multispectral images are discussed. The method of conducting an experiment on the qualitative and quantitative comparative evaluation of images is described. The results of qualitative and quantitative evaluation of images obtained with various processing options are presented. The correspondence of the values of the color coefficients is evaluated when using various methods of digital processing of multispectral images. It is concluded that the mathematical description of signal processes in a television multispectral system with overlapping areas of the registration zones of radiant fluxes corresponds to the results of experimental research.

Keywords: multispectral imaging, multispectral image processing

For citation: Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Signals transformation in the multispectral television system with overlapping spectral ranges // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.52-59. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).52-59](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).52-59)

Методы цифровой обработки спектрозональных изображений, полученных в перекрывающихся участках зон регистрации лучистых потоков, позволяют извлечь дополнительную визуальную информацию об этих участках. Известен ряд таких методов, основанных, в частности, на вычитании (дифференциальные методы) [1-6] и перемножении (мультипликативные методы) [7-9] исходной пары цифровых телевизионных спектрозональных изображений. Однако данные методы получены в основном эвристически, и их теоретическое обоснование, в том числе математическое описание, в литературе освещены недостаточно. Недостаточной является также и экспериментальная проверка теоретических исследований в данном вопросе.

Целью настоящей статьи является ознакомление с результатами теоретических и экспериментальных исследований сигнальных процессов в телевизионной спектрозональной системе, имеющей перекрывающиеся участки зон регистрации лучистых потоков, при использовании дифференциальных и мультипликативных методов спектрозональной визуализации, а также экспериментальная проверка полученных выражений.

зации, а также экспериментальная проверка полученных выражений.

Теоретическая часть

Рассмотрим сигнальные процессы в телевизионной спектрозональной системе, имеющей перекрывающиеся участки зон регистрации лучистых потоков при общем диапазоне спектральной чувствительности фотоприемника $\Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$.

Воспользуемся выражением для полного потока элемента фотоприемника [10]:

$$i = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varepsilon_{A/W}(\lambda) P_W(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{A/W}(\lambda)$ [А/Вт] — характеристика спектральной чувствительности фотоприемника, а $P_W(\lambda)$ [Вт] — характеристика спектральной мощности источника излучения.

С учетом нормировки характеристик:

$$0 \leq \varepsilon(\lambda) = \frac{\varepsilon_{A/W}(\lambda)}{\varepsilon_{\max}} \leq 1 \text{ и } 0 \leq P(\lambda) = \frac{P_W(\lambda)}{P_{\max}} \leq 1,$$

где $\varepsilon_{\max}$ — максимальная чувствительность фотоприемника, $P_{\max}$ — максимальная мощность источника излучения, выражение (1) имеет вид:

$$i = \varepsilon_{\max} P_{\max} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varepsilon(\lambda) P(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

Поскольку функция $\varepsilon(\lambda)$ интегрируема на интервале $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$, а функция $P(\lambda) \geq 0$, то воспользуемся теоремой о среднем [11] и перепишем (2) следующим образом:

$$i = i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P(\lambda) d\lambda,$$

где $i_0 = \varepsilon_{\max} P_{\max} \varepsilon_{\text{ср}}$.

Тогда электрические сигналы (фототоки), получаемые в двух перекрывающихся участках зон регистрации лучистых потоков при помощи одного и того же фотоприемника, можно выразить в следующем виде:

$$i_1 = i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda \quad \text{и} \\ i_2 = i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda,$$

где $P_1(\lambda)$ — характеристика спектральной мощности источника излучения в диапазоне от λ_1 до $\lambda_{\max}$, $P_2(\lambda)$ — характеристика спектральной мощности источника излучения в диапазоне от λ_2 до $\lambda_{\max}$, причем $\lambda_{\min} \leq \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_{\max}$, а $P_1(\lambda) \neq P_2(\lambda)$.

Рассмотрим сигнальные процессы дифференциального [1-6] метода, при котором имеем:

$$i = i_1 - i_2 = i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda.$$

Покажем, что инверсия $\overline{i_2}$ сигнала i_2 соответствует инверсии $\overline{P_2(\lambda)}$ спектральной характеристики $P_2(\lambda)$ лучистого потока с точностью до постоянной величины C . Здесь подразумевается, что $\overline{i_2} = i_W - i_2$, где $i_W = \text{const}$ — уровень «белого» в сигнале изображения, соответствующий, в частности, значению 255 относительных единиц для восьмиразрядного цифрового кодирования.

В этом случае должно выполняться соотношение:

$$i = i_1 - i_2 = i_1 + \overline{i_2} = i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [P_1(\lambda) + \overline{P_2(\lambda)}] d\lambda + C. \quad (3)$$

Заметим, что, с одной стороны:

$$i = i_1 - i_2 = i_1 + \overline{i_2} - i_W,$$

а с другой стороны:

$$\overline{P_2(\lambda)} = 1 - P_2(\lambda).$$

Тогда интеграл в правой части выражения (3) может быть переписан в следующем виде:

$$i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \{P_1(\lambda) + [1 - P_2(\lambda)]\} d\lambda = \\ = i_0 \left\{ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [1 - P_2(\lambda)] d\lambda \right\}$$

или

$$i_0 \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} d\lambda \right] = \\ = i_1 - i_2 + (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) = i_1 + \overline{i_2} + C,$$

где $C = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) - i_W$.

Таким образом, правая часть выражения (3) соответствует его левой части, что и требовалось доказать.

Рассмотрим аналогичным образом сигнальные процессы для мультипликативного [7-9] метода, при котором спектрозональный сигнал формируется по формуле:

$$i = \overline{i_1} \times i_2 = \left[i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda \right] \times \left[i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right].$$

Известно, что в общем случае справедливо:

$$\left[i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda \right] \times \left[i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right] \neq i_0^2 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) P_2(\lambda) d\lambda.$$

Рассмотрим отдельно интеграл в правой части данного неравенства. Обе функции $P_2(\lambda)$ и $\overline{P_1(\lambda)}$ интегрируемы на интервале $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$, причем $0 \leq P_2(\lambda) \leq 1$ и $0 \leq \overline{P_1(\lambda)} \leq 1$.

Таким образом, возможно использование теоремы о среднем, согласно которой в данном случае, с одной стороны:

$$\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \overline{P_1(\lambda)} P_2(\lambda) d\lambda = \mu_1 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \overline{P_1(\lambda)} d\lambda, \quad (4)$$

а с другой стороны:

$$\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \overline{P_1(\lambda)} P_2(\lambda) d\lambda = \mu_2 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda, \quad (5)$$

где $0 \leq \mu_1 \leq 1$ и $0 \leq \mu_2 \leq 1$.

Перемножив, соответственно, левые и правые части равенств (4) и (5) получим:

$$\left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \overline{P_1(\lambda)} P_2(\lambda) d\lambda \right]^2 = \mu_1 \mu_2 \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \overline{P_1(\lambda)} d\lambda \times \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right].$$

Таким образом, для мультипликативного метода справедливо:

$$i = \overline{i_1} \times i_2 = A i_0^2 \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \overline{P_1(\lambda)} P_2(\lambda) d\lambda \right]^2, \quad \text{где } A = \frac{1}{\mu_1 \mu_2}. \quad (6)$$

Однако электрический сигнал от лучистого потока, получаемого, например, при комбинации свето-

фильтров со спектральными характеристиками, соответствующими $P_1(\lambda)$ и $\overline{P_2(\lambda)}$, определяется выражением:

$$i_{1,2} = i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) P_2(\lambda) d\lambda,$$

которое исходит из того, что общий коэффициент пропускания последовательно расположенных оптических сред равен произведению коэффициентов пропускания этих сред [12].

Следовательно, для получения соответствия электрического сигнала реальному лучистому потоку необходима следующая коррекция выражения (6): $i_{\text{вых}} = N\sqrt{i}$, где $N \leq 1$ — нормирующий множитель, обеспечивающий требуемый динамический диапазон изменения выходного сигнала.

Для инверсии выходного сигнала необходимо дополнительно выполнить $\overline{i_{\text{вых}}} = i_W - i_{\text{вых}}$.

Рассмотрим аналогичным образом сигнальные процессы для комбинированного (мультипликативно-дифференциального) метода [13], при котором спектральный сигнал формируется по формуле:

$$i = i_1 \times i_2 + i_2 \times i_1, \quad (7)$$

с последующей нормировкой, обеспечивающей требуемый динамический диапазон изменения выходного сигнала.

В этом случае, с одной стороны, справедливо:

$$\overline{i_1 \times i_2} = (i_W - i_2) \times i_1, \quad \overline{i_2 \times i_1} = (i_W - i_1) \times i_2 \quad \text{и} \quad \overline{i_2 \times i_1} = i_W - i_2 \times i_1.$$

Следовательно:

$$i = i_W \times (i_1 - i_2 + 1) = i_W \left\{ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [P_1(\lambda) - P_2(\lambda)] d\lambda + 1 \right\}.$$

Из полученного соотношения следует, что результат вычислений по формуле (7) после соответствующей нормировки, обеспечивающей требуемый динамический диапазон изменения выходного сигнала, соответствует результату, получаемому дифференциальным методом по формуле (3) при дополнительном усилении (линейной яркостной коррекции) получаемого разностного сигнала.

С другой стороны, с учетом выражения (6) справедливо:

$$\begin{aligned} i &= i_1 \times i_2 + i_2 \times i_1 = Ai_0^2 \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) P_2(\lambda) d\lambda \right]^2 + \\ &+ \left\{ i_W - Ai_0^2 \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) \overline{P_1(\lambda)} d\lambda \right]^2 \right\} \quad \text{или} \\ i &= Ai_0^2 \left\{ \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) \overline{P_2(\lambda)} d\lambda \right]^2 - \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) \overline{P_1(\lambda)} d\lambda \right]^2 \right\} + i_W \quad \text{или} \\ i &= Ai_0^2 \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) \overline{P_2(\lambda)} d\lambda + \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) \overline{P_1(\lambda)} d\lambda \right] \times \\ &\times \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) \overline{P_2(\lambda)} d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) \overline{P_1(\lambda)} d\lambda \right] + i_W. \end{aligned}$$

Поскольку $\overline{P_1(\lambda)} = 1 - P_1(\lambda)$ и $\overline{P_2(\lambda)} = 1 - P_2(\lambda)$, имеем:

$$\begin{aligned} i &= Ai_0^2 \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - 2 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) P_2(\lambda) d\lambda + \right. \\ &+ \left. \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right] \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right] + i_W. \end{aligned}$$

Обозначив через $I_1 = \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - 2 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) P_2(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right]$ и $I_2 = \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right]$, запишем:

$$i = Ai_0^2 I_1 I_2 + i_W.$$

Поскольку сигнал яркости униполярен, и нас интересуют его положительные значения, в дальнейшем будем рассматривать значения I_1 и I_2 по абсолютной величине.

Рассмотрим модуль I_1 , для которого в данном случае можно записать неравенство:

$$\left| \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right| \leq |I_1| \leq \left| \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right|^2.$$

Тогда для произведения $|I_1 I_2|$ будет справедливо неравенство:

$$\begin{aligned} \left| \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right|^2 &\leq |I_1 I_2| \leq \\ &\leq \left| \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right|^3. \end{aligned} \quad (8)$$

С учетом (8) запишем:

$$\begin{aligned} Ai_0^2 \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right]^2 + \\ + i_W \leq i \leq Ai_0^2 \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right]^3 + i_W. \end{aligned} \quad (9)$$

Из полученного соотношения следует, что результат вычислений по формуле (7) после соответствующей нормировки, обеспечивающей требуемый динамический диапазон изменения выходного сигнала, соответствует результату, получаемому дифференциальным методом по формуле (3), и отличается нелинейным усилением получаемого разностного сигнала.

Таким образом, эквивалентный результат можно получить тремя способами:

1) вычислением по формуле (3) с дополнительной линейной яркостной коррекцией;

2) вычислением по формуле (3) с последующим возведением в степень $2 \leq b \leq 3$ в соответствии с (9) и нормировкой, обеспечивающей требуемый динамический диапазон изменения выходного сигнала;

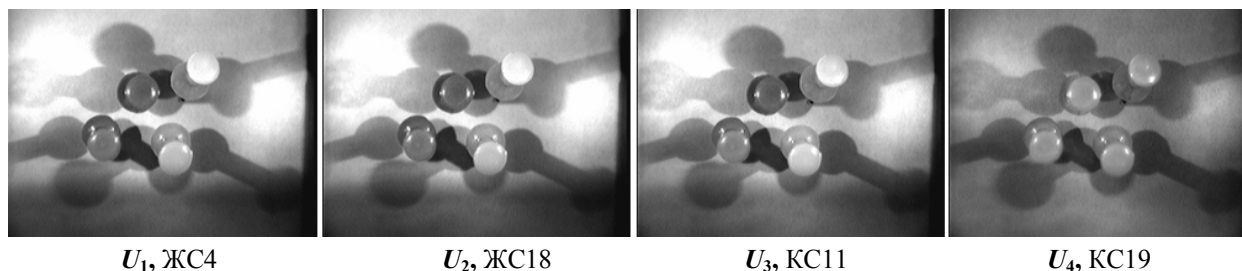


Рис.1. Спектрональные изображения U_1 , U_2 , U_3 , U_4 , полученные при помощи стандартных светофильтров ЖС4, ЖС18, КС11, КС19

3) вычислением комбинированным методом по формуле (7) с последующей нормировкой.

Таким образом, в отличие от дифференциального метода при комбинированном методе дополнительная яркостная коррекция получаемого разностного сигнала обеспечивается автоматически.

Экспериментальная часть

В основе методики эксперимента лежит качественная и количественная сравнительная оценка изображений, получаемых при различных вариантах обработки исходных спектрональных изображений [2,4,5]. При качественной оценке требуется визуальное сравнение изображений, получаемых при оптическом выделении спектральных потоков и при цифровой обработке соответствующих спектрональных изображений. В идеале изображение, полученное оптическим выделением спектрального потока в интервале длин волн $[\lambda_1, \lambda_2]$, должно визуально восприниматься одинаково с изображением, полученным путем цифровой обработки пары спектрональных изображений с перекрывающимися зонами регистрации в данном интервале длин волн $[\lambda_1, \lambda_2]$.

Для такого однозначного сравнения необходимо при оптическом выделении спектральных потоков использовать в большинстве случаев специальные оптические светофильтры, в частности узкополосные интерференционные фильтры, которые далеко не всегда имеются в распоряжении исследователя. Однако эффективность того или иного метода цифровой обработки пары спектрональных изображений с перекрывающимися зонами регистрации можно проверить на частном случае и распространить его на общий случай.

Так, в частном случае, для получения рассмотренными выше методами цифровой обработки сигналов синего — B (400-500 нм), зеленого — G (500-600 нм) и красного — R (600-700 нм) участков видимой области спектра можно использовать соответствующие пары спектрональных изображений: $[U_1$ (ЖС4), U_2 (ЖС18)], $[U_2$ (ЖС18), U_3 (КС11)] и $[U_3$ (КС11), U_4 (КС19)], получаемые в широких зонах регистрации при помощи стандартных цветных стекол, спектральные характеристики которых обеспечивают «отрезание» участков области спектра от 400, 500, 600 и 700 нм (рис.1,2).

Суть качественной оценки эффективности метода цифровой обработки пар спектрональных изображений с перекрывающимися зонами регистрации в данном случае сводилась к оценке качества цвето-

передачи тестовых объектов по синтезируемому цветному изображению из соответствующих сформированных изображений синего — B (400-500 нм), зеленого — G (500-600 нм) и красного — R (600-700 нм) участков видимой области спектра.

Как известно, каждой длине волны излучения соответствует свой воспринимаемый глазом человека цвет. Несмотря на то, что обратное утверждение о том, что каждому наблюдаемому цвету соответствует излучение строго определенной длины волны, в общем случае не является верным, поскольку существуют, в частности, так называемые, метамерные красители, в данном конкретном случае можно рассчитывать на соответствие цвета визуализируемого объекта выделяемому участку спектра потока излучения.

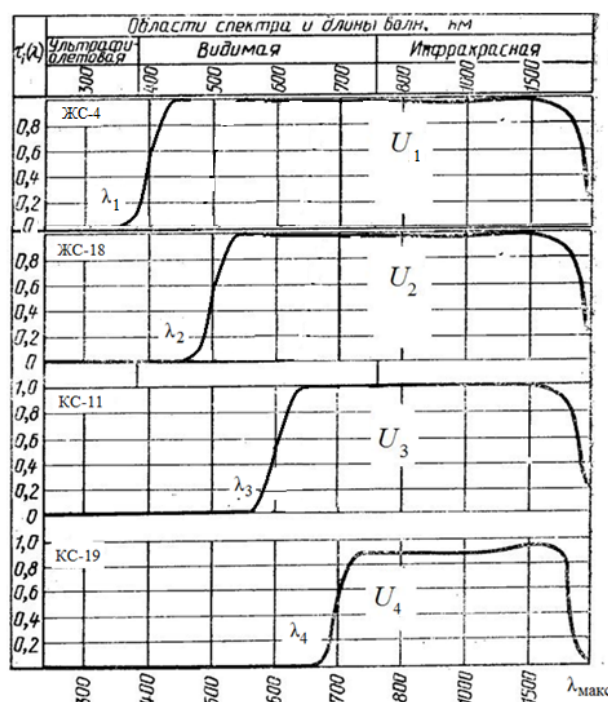


Рис.2. Спектральные характеристики стандартных светофильтров ЖС4, ЖС18, КС11, КС19

На рис.3.1 показаны изображения, RGB компоненты которых сформированы мультипликативным методом из исходных спектрональных изображений, приведенных на рис.1, при нормировании сигнала с коэффициентом $N = i_{\max}/i_H$, а на рис.3.2 при формировании выходного сигнала по формуле (6) и извлечением корня квадратного. На рис.3.3 показано изображение 3.1 после дополнительной цветовой коррекции (баланс белого).

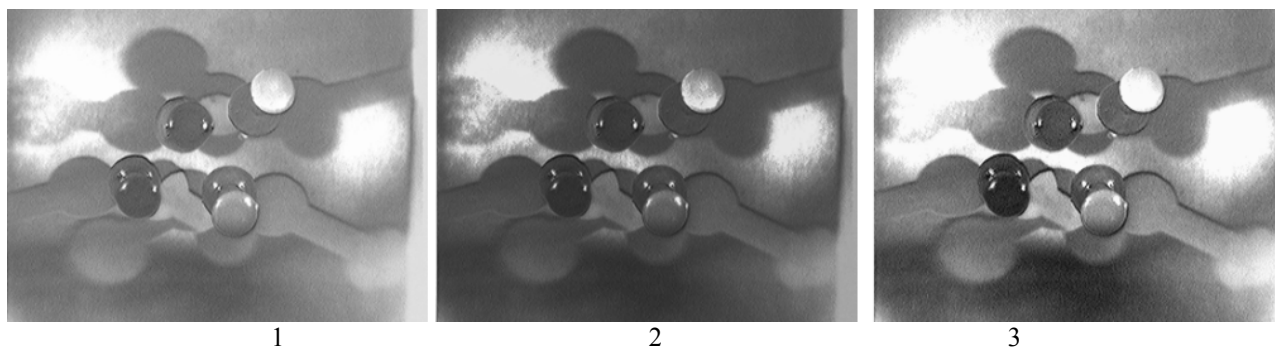


Рис.3. *RGB* изображения: 1 — при формировании спектральных компонент мультипликативным методом с нормировкой, 2 — и при формировании выходного сигнала по формуле (6), 3 — изображение 1 после цветовой коррекции

На рис.4.1 показано изображение, *RGB* компоненты которого сформированы по дифференциальному методу без яркостной коррекции, а на рис.4.2 показано это же изображение после линейной яркостной коррекции с предельными нижним и верхним пороговыми уровнями, 0,4 и 0,6 соответственно, при которых отсутствует ограничение полезного сигнала. На рис.4.3 приведено реальное *RGB* изображение объектов, полученное при помощи цветной телевизионной камеры.

Ниже показаны изображения, *RGB* компоненты которых сформированы комбинированным методом по формуле (7) — рис.5.1, по формуле (9) при $b = 2$ — рис.5.2 и при $b = 3$ — рис.5.3.

Количественная оценка заключалась в определении уровней *RGB* сигналов для участков изображений, соответствующих синему (*B*), зеленому (*G*), красному (*R*), желтому (*Ye*) объектам и белому (*W*) фону и вычислении цветовых коэффициентов r , g и b . Приведенные в табл.1 и 2 результаты были получены при использовании пакета Matlab. Участки изображения выделялись последовательно вручную при использовании стандартной функции выделения фрагмента изображения $f = imcrop$. Для выделенных фрагментов вычислялась средняя яркость и цветовые коэффициенты по формулам: $r = R/(R+G+B)$, $g = G/(R+G+B)$, $b = B/(R+G+B)$, где R , G и B — средние значения яркости в соответствующих каналах красного, зеленого и синего.

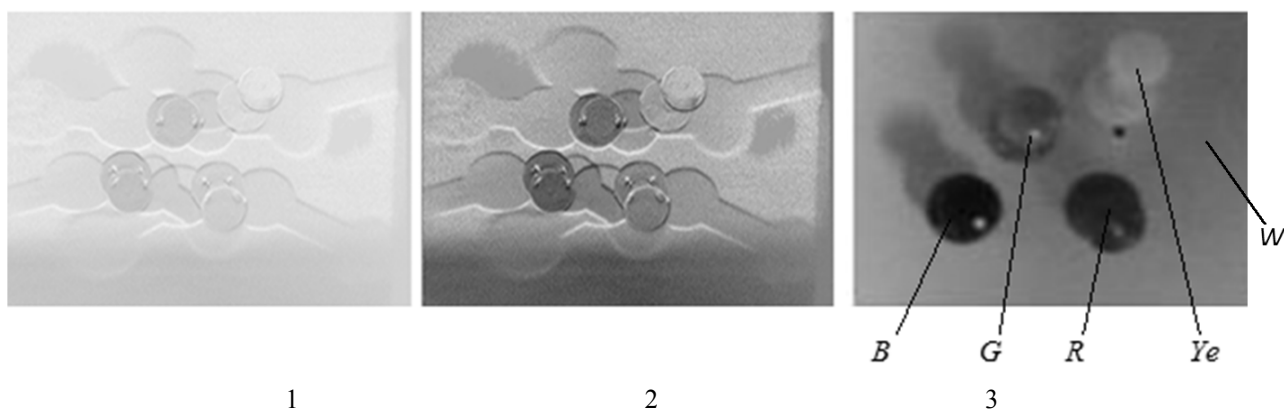


Рис.4. *RGB* изображения: 1 — при формировании спектральных компонент дифференциальным методом без яркостной коррекции, 2 — после линейной яркостной коррекции. 3 — реальное *RGB* изображение объектов

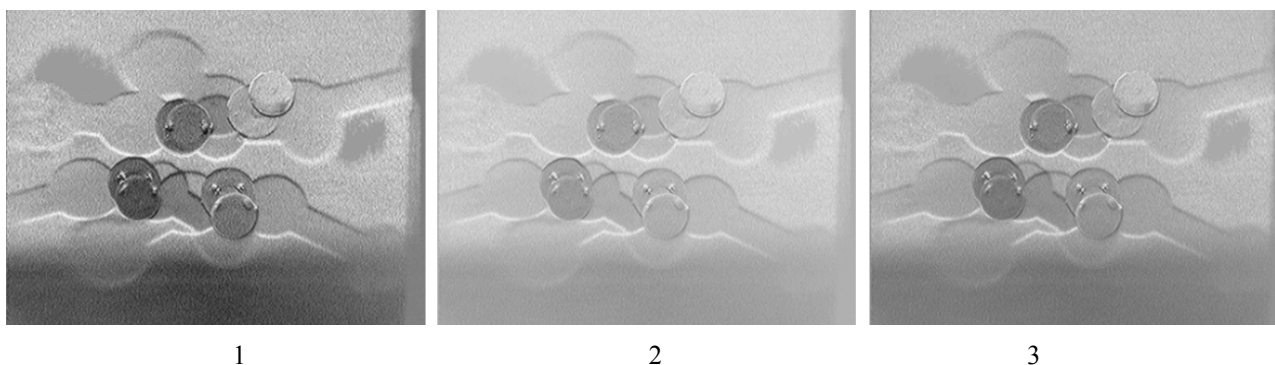


Рис.5. *RGB* изображения при формировании спектральных компонент комбинированным методом: 1 — формула (7), 2 и 3 — формула (9) при $b = 2$ и $b = 3$ соответственно

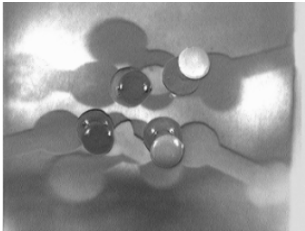
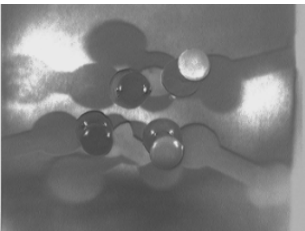
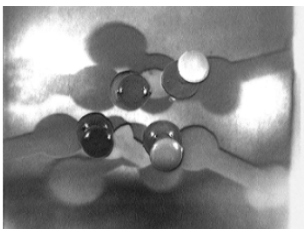
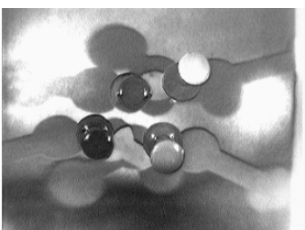
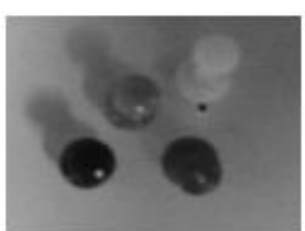
Таблица 1

Значения цветовых коэффициентов на красном — R , зеленом — G , синем — B , желтом — Ye и белом — W участках изображения для дифференциального и комбинированного методов

Метод	Участок	r	g	b	Изображение
Дифф.	R	0,39	0,30	0,31	
ф-ла (3)	G	0,28	0,36	0,36	
	B	0,33	0,33	0,35	
	Ye	0,39	0,32	0,30	
	W	0,39	0,30	0,30	
		r	g	b	
Дифф.	R	0,55	0,18	0,26	
ф-ла (3)	G	0,00	0,52	0,48	
	B	0,29	0,29	0,42	
	Ye	0,47	0,31	0,22	
	W	0,49	0,26	0,25	
		r	g	b	
Дифф.	R	0,44	0,27	0,30	
в соотв. с (9)	G	0,23	0,39	0,38	
	B	0,32	0,32	0,36	
	Ye	0,41	0,32	0,27	
	W	0,42	0,29	0,29	
		r	g	b	
Дифф.	R	0,49	0,23	0,27	
в соотв. с (9)	G	0,18	0,42	0,40	
	B	0,31	0,31	0,37	
	Ye	0,45	0,31	0,25	
	W	0,46	0,27	0,26	
		r	g	b	
Комбинир.	R	0,58	0,16	0,26	
ф-ла (7)	G	0,00	0,52	0,48	
	B	0,27	0,27	0,45	
	Ye	0,46	0,33	0,21	
	W	0,49	0,26	0,25	

Таблица 2

Значения цветовых коэффициентов на красном, зеленом, синем, желтом и белом участках изображения для мультипликативного метода

		<i>r</i>	<i>g</i>	<i>b</i>	
Мультипл.	<i>R</i>	0,43	0,28	0,29	
с нормировкой.	<i>G</i>	0,05	0,49	0,46	
Ф-ла (6)	<i>B</i>	0,31	0,30	0,39	
	<i>Ye</i>	0,32	0,35	0,33	
	<i>W</i>	0,33	0,33	0,33	
		<i>r</i>	<i>g</i>	<i>b</i>	
Мультипл.	<i>R</i>	0,44	0,32	0,25	
по ф-ле (6)	<i>G</i>	0,22	0,46	0,32	
с извлечением	<i>B</i>	0,35	0,37	0,28	
кв. корня	<i>Ye</i>	0,32	0,36	0,32	
	<i>W</i>	0,33	0,34	0,33	
		<i>r</i>	<i>g</i>	<i>b</i>	
Мультипл.	<i>R</i>	0,43	0,27	0,29	
с нормировкой	<i>G</i>	0,00	0,51	0,49	
и ярк. корр.	<i>B</i>	0,00	0,38	0,62	
Ф-ла (6)	<i>Ye</i>	0,32	0,34	0,33	
	<i>W</i>	0,33	0,33	0,33	
		<i>r</i>	<i>g</i>	<i>b</i>	
Мультипл.	<i>R</i>	0,54	0,27	0,20	
с нормировкой,	<i>G</i>	0,00	0,61	0,39	
ярк. корр.	<i>B</i>	0,00	0,46	0,53	
и балансом	<i>Ye</i>	0,37	0,37	0,26	
белого	<i>W</i>	0,37	0,37	0,27	
		<i>r</i>	<i>g</i>	<i>b</i>	
Цветное	<i>R</i>	0,79	0,19	0,02	
изображение	<i>G</i>	0,10	0,85	0,05	
	<i>B</i>	0,17	0,22	0,62	
	<i>Ye</i>	0,49	0,50	0,01	
	<i>W</i>	0,36	0,36	0,29	

Как видно из таблиц, наилучшее соответствие значений цветовых коэффициентов достигается при использовании комбинированного метода, а также мультипликативного метода с нормировкой по яркости и дополнительной яркостной коррекцией. Несмотря на то, что хотя полного соответствия цветному изображению, как показывает качественное и количественное сравнение, при рассмотренных выше методах цифровой обработки достичь не удастся, получаемые изображения, тем не менее, несут дополнительную визуальную информацию о выделяемых узких зонах спектра.

Выводы

1. Математические выражения, описывающие сигнальные процессы при дифференциальном, мультипликативном и комбинированном методе цифровой обработки спектральных изображений, подтверждаются экспериментально.
2. При цифровой обработке пары спектральных изображений, полученных в широких перекрывающихся зонах регистрации, наибольшей эффективностью выделения узкой зоны регистрации обладает мультипликативный и комбинированный метод.

References

1. Сагдуллаев Ю.С., Сагдуллаев Т.Ю. К вопросу выбора зон регистрации в спектрозональном телевидении // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2011. Вып.2. С.20.
2. Корнышев Н.П., Калитов М.А., Сенин А.С. Исследование метода дифференциальной спектрозональной визуализации // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2018. №1(107). С.62–69.
3. Патент RU 2679921 C1. Способ формирования цифровых спектрозональных телевизионных сигналов / М.А.Калитов, Н.П.Корнышев. Заявл. 28.04.2018. Опубл. 14.02.2019. Бюл.5.
4. Калитов М. А., Корнышев Н. П. Повышение точности метода дифференциальной спектрозональной визуализации // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2019. №2(114). С.31–34.
5. Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Computer simulation of digital spectral imaging processes // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol.1352. Article number: 012028. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1352/1/012028>
6. Ваниев А.А., Калитов М.А., Корнышев Н.П. Улучшение изображений, полученных методом дифференциальной спектрозональной визуализации // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2019. №4(116). С.9–12.
7. Калитов М.А., Корнышев Н.П. Компьютерное моделирование мультипликативного метода формирования цифровых спектрозональных изображений // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2020. №2 (118). С.76–78.
8. Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Computer simulation of the multiplicative method for the formation of digital spectrozonal images // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol.1658. Article number: 012023. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1658/1/012023>
9. Патент № 2731880 RU, МПК H04N 7/18. Способ формирования цифровых спектрозональных телевизионных сигналов / Д.И.Борисов, Н.А.Ерганжиев, М.А.Калитов, Н.П.Корнышев. Заявл. 20.01.2020. Опубл. 08.09.2020. Бюл. №25.
10. Халфин А.М. Основы телевизионной техники. М.: Советское радио, 1955. 580 с.
11. Бронштейн И.А., Семендяев К. А. Справочник по математике. М.: Наука, 1986. 544 с.
12. Вильчинская С.С., Лисицин В.М. Оптические материалы и технологии: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. С.12.
13. МПК H04N 7/18. Способ формирования цифровых спектрозональных телевизионных сигналов / М.А.Калитов, Н.П.Корнышев. Заявка №2020138417 от 24.11.2020.
1. Sagdullaev Iu.S., Sagdullaev T.Iu. K voprosu vybora zon registratsii v spektrozonal'nom televidenii [Choice of zones of registration in spectrozonal television]. Voprosy radioelektroniki. Ser. Tekhnika televideniia, 2011, no. 2, p.20.
2. Kornyshev N.P., Kalitov M.A., Senin A.S. Issledovanie metoda differentsial'noi spektrozonal'noi vizualizatsii [Study of the method of differential spectral visualization]. Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2018, no. 1(107), p.62–69.
3. Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Sposob formirovaniia tsifrovyykh spektrozonal'nykh televizionnykh signalov [A method of forming a multispectral digital television signals]. Patent RF no. 2679921 RU, MPK H04N 7/18, 2019.
4. Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Povyshenie tochnosti metoda differentsial'noi spektrozonal'noi vizualizatsii [Accuracy increase of the differential multispectral imaging method]. Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2019, no. 2(114), pp.31–34.
5. Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Sposob formirovaniia tsifrovyykh spektrozonal'nykh televizionnykh signalov [A method of forming a multispectral digital television signals]. Patent RF no. 2679921 RU, MPK H04N 7/18, 2019.
6. Vaniev A.A., Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Uluchshenie izobrazheniy, poluchennykh metodom differentsial'noy spektrozonal'noy vizualizatsii [Accuracy increase of the differential multispectral imaging method]. Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2019, no. 2(114), pp.31–34.
7. Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Komp'yuternoe modelirovanie mul'tiplikativnogo metoda formirovaniya tsifrovyykh spektrozonal'nykh izobrazheniy [Computer simulation of a multiplicative method for generating digital spectral images]. Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2020, no.2 (118), p.76–78.
8. Kalitov M.A. Kornyshev N.P. Computer simulation of digital spectral imaging processes. Journal of Physics: Conference Series, 2019, ser.1352 012028.
9. Borisov D.I., Erganzhev N.A., Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Sposob formirovaniia tsifrovyykh spektrozonal'nykh televizionnykh signalov [A method of forming a multispectral digital television signals]. Patent RF no. 2731880 RU, MPK H04N 7/18. Application: 20.01.2020 Published: 08.09.2020. Bull. no.25.
10. Khalfin A.M. Osnovy televizionnoy tekhniki [Fundamentals of Television Technology]. Moscow, Sovetskoe radio, 1955, p.86.
11. Bronshteyn, I. A. Spravochnik po matematike [Reference book in mathematics]. Moscow, Nauka, 1986. 544 p.
12. Vi'lchinskaya S.S., Lisitsin V.M. Opticheskie materialy i tekhnologii: uchebnoe posobie [Optical materials and technologies: Textbook]. Tomsk, TPU Publishing, 2011, p. 12.
13. Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Sposob formirovaniya tsifrovyykh spektrozonal'nykh televizionnykh signalov [A method of forming a multispectral digital television signals]. Patent RF no. MPK H04N 7/18. Application no. 2020138417 dated 24.11.2020.

**АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ГОТОВНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ****Д.Ю.Коновалов, К.П.Масюков, А.А.Семенов****ALGORITHM FOR ASSESSMENT AND FORECASTING OF FUNCTIONAL
READINESS OF RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT****D.Yu.Kononov, K.P.Masyukov, A.A.Semenov***Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского, Санкт-Петербург, vka@mil.ru*

Существующая система поддержания функциональной готовности радиоэлектронных средств (РЭС), которая сформировалась на основе практического опыта целевого применения радиотехнических средств и современных поправок к ней, тем не менее, не в полной мере соответствует современным требованиям к практическому использованию и уровню сложности имеющейся и разрабатываемой техники. Это несоответствие состоит в том, что, с одной стороны, наносится значительный ущерб готовности из-за длительных простоев РЭС на регламентах, а с другой стороны, незначительным оказывается выигрыш в безотказности, получаемый за счет проведения потребных мероприятий. В связи с тем, что полная информация о безотказности элементов РЭС никогда неизвестна, а также с тем, что реальная безотказность в процессе целевого применения РЭС изменяется под воздействием внешних факторов, целесообразно использовать гибкую адаптивную систему обработки технической информации и функциональности (СОТИФ), которая позволит «подстраивать» объем и периодичность профилактик с учетом текущей информации о безотказности РЭС. Представляется, что адаптивный подход к организации управления является наиболее приемлемым для подавляющего количества образцов РЭС. Его можно рассматривать как обобщение подхода «управление по состоянию». В соответствии с этим в статье предложен алгоритм наращивания автоматизированных систем оценки функциональной готовности за счет включения в число решаемых ими задач прогнозирования функционального состояния РЭС и расчетов оптимальных сроков и объемов проведения управляющих воздействий.

Ключевые слова: *система обработки технической информации, радиоэлектронные средства, функциональная готовность, система обработки технической информации и функциональности*

Для цитирования: *Коновалов Д.Ю., Масюков К.П., Семенов А.А. Алгоритм оптимизации системы оценки и прогнозирования функциональной готовности радиоэлектронных средств // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С.60-65. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).60-65](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).60-65)*

The existing system for maintaining the functional readiness of radio electronic equipment (REE), which was formed on the basis of practical experience in the targeted use of radio equipment and modern amendments to it, nevertheless, does not fully comply with modern requirements for practical use and the level of complexity of existing and developed equipment. This discrepancy lies in the fact that, on the one hand, significant damage is inflicted on readiness due to prolonged downtime of the REE on the regulations, and, on the other hand, the gain in reliability is insignificant due to the required measures. Due to the fact that complete information about the reliability of electronic equipment elements is never known, as well as the fact that the real reliability in the process of targeted use of electronic equipment changes under the influence of external factors, it is advisable to use a flexible adaptive system for processing technical information and functionality (PTIF), which will allow "adjust" the volume and frequency of preventive maintenance taking into account the current information on the reliability of the REE. It seems that an adaptive approach to the management organization is the most acceptable for the overwhelming number of REE samples. It can be seen as a generalization of the state-based control approach. In accordance with this, the article proposes an algorithm for increasing automated systems for assessing functional readiness by including the tasks of predicting the functional state of REE and calculating the optimal timing and volume of control actions.

Keywords: *system for processing technical information, radio electronic means, functional readiness, system for processing technical information and functionality*

For citation: *Kononov D.Yu., Masyukov K.P., Semenov A.A. Algorithm for assessment and forecasting of functional readiness of radio electronic equipment // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.60-65. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).60-65](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).60-65)*

Введение

Обработка технической информации о функциональности является одной из важнейших составляющих процесса целевого применения, необходимой для поддержания требуемого уровня безотказности РЭС. Как известно, в соответствии с требованиями эксплуатационной эффективности РЭС для обес-

печения постоянной готовности и решения задачи продления ресурса или срока службы вследствие физического (материального) износа, который определяет долговечность в процессе целевого применения, необходима организация и проведение комплекса операций по поддержанию функциональности или исправности РЭС при подготовке и использованию по назначению. Этот комплекс операций заключается

в проведении совокупностей профилактических операций, улучшающих функциональную готовность образца.

Улучшение функциональной готовности РЭС проявляется в повышении безотказности и эффективности применения РЭС, следовательно можно говорить, что проведение профилактики повышает надёжность РЭС как большой технической системы специального назначения.

Математическая модель процесса сбора, обработки технической информации управления функциональностью РЭС

Каждое отдельное управление можно рассматривать как своего рода воздействие на образец РЭС с целью улучшения его функционального состояния. Пусть профилактики проводятся в последовательные моменты времени $t_1 < t_2 < \dots < t_k < \dots$. Будем полагать, что образец РЭС состоит из N различных элементов, для каждого из которых определена предупредительная операция O_i ($i = 1, \dots, N$). Множество всех операций ТО обозначим через $O = \{O_1, \dots, O_N\}$. Техническое воздействие, проводимое в момент времени t_k , будем характеризовать множеством O_k выполняемых операций. Множество всех операций, которые предусмотрены для данного образца РЭС, обозначенное через O , таково, что $O_k \subset O$.

Обозначим через $S(t)$ состояние функциональности в момент времени t .

В рассматриваемой задаче состояние $S(t)$ характеризует текущее свойство безотказности образца РЭС. Известно [1], что исчерпывающей вероятностной характеристикой свойства безотказности является плотность вероятности (или функция распределения) наработки до отказа. Поэтому целесообразно состояние $S(t)$ определять векторной функцией плотности вероятности наработки до отказа:

$$S(t) = \{f_i(\tau/t); i = 1, \dots, N\}, \quad (1)$$

где $f_i(\tau/t)$ — функция плотности вероятности наработки до отказа i -го элемента, определяемая на множестве значений $\tau > t$.

По существу $f_i(\tau/t)$ — это апостериорная плотность вероятности, определяемая при условии, что при значениях наработки меньших t состояние i -го элемента уже известно.

Проведение операционных воздействий в момент времени t_k приводит к изменению состояния образца. Состояние функциональности РЭС после воздействия в момент времени t_k определим выражением:

$$S_k = Q_k[S_{k-1}, O_k], \quad (2)$$

где S_{k-1} — состояние образца перед проведением O_k (т. е. после проведения операций O_{k-1} в момент времени t_{k-1}); $Q_k[\]$ — оператор, описывающий изменение функционального состояния образца РЭС в результате проведения операции O_k (оператор Q_k вычисляет апостериорные функции $f_i(t/t_k)$ в момент времени t_k).

Если, например, операции $O_i \in O_k$ состоят в простой замене элементов новыми, то действие оператора Q_k представляется следующим преобразованием:

$$\begin{cases} f_i(\tau/t_k) = f_i^0(\tau), & \text{если } O_i \in O_k, \\ f_i(\tau/t_k) = \frac{f_i(\tau/t_{k-1})}{\int_{t_k-t_{k-1}}^{\infty} f_i(\tau/t_{k-1})d\tau}, & \text{если } O_i \notin O_k, \end{cases} \quad (3)$$

где $f_i^0(\tau)$ — плотность вероятности наработки до отказа i -го элемента при условии, что в момент $\tau = 0$ элемент новый.

Введем понятие элементарного решения о назначении профилактических работ, определив его парой:

$$U_k = \langle O_k, T_k \rangle, \quad (4)$$

где O_k — множество операций, выполняемых при управляющем воздействии в момент времени t_k ; T_k — время, через которое планируется проведение следующей профилактики.

Очевидно, что последовательность элементарных решений $U_k = \{U_1, U_2, \dots, U_k\}$ полностью определяет процесс управления надёжностью РЭС, реализующийся на заданном периоде целевого применения T_3 ($0 < t_1 < t_2 < \dots < t_k < T_3$). Элементарные решения U_k рассматриваются как своего рода управляющие воздействия на техническое состояние образца РЭС.

В качестве целевой функции в задаче оптимизации системы обработки технической информации и функциональности (СОТИФ) обычно принимают коэффициент готовности (коэффициент оперативной готовности) и «среднюю удельную прибыль за единицу календарного времени» [2,3]. Представляется целесообразным применение именно двух показателей, так как первый является характеристикой текущей готовности, а второй — усредненной характеристикой полезного эффекта от применения образца по назначению.

Коэффициент оперативной готовности определим следующим образом:

$$K_{ог}(t_{он}/S_0, U_k) = K_r(S_0, U_k) \cdot P(t_{он}/S_0, U_k), \quad (5)$$

где S_0 — начальное функциональное состояние образца (по существу эта характеристика безотказности нового образца); $U_k = \{U_1, U_2, \dots, U_k\}$ — последовательность воздействий на образец, которые выполняются в течение рассматриваемого периода целевого применения T_3 ; $K_r(S_0, U_k)$ — коэффициент готовности, определяемый для рассматриваемого периода целевого применения образца РЭС; $P(t_{он}/S_0, U_k)$ — вероятность безотказной работы образца в течение времени $t_{он}$; $t_{он}$ — априорное время безотказной работы образца (время начало работы).

В качестве второго показателя примем показатель, который назовем средней удельной эффективностью применения образца по назначению и определим следующим образом:

$$\begin{aligned} W(S_0, U_k) &= \frac{M[t_{P\Sigma}] - M[t_{B\Sigma}] \cdot C_1 - M[t_{TO\Sigma}] \cdot C_2}{T_3} = \\ &= 1 - \frac{M[t_{B\Sigma}] \cdot C_1 + M[t_{TO\Sigma}] \cdot C_2}{T_3}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $t_{P\Sigma}$, $t_{B\Sigma}$, $t_{TO\Sigma}$ — суммарное время нахождения образца РЭС в течение интервала целевого применения T_3 в работоспособном состоянии, состоянии восстановления и проведения технической обработки соот-

ветственно; $M[\]$ — символ операции определения математического ожидания; C_1, C_2 — весовые коэффициенты оценки пребывания образца в состояниях восстановления и проведения технической обработки соответственно; T_3 — рассматриваемый период целевого применения образца РТС.

Очевидно, что при $C_1 = C_2 = 1$ показатель (6) совпадает с известным коэффициентом технического использования. При $C_1 = 1$ и $C_2 = 0$ при непрерывной работе образца РЭС в течение периода T_3 показатель (6) является коэффициентом готовности. Другими словами, задавая соответствующие значения коэффициентов C_1 и C_2 , в показателе (6) учитываются те или иные особенности условий применения образца.

Характеристикой СОТИФ в (5) и (6) является параметр U_k . С учетом введенных обозначений задачу оптимизации системы обработки технической информации и предполагаемой функциональной готовности в общем виде сформулируем так: требуется найти U_k^{opt} , при котором выполнялись бы требования:

$$\begin{cases} K_{ог}(t_{оп}/S_0, U_k^{opt}) \rightarrow \max, \\ W(S_0, U_k^{opt}) \rightarrow \max. \end{cases} \quad (7)$$

Очевидно, что в данном виде эта задача является задачей векторной оптимизации (вектор состоит из двух элементов), и обычными математическими методами оптимизации она не решается [4].

Для решения такой задачи известными методами оптимизации необходимо на один из показателей задать ограничение. В данной задаче целесообразно задать ограничение на величину $K_{ог}$. С учетом этого постановку задачи (7) запишем в следующем виде:

$$\begin{cases} W(S_0, U_k^{opt}) \rightarrow \max, \\ K_{ог}(t_{оп}/S_0, U_k^{opt}) \geq K_{ог}^{зад}, \end{cases} \quad (8)$$

где $K_{ог}^{зад}$ — заданное ограничение на $K_{ог}$.

И в данной постановке задача остается весьма сложной, так как слишком велико пространство U , в котором ищется оптимальное решение U_k^{opt} .

В свою очередь, пространство U определяется декартовым произведением подпространств (каждое подпространство для очередного момента времени t_r — U_{0r} состоит из множества u_r , совершаемых на интервале t_{r-1}, t_r).

$$U = \overbrace{U_{01} \times U_{02} \times \dots \times U_{0k}}^{K_{раз}}, \quad U = \prod_{r=1}^k U_{0r},$$

где U_{0r} — подпространство допустимых решений $U_r \in U_{0r}$, выбираемых для моментов времени t_r ($r=1, \dots, k$).

С учетом (4) пространство U_{0r} определяется следующим образом:

$$U_{0r} = R^1 \times O_r,$$

где O — множество всех подмножеств O_r ;

$$O_r^T = (O_1, O_2, \dots, O_R); \quad (9)$$

R^1 — множество положительных вещественных чисел.

Следующим шагом является поиск подхода, упрощающего решение задачи (8). Физическая сущность задачи подсказывает, что нецелесообразно

стремиться найти сразу всю оптимальную последовательность U_k^{opt} , так как на протяжении рассматриваемого периода целевого применения T_3 надежность свойства образца под воздействием внешних условий могут изменяться и найденное решение U_k^{opt} будет обесценено. Кроме того, обычной является ситуация, когда надежность свойства образца, определяемые функциональным состоянием $S(t)$, известны весьма приближенно и информация об истинном значении $S(t)$ будет уточняться в процессе целевого применения. Исходя из этого, целесообразно задачу (8) решать последовательно («по шагам»), определяя на каждом шаге локально-оптимальное решение U_r^* из условия:

$$\begin{cases} W_1(S_r, U_r^*) \rightarrow \max, \\ K_{ог}(t_{оп}/S_0, U_r^*) \geq K_{ог}^{зад}, \end{cases} \quad (10)$$

где $W_1(S_r, U_r^*)$ — показатель вида (6), определяемый на интервале $(t_r, t_r + T_r)$; $U_r^* = \{u_1^*, \dots, u_r^*\}$ — последовательность локально-оптимальных воздействий, выполненных в момент времени $t_1, \dots, t_r$; $K_{ог}(t_{оп}/S_0, U_r^*)$ — коэффициент оперативной готовности, определяемый на интервале целевого применения $(0, t_r)$.

Показатель $W_1(S_r, U_r)$ в (10) определяется следующим выражением:

$$W_1(S_r, U_r) = 1 - \frac{M[t_{B\Sigma}/S_r, U_r] \cdot C_1 + M[t_{TO\Sigma}/S_r, U_r] \cdot C_2}{T_r}, \quad (11)$$

где $M[t_{B\Sigma}/S_r, U_r]$, $M[t_{TO\Sigma}/S_r, U_r]$ — математические ожидания соответственно суммарного времени восстановления и продолжительности профилактических работ на интервале времени $(t_r, t_r + T_r)$ при условии, что в момент времени t_r (перед проведением воздействия U_r) образец находился в состоянии S_r и были проведены операции в соответствии с решением о воздействии $U_{r-1}(O_r, T_r)$.

Очевидно, что получаемая в результате решения задачи (10) последовательность U_r^* будет отличаться от оптимальной U_k^{opt} , так как локально-оптимальные решения $u_r^* \in U_r^*$ оптимальны лишь в пределах одного интервала между воздействиями и при этом не учитывается влияние ранее выполненных профилактик $U_{r-1}, U_{r-2}, \dots$.

Поэтому предлагается с целью улучшения решения U_r^* показатель $W_1(\cdot)$ определять не на одном интервале до очередного процесса предупредительных работ, а на интервале планирования « m » ближайших воздействий.

В этом случае вместо задачи (10) необходимо решать задачу следующего вида:

$$\begin{cases} W_m(S_r, \hat{U}_{r,m}) \rightarrow \max, \\ K_{ог}(t_{оп}/S_0, U_r^* \cup \hat{U}_{r,m}) \geq K_{ог}^{зад}, \end{cases} \quad (12)$$

где $\hat{U}_{r,m} = \{\hat{U}_r, \hat{U}_{r+1}, \dots, \hat{U}_{r+m}\}$ — прогнозируемая оптимальная последовательность управлений, которая планируется на интервале (t_r, t_{r+m+1}) ; $W_m(S_r, \hat{U}_{r,m})$ — показатель вида (6), определяемый для интервала (t_r, t_{r+m+1}) .

По аналогии с (11) показатель $W_m(S_r, \hat{U}_{r,m})$ определяется выражением:

$$W_m(S_r, \hat{U}_{r,m}) = 1 - \frac{M[t_{B\Sigma}/S_r \hat{U}_{r,m}] \cdot C_1 + M[t_{TO}/S_r \hat{U}_{r,m}] \cdot C_2}{t_{r+m+1} - t_r}. \quad (13)$$

Построение алгоритма квазиоптимальной системы обработки технической информации и функциональной готовности РЭС

При небольших значениях m (опыт моделирования показал, что вполне удовлетворительные результаты получаются при $m = 2 \dots 3$) задача (12) решается методом перебора. На основании рассмотренного предлагается следующий алгоритм нахождения квазиоптимальной СОТИФ U_r^* (рис.1).

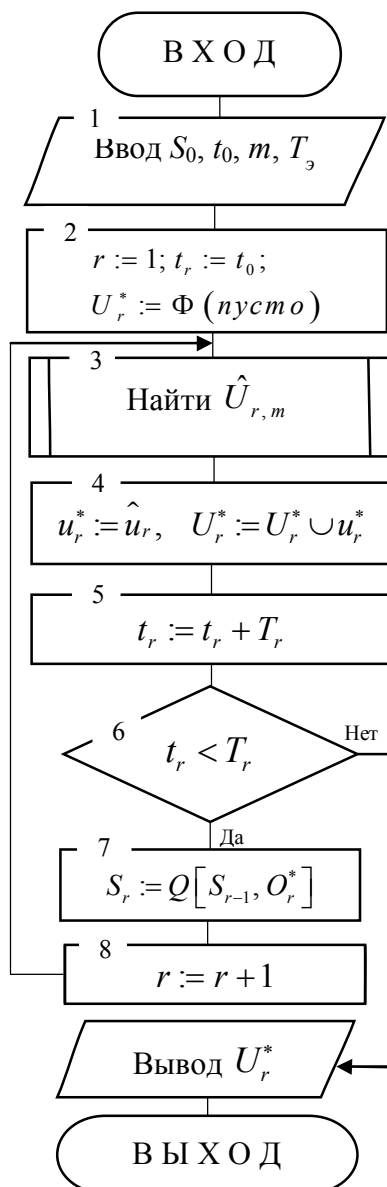


Рис.1. Алгоритм квазиоптимальной системы обработки технической информации и функциональной готовности РЭС

Оператор 1 вводит исходную информацию:

S_0 — информация о функциональном состоянии образца РЭС;

t_0 — назначенное время проведения первого управляющего воздействия. Это время задается произвольно. Позже будет показано, что адаптивная оптимальная СОТИФ не зависит от t_0 ;

m — число интервалов обработки информации, на которых ищутся локально-оптимальные решения $\hat{U}_{r,m}$ в задаче (12);

T_3 — заданный период целевого применения.

Оператор 2 иницирует переменные:

r — номер очередного решения;

t_r — время проведения текущей совокупности операций;

U_r^* — множество (массив), в котором формируется решение.

Оператор 3 находит решение $\hat{U}_{r,m}$ задачи (12).

Оператор 4 формирует квазиоптимальную последовательность U_r^* путем включения в нее элемента $\hat{U}_r$ из последовательности $\hat{U}_{r,m}$.

Оператор 5 вычислит время следующего управляющего воздействия.

Оператор 6 проверяет условие окончания работы алгоритма.

Оператор 7 вычисляет новое состояние образца с учетом выполнения работ в момент времени t_r .

Оператор 8 формирует порядковый номер очередного управляющего решения.

Оператор 9 выводит найденное решение U_r^* .

При этом предполагалось, что состояние образца РЭС S_r определяется точно и его надежностные свойства, устанавливаемые параметром S_0 , остаются неизменными в течение всего периода целевого применения T_3 . Однако в действительности это не так и поэтому получаемое приближенное решение U_r^* может оказаться далеким от оптимального. Последовательный характер предложенного алгоритма позволяет на его основе построить алгоритм перестраиваемой оптимальной СОТИФ, в котором предусматривается получение и использование дополнительной (апостериорной) информации о надежности образца РЭС, получаемой в процессе его боевого применения.

Построение алгоритма обработки и функциональности, адаптивно реагирующего на прогнозируемое изменение технического состояния РЭС

Рассмотренный выше алгоритм нахождения квазиоптимального процесса профилактических воздействий для повышения надежности U_r^* не является оптимальным подстраиваемым по текущему функциональному состоянию образца, несмотря на то, что решение U_r^* формируется последовательно (по шагам). Решение U_r^* , получаемое при реализации алгоритма один раз на основании однажды заданной входной информации S_0 , распространяется на весь период применения образца без учета возможных изменений S_0 в процессе функционирования комплекса военного назначения. В действительности все-

гда оказывается, что, во-первых, надежностные свойства образца S_0 никогда точно не известны, а во-вторых, они изменяются в процессе функционирования под воздействием внешних условий. В связи с этим найденные заранее оптимальное U_k^{opt} или квазиоптимальное U_r^* решения могут быть далекими от действительно оптимального. Поэтому предлагается алгоритм нахождения U_r^* (рис.1) дополнить блоками ввода дополнительной информации о безотказности комплекса и определения уточненного с учетом дополнительной информации текущего функционального состояния S_r .

В качестве дополнительной информации о надежности используются следующие данные:

$I_{отк} = \{\bar{t}_{нач}, \bar{t}_r, \bar{n}_{нач}, \bar{n}_r\}$ — статистическая информация об отказах комплекса, включающая $\bar{t}_{нач}, \bar{t}_r$ — вектор наработки элементов комплекса с начала целевого применения (или после замены) и за истекший интервал (t_{r-1}, t_r) соответственно, $\bar{n}_{нач}, \bar{n}_r$ — вектор числа отказов элементов с начала целевого применения (после замены) и за истекший интервал (t_{r-1}, t_r) соответственно;

$I_{пар} = \{\bar{m}_a, \bar{S}_a, \bar{m}_e, \bar{S}_e, \mathbf{X}\}$ — статистическая информация о поведении определяющих параметров комплекса, включающая $\bar{m}_a, \bar{S}_a$ — векторы математических ожиданий и среднеквадратических отклонений для начальных значений определяющих параметров элементов образца, $\bar{m}_e, \bar{S}_e$ — аналогичные векторы для скоростей «ухода» параметров, $\mathbf{X}$ — массив (матрица) результатов измерений определяющих параметров на интервале (t_{r-1}, t_r) .

С учетом дополнительной информации $I_{отк}$ и $I_{пар}$ производится подсчет функций плотности, входящих в выражение $S(t)$ (1) и для $S_r - S_0$.

Пересчет осуществляется следующим образом: новое (пересчитанное) значение функции $f_i(t)$ можно определить из выражения:

$$f_i(t) = c_0 f_i^0(t) + (1 - c_0) \times \times b_i \left[\frac{1}{n_i} \sum_{j=i}^{n_i} p(t - t_{ij}) + f_i^{нар}(t / m_{ai}, S_{ai}, m_{ei}, S_{ei}) \right], \quad (14)$$

где $f_i^0(t)$ — в правой части суммарная (до учета новых условий, до пересчета) функция плотности вероятности наработки до отказа i -го элемента образца;

c_0 — коэффициент, определяющий относительный вес суммарного компонента функции плотности;

n_i — число отказов i -го элемента за период целевого применения до текущего момента времени t_r ;

t_{ij} — реализация наработки между $(j-1)$ и j -м отказами i -го элемента;

$p(t - t_{ij})$ — функция, определяющая вклад j -й реализации наработки до отказа в эмпирическую компоненту функции плотности. Ввиду того, что n_i будет малым или даже равным нулю, для формирования эмпирической компоненты должны использоваться специальные методы работы с малыми выборками [1]. Вид функции $p(t - t_{ij})$ будет зависеть от выбранного метода;

$f_i^{нар}(t / m_{ai}, S_{ai}, m_{ei}, S_{ei})$ — функция плотности вероятности наработки i -го элемента до параметрического отказа при предположении о нормальном законе распределения начального значения и скорости ухода параметра. Эта функция, по имеющимся статистическим данным, может быть получена расчетным путем [4,5];

v_i — нормирующий множитель, величина которого определяется из условий

$$\int_0^\infty f_i^0(t) dt = 1. \quad (15)$$

Блок-схема алгоритма, в котором на каждом шаге выбора элементарного решения U_r^* вводится и используется дополнительная информация $I_{отк}$ и $I_{пар}$, приведена на рис.2.

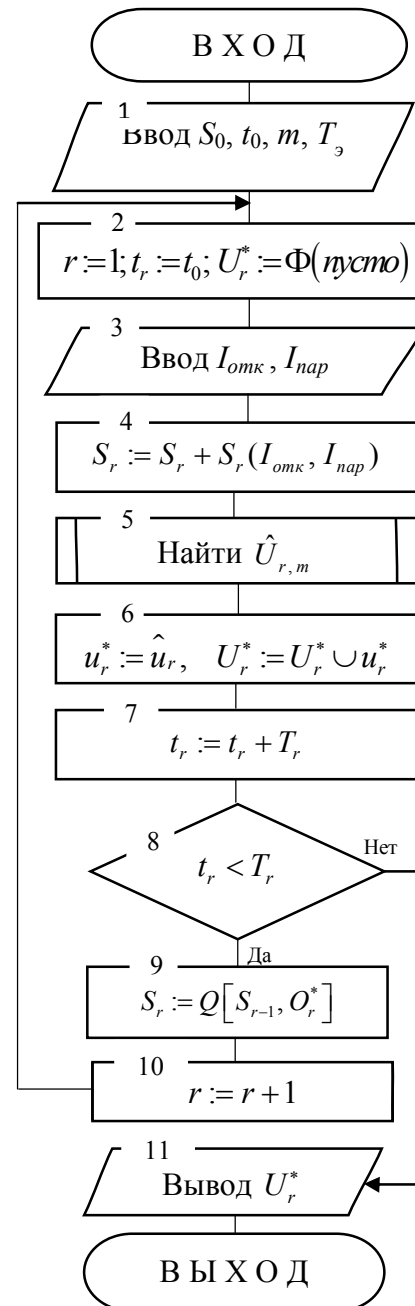


Рис.2. Алгоритм оптимальной системы обработки информации по показателям надежности РЭС

Из рисунка видно, что данный алгоритм от алгоритма на рис.1 отличается лишь двумя дополнительными операторами 3 и 4.

Оператор 3 вводит в момент времени t_r дополнительную информацию $I_{отк}$ и $I_{пар}$.

Оператор 4 формирует уточненное функциональное состояние РЛ комплекса S_r с учетом введенной дополнительной информации.

Операторы 5-11 полностью совпадают с операторами 3-9 алгоритма на рис.1.

Заключение

Данный алгоритм с полным основанием можно назвать перестраиваемым оптимальным алгоритмом. По терминологии [6] в алгоритме реализуется первый тип адаптации, согласно которому алгоритм управления остается неизменным, а изменяются только параметры этого алгоритма. СОТИФ, получаемая на основе данного алгоритма, называется адаптивной СОТИФ.

В работе предложен алгоритм оптимальной системы обработки технической (функциональной) информации и прогнозируемой готовности, которая, с одной стороны, по возможности использует подходы и методы уже известных моделей, а с другой стороны, соответствует основным особенностям многофункциональных образцов РЭС и условиям их применения по назначению.

Представленная в алгоритме модель учитывает такие основные особенности РЭС, как сложность (большое число элементов, многорежимность и т.п.) и существенные различия элементов РЭС по характеру протекающих в них деградиционных процессов, проявляющихся в различиях их вероятностных характеристик безотказности. В модели СОТИФ РЭС учитывается тот факт, что, с одной стороны, реальные свойства безотказности РЭС могут изменяться в процессе целевого применения под воздействием внешних факторов, а с другой стороны, имеющаяся информация о безотказности РЭС всегда неполная и неточная. Поэтому в такой модели системы предусмотрена возможность ввода дополнительной (апо-

стериорной) информации и пересчета найденных ранее оптимальных сроков и объемов технических воздействий.

1. Зубарев Ю.М. Основы надежности машин и сложных систем: учебник. СПб.: Лань, 2020. 180 с.
2. Шубин Р.А. Надёжность технических систем и техногенный риск: учебное пособие. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2012. 80 с.
3. Схиртладзе А.Г., Уколов М.С., Сквордцов А.В. Надёжность и диагностика технологических систем: учеб. М.: Новое знание, 2008. 518 с.
4. Масюков К.П., Коновалов Д.Ю., Михеев Д.В. Характеристики качества оценивания координат техногенных космических объектов // Радиотехника. 2019. Т. 83. №11(17). С.59-65.
5. Ниворожкина Л.И., Арженовский С.В., Рудяга А.А. и др. Статистические методы анализа данных: учебник. М.: Риор: Инфра-М, 2016. 333 с.
6. Масюков К.П., Коновалов Д.Ю., Куликов С.В. Особенности формирования алгоритма системы обработки информации на основе эмпирических данных // Электромагнитные волны и электронные системы. 2020. Т.25. №3. С.57-64.

References

1. Zubarev Yu.M. Osnovi nadezhnosti mashin i slozhnykh sistem [Fundamentals of reliability of machines and complex systems: textbook]. Saint Petersburg, Lan Publ., 2020, 180 p.
2. Shubin R.A. Nadezhnost tehnikeskikh sistem i tehnogenniy risk [Reliability of technical systems and technogenic risk: a textbook]. Tambov, "TSTU" Publishing, 2012, 80 p.
3. Skhirtladze A.G., Ukolov M.S., Skvordtsov A.V. Nadezhnost i diagnostika tehnologicheskikh sistem [Reliability and diagnostics of technological systems: textbook]. Moscow, Novoe znanie Publ., 2008, 518 p.
4. Nivorozhkina L.I., Arzhenovsky S.V., Trudyaga A.A. Statisticheskiye metody analiza dannykh [Statistical methods of data analysis]. Moscow, Rior, 2018, 320 p.
5. Mashukov K.P., Kononov D.Yu., Mikheev D.V. Harakteristiki kachestva ocenivaniya koordinat tehnogennykh kosmicheskikh objektov [Characteristics of quality evaluation of the coordinates of the manmade objects in outer space]. Radio engineering, 2019, vol.83, no.11 (17), pp.59-65.
6. Masyukov K.P., Kononov D.Yu., Kulikov S.V. Osobennosti formirovaniya algoritma sistemi obrabotki informatsii na osnove empericheskikh dannykh [Features of the formation of the algorithm of the information processing system based on empirical data]. Electromagnetic waves and electronic systems, 2020, vol.25, no.3, pp.57-64.

АДАПТАЦИЯ МЕТОДА СЕЛЕКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНОГО ОБЪЕКТА НА НЕОДНОРОДНОМ ФОНЕ К УСЛОВИЯМ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ

Н.П.Корнышев, Д.А.Серебряков

ADAPTATION OF THE SELECTION METHOD FOR THE IMAGE OF A SMALL-SIZED OBJECT ON A NON-UNIFORM BACKGROUND TO THE CONDITIONS OF VIDEO SURVEILLANCE

N.P.Kornyshev, D.A.Serebryakov

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Nikolai.Kornyshev@novsu.ru

Рассматриваются вопросы селекции изображений объектов в телевизионных системах прикладного назначения, а именно один из методов селекции объекта, основанных на компенсации неоднородностей фона. Описывается подход к адаптации метода к условиям сближения объекта с точкой видеонаблюдения. Рассматривается дополнительная обработка входного сигнала, обеспечивающая обмен разрешающей способности на отношение сигнал-шум по мере увеличения размера объекта. Приводятся варианты структурных схем устройства селекции. Обсуждаются результаты, полученные при компьютерном моделировании адаптированного метода. Приводятся примеры тестовых изображений и графики количественных зависимостей. Показаны сравнительные диаграммы среднего, максимального и среднеквадратического отклонения координат селектированного объекта от эталонных значений по всем кадрам тестовой видеопоследовательности для адаптированного и исходного метода.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, компьютерное моделирование

Для цитирования: Корнышев Н.П., Серебряков Д.А. Адаптация метода селекции изображения малоразмерного объекта на неоднородном фоне к условиям видеонаблюдения // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С.66-70. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).66-70](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).66-70)

The article deals with the selection of object images in television systems for applied purposes, namely, one of the methods of object selection based on compensation of non-uniformity background. An approach to adapting the method to the conditions of convergence of an object with a video surveillance point is described. Additional processing of the input signal is considered, which provides an exchange of resolution for the signal-to-noise ratio as the object size increases. Variants of structural schemes of the selection device are given. The results obtained by computer simulation of the adapted method are discussed. Examples of test images and graphs of quantitative dependencies are provided. Comparative diagrams of the average, maximum and root-mean-square deviation of the coordinates of the selected object from the reference values for all frames of the test video sequence for the adapted and original method are shown.

Keywords: digital image processing, computer simulation

For citation: Kornyshev N.P., Serebryakov D.A. Adaptation of the selection method for the image of a small-sized object on a non-uniform background to the conditions of video surveillance // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.66-70. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).66-70](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).66-70)

Введение

Методам селекции изображения объекта на неравномерном фоне, в том числе, с учетом изменяющихся видимых размеров объекта в ходе сближения посвящено достаточно большое количество работ [1-5]. Тем не менее, при проектировании телевизионных и оптико-электронных систем, предназначенных для обнаружения и сопровождения целей, весьма критичным параметром является быстродействие системы и простота реализации, в частности, при использовании ПЛИС.

С этой точки зрения практический интерес представляет повышение эффективности применения методов селекции, основанных на вычитании фона, например, метод селекции изображения малоразмерного объекта на неоднородном фоне, описанный в литературе [5]. Данный метод заключается в обработке текущего сигнала изображения сглаживающим или медианным фильтром с размером маски m большим

размеров M_0 изображения объекта, но много меньше размеров изображений фрагментов фона M_Φ , т. е.:

$$m > M_0, \text{ но } m \ll M_\Phi. \quad (*)$$

На практике обычно используется квадратная маска $m \times m$ при величине $m \leq 9$ элементов. Компенсация производится путем вычитания фильтрованного сигнала из исходного текущего сигнала. Выходной бинарный сигнал объекта формируется путем сравнения разностного сигнала с фиксированным порогом.

В настоящей статье рассматривается адаптация указанного выше метода к условиям сближения объекта с точкой видеонаблюдения с целью повышения его эффективности путем дополнительной обработки входного сигнала, обеспечивающей обмен разрешающей способности на отношение сигнал-шум по мере увеличения размера объекта. Подобного рода взаимообмен находит практическое применение, в частности, при решении задач обнаружения-оценивания-передачи сигнала в космическом телевидении [1].

Теоретическая часть

Увеличение размера изображения объекта приводит к несоблюдению выражений (*), и, соответственно, к прекращению подавления сигнала объекта при фильтрации. В результате сигнал объекта компенсируется вместе с фоном при последующем вычитании.

Если используется сглаживающий фильтр, то при несоблюдении условий (*) вычитание сглаженного сигнала из текущего приводит к формированию контуров объекта по методу «нерезкого маскирования» [6].

Несмотря на то, что наличие контуров объекта является достаточным для определения, в частности, координат его центра, амплитуда контуров объекта, формируемых при «нерезком маскировании», оказывается меньше амплитуды сигнала объекта, формируемого при соблюдении условия (*). Таким образом, появляющееся в данном случае снижение отношения сигнал-шум приводит к уменьшению точности селекции изображения объекта.

Отметим также, что если используется медианный фильтр, то после вычитания при несоблюдении условия (*) также происходит формирование элементов контуров изображения объекта. Однако в зависимости от его конфигурации получаемый контур может иметь множественные разрывы. Так, например, вместо контурного изображения квадрата будут формироваться лишь точки, соответствующие углам изображения. Причем в зависимости от ориентации квадрата число и расположение таких точек может меняться, что может приводить к существенным ошибкам в определении координат центра изображения объекта.

С этой точки зрения, а также с точки зрения простоты аппаратной реализации применение сглаживающего фильтра является предпочтительным. Поэтому в дальнейшем рассматривается адаптация указанного метода с учетом использования в нем сглаживающего фильтра.

Адаптация к условиям видеонаблюдения заключается в оценке в каждом i -м кадре площади S_{oi} изображения селектируемого объекта и укрупнении аперттуры считывания видеосигнала до $m_i \times m_i$ элементов в случае соответствующего увеличения S_{oi} .

Исходно размер изображения объекта, обнаруживаемого объекта в поле видеонаблюдения, составляет один пиксель, т. е. $M_0 = 1$. Текущий размер M_{oi} объекта определяется исходя из представлений об эквивалентной площади рассеяния (ЭПР), а именно:

$$M_{oi} = \sqrt{S_{oi}}.$$

По мере увеличения размеров M_{oi} изображения объекта в i -м кадре размер m_i аперттуры считывания видеосигнала принимают равным целой части числа $m_i = M_{oi}$ в пределах значений $1 < m_i \leq m$. В результате такого укрупнения аперттуры считывания отношение сигнал-шум так же повышается в m_i раз при одновременном обеспечении условия (*).

При достижении равенства $m_i = m$ размер аперттуры считывания фиксируют. Так, например, при достижении размера аперттуры $m_i = 9$ дальнейшее формирование сигнала объекта будет производиться уже при отношении сигнал-шум в 9 раз выше исходного.

Происходящее при этом уменьшение разрешающей способности не оказывает влияния на результат селекции изображения объекта в силу соответствующего увеличения его размера при сближении объекта с точкой видеонаблюдения. Происходящее при этом сглаживание фронтов сигнала объекта также не оказывает влияния на результат определения координат, поскольку центр объекта будет соответствовать максимуму сигнала его изображения. Таким образом, техническим результатом адаптации является повышение точности селекции изображения объекта [7].

Рассмотрим структурную схему устройства селекции с адаптацией к вышеуказанным условиям видеонаблюдения (рис.1).

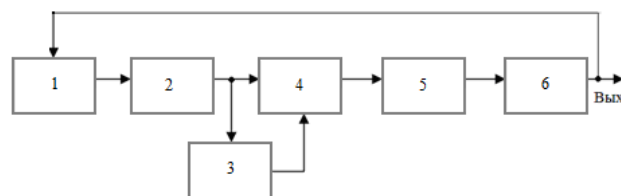


Рис.1. Структурная схема устройства селекции: 1 — ТВ-камера, 2 — АЦП, 3 — сглаживающий фильтр, 4 — блок вычитания, 5 — блок квантования на два уровня, 6 — блок измерения

Устройство работает следующим образом. Текущий сигнал изображения с выхода камеры 1 преобразуется в цифровой код в АЦП 2, сглаживается в цифровом фильтре 3, размер сглаживающей маски которого фиксирован и равен m , например, $m = 9$. Сглаженный сигнал, сформированный фильтром 3, вычитается из текущего сигнала в блоке 4 вычитания. В блоке 5 квантования разностный сигнал сравнивается с фиксированным порогом и формируется выходной бинарный сигнал объекта, который также используется блоком 6 измерения для оценки ЭПР и управления размером аперттуры считывания в ТВ-камере 1. Изменение размера аперттуры считывания в ТВ-камере на базе КМОП-фотоприемника может быть реализовано при помощи, так называемой Z-развертки.

Укрупнение аперттуры может быть заменено эквивалентной процедурой сглаживания входного сигнала. Рассмотрим структурную схему устройства селекции с адаптацией к вышеуказанным условиям видеонаблюдения путем использования дополнительного сглаживающего фильтра (рис.2). Структурная схема содержит ТВ-камеру 1 с АЦП, первый 2 и второй 3 сглаживающий фильтр, блок 4 вычитания, блок 5 квантования на два уровня и блок 6 измерения.

Устройство работает следующим образом. Текущий сигнал изображения с выхода камеры 1 в цифровой форме поступает на первый цифровой фильтр 2, размер m_i сглаживающей маски которого первоначально устанавливается равным $m_i = 1$.

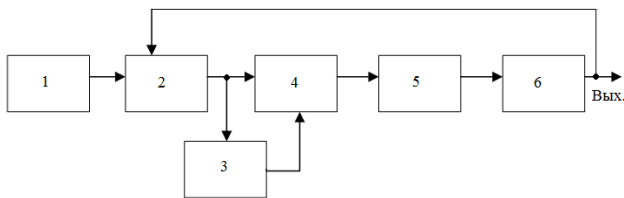


Рис.2. Структурная схема устройства селекции: 1 — ТВ-камера с АЦП, 2 — первый сглаживающий фильтр, 3 — второй сглаживающий фильтр, 4 — блок вычитания, 5 — блок квантования на два уровня, 6 — блок измерения

Выход фильтра 2 подключен к входу второго цифрового фильтра 3, размер сглаживающей маски которого фиксирован и равен m , например, $m = 9$. Сглаженный сигнал, сформированный фильтром 3, вычитается из текущего сигнала в блоке 4 вычитания. Блок 5 квантования разностный сигнал сравнивается с фиксированным порогом и формируется выходной бинарный сигнал объекта, который также используется блоком 6 измерения для оценки ЭПР и управления размером сглаживающей маски m_i в фильтре 2.

Данный вариант структурной схемы, исходя из простоты и быстрей действия программной реализации, был использован для экспериментальной проверки методом компьютерного моделирования эффективности адаптации.

Методика эксперимента

Компьютерное моделирование работы рассмотренного выше устройства селекции производилось в среде МАТЛАБ с использованием стандартных функций [8] по методике, изложенной в [9-11]. При этом использовалась тестовая видеопоследовательность [9] с варьируемым значением контраста объекта K по отношению к максимальному значению фона от 1% до 10% с шагом 1% при отношении сигнал-шум $SN = 6$ и размере маски $m = 7$. Пример имитации объекта и неоднородного фона в тестовой видеопоследовательности показан на рис.3.

Увеличение размера изображения объекта осуществлялось путем дилатации логического сигнала $F = \text{imdilate}(F, c)$ с периодическим (через заданное число кадров) увеличением размера маски

$c = \text{ones}(z0, z0)$ с шагом 1, начиная с единичного значения.

Имитация изменения положения объекта в кадре производилось путем периодического выполнения стандартной операции поворота изображения F на заданный угол $R0$ с «заливкой» образующихся в изображении углов черным (нулевым) фоном: $F = \text{imrotate}(F, R0, 'crop')$.

Генерация изображения фона с заданной неравномерностью и с заданной размерностью фрагментов с плавными границами осуществлялась путем формирования синусоидального сигнала $T = U_{\max} \sin(\omega t + \phi)$ в каждой строке кадра изображения. Полученная матрица изображения T транспонировалась и суммировалась с исходной матрицей. Таким образом, величина неоднородности определялась амплитудой синусоидального сигнала — $2U_{\max}$, а размерность фрагментов фона — частотой ω . Перемещение фона имитировалось автоинкрементом фазового сдвига ϕ в каждом кадре видеопоследовательности.

Выходным параметром при моделировании являлась вероятность $p(t)$ совпадения в каждом кадре отметки координат селектированного объекта с полем допуска. В свою очередь поле допуска задавалось в каждом кадре, как окрестность центра эталонного объекта в пределах размера маски фильтра m .

Выходной параметр $p(t)$ определялся как отношение числа кадров видеопоследовательности, в которых произошло совпадение отметки координат селектированного объекта с полем допуска, к общему числу кадров видеопоследовательности.

По результатам моделирования находились зависимости $p(t) = f(K)$ при $SN = \text{const}$. Кроме этого, оценивалось среднее, максимальное и среднеквадратическое отклонение координат селектированного объекта от эталонных значений по всем кадрам тестовой видеопоследовательности.

Результаты и обсуждение

На рис.4 показаны графики зависимостей $p(t) = f(K)$, полученные в процессе компьютерного моделирования метода селекции с адаптацией [7] к изменению размера изображения объекта (график 2) и без адаптации [5] (график 1).

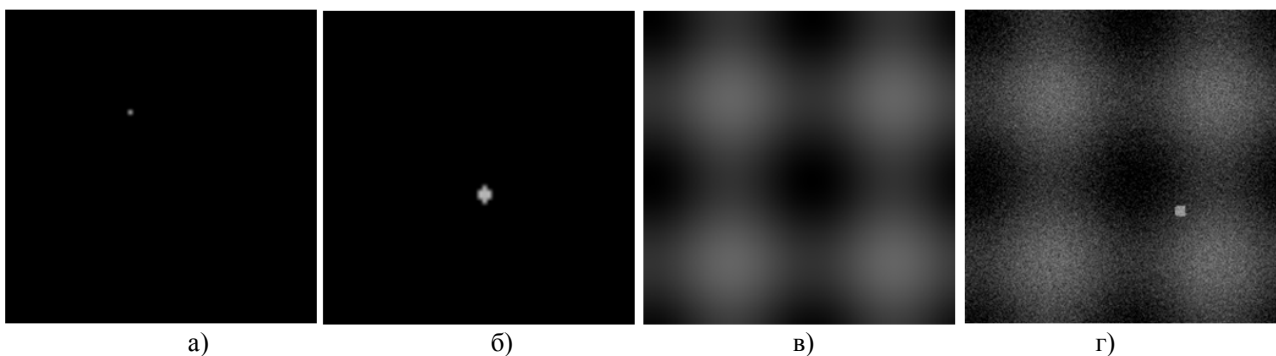


Рис.3. Имитация объекта и неоднородного фона в тестовой видеопоследовательности: а) и б) кадры бинарного изображения приближающегося объекта; в) кадр малоподвижного неоднородного фона (параметр $w = 0,05$), г) выходной кадр с изображением фона и объекта с заданным контрастом K и отношением сигнал-шум SN

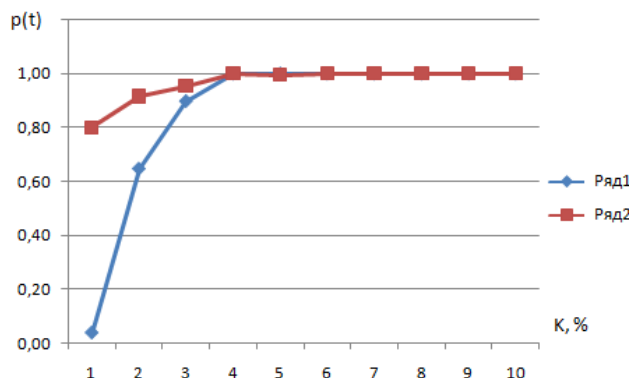


Рис.4. Графики зависимостей $p(t) = f(K)$ с адаптацией метода (ряд 2) и без адаптации (ряд 1) при $SN = 6$, $m = 7$

По рис.4 видно, что адаптация к условиям увеличения размера изображения объекта повышает вероятность совпадения в каждом кадре отметки координат селектированного объекта с полем допуска, а следовательно, и точность селекции объекта при снижении контраста по отношению к фону.

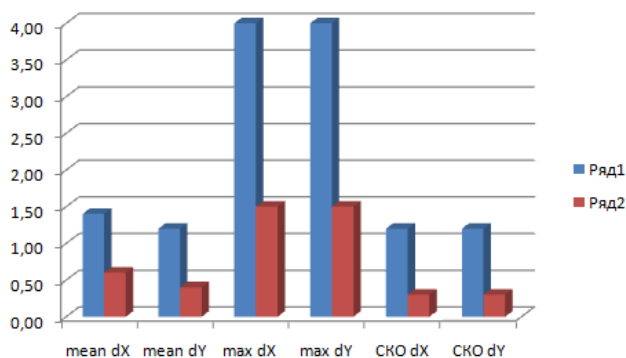


Рис.5. Сравнительные диаграммы среднего (mean dX , mean dY), максимального (max dX , max dY) и среднеквадратического (СКО dX , СКО dY) отклонения координат селектированного объекта от эталонных значений для адаптированного (ряд 2) и исходного (ряд 1) метода

На рис.5 показаны сравнительные диаграммы среднего, максимального и среднеквадратического отклонения координат селектированного объекта от эталонных значений по всем кадрам тестовой видеопоследовательности для адаптированного и исходного метода.

По диаграммам видно, что адаптация существенно уменьшает величину отклонений указанных выше параметров, что свидетельствует о повышении точности селекции изображений объекта.

Выводы

1. При увеличении изображения объекта в процессе его сближения с точкой видеонаблюдения адаптация к условиям видеонаблюдения обеспечивает повышение точности селекции изображений объектов.

2. Возможное увеличение размера апертуры считывания видеосигнала и соответствующее повышение отношения сигнал-шум определяется размером маски пространственного фильтра, используемого в процедуре компенсации фона, и при оптималь-

ной маске 9×9 элементов достигает 9-кратного значения по отношению к исходному.

3. Обмен разрешающей способности на отношение сигнал-шум по мере увеличения размера объекта может быть произведен как путем соответствующего укрупнения апертуры считывания, так и путем эквивалентной цифровой обработки с использованием сглаживающего фильтра.

1. Цыцулин А.К., Павлов В.А., Бобровский А.И., Морозов А.В. Информационные оценки в задачах обнаружения-оценивания-передачи сигнала в космическом телевидении // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2019. Вып.3. С.61-74.
2. Цыцулин А. К., Бобровский А. И., Морозов А. В. и др. Применение свёрточных нейронных сетей для автоматической селекции малоразмерных искусственных космических объектов на оптических изображениях звёздного неба // Оптический журнал. 2019. Т.86. №10. С.30-38.
3. Левко Г.В., Бобровский А.И., Морозов А.В., Цыцулин А.К. Обнаружение объектов на звёздном фоне // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2016. Вып.2. С.29-38.
4. Цыцулин А.К., Павлов В.А., Бобровский А.И. и др. Адаптивное кодирование изображений, разделимых на доминантный объект и фон // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2019. Вып.3. С.75-86.
5. Андреев А.И., Коротаев В.В., Пашковский А.М. Селекция изображений малоразмерных объектов на неоднородном фоне в условиях помех // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т.56. №10. С.88-93.
6. Прэтт У. Цифровая обработка изображений / Пер. с англ. М.: Мир, 1982. Кн.2. С.575.
7. Патент №2734655. МПК H04N 7/18. Способ селекции изображения объекта на неоднородном фоне / Н.П.Корнышев, Д.А.Серебряков. Заявл. 17.03.2020. Оpubл. 21.10.2020. Бюл. №30.
8. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
9. Корнышев Н.П., Серебряков Д.А. Компьютерное моделирование фоноцелевой обстановки при оценке эффективности методов селекции объектов на неоднородном фоне // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2020. №2 (118). С.79-83.
10. Kornyshev N.P., Serebrjakov D.A. Estimation of the probability of correct determination of the coordinates of an object in computer modeling of methods for selecting their images // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V.1658. Article number: 012029 DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1658/1/012029>
11. Корнышев Н.П., Серебряков Д.А. Исследование метода селекции изображения малоразмерного объекта на неоднородном фоне // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2020. №5(121). С.49-52.

References

1. Tsytulin A.K., Pavlov V.A., Bobrovskiy A.I. et al. Informatsionnye otsenki v zadachakh obnaruzheniya-otsenivaniya-peredachi signala v kosmicheskom televidenii [Information evaluations of signal detection-estimation-transfer task in space television systems]. Voprosy radioelektroniki. Ser. Tekhnika televideniya. 2019, iss. 3, pp. 61-74.
2. Tsytulin A.K., Bobrovskiy A.I., Morozov A.V. et al. Primenenie svertochnykh neyronnykh setey dlya avtomaticheskoy seleksii malorazmernykh iskusstvennykh kosmicheskikh ob"ektov na opticheskikh izobrazheniyakh zvezdnogo neba [Using convolutional neural networks to automatically select small artificial space objects on optical images of a starry sky]. Opticheskiy zhurnal, 2019, vol.86, no.10, pp.30-38.
3. Levko G.V., Bobrovskiy A.I., Morozov A.V. et al. Obnaruzhenie ob"ektov na zvezdnom fone [Detection of objects in the starry background]. Voprosy radioelektroniki. Ser. Tekhnika televideniya, 2016, iss. 2, pp. 29-38.

4. Tsytulin A.K., Pavlov V.A., Bobrovskiy A.I., Morozov A.V., Zubakin I. A. Adaptivnoe kodirovanie izobrazheniy, razdelimyykh na dominantnyy ob"ekt i fon [Adaptive coding of images divided into dominant object and background]. Voprosy radioelektroniki. Ser. Tekhnika televideniya, 2019, iss. 3, pp. 75-86.
5. Andreev A.L., Korotaev V.V., Pashkovskiy A.M. Seleksiya izobrazheniy malorazmernyykh ob"ektov na neodnorodnom fone v usloviyakh pomekh [Selection of the small-size objects images on the heterogeneous background under the interference conditions]. Izv. Vuzov. Priborostroenie, 2013, vol. 6, no. 10, pp. 88-93.
6. Pratt W. Digital Image Processing: PIKS Scientific Inside, 1978. (Rus. ed.: Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy. Book.2. P.575.
7. Kornyshev N.P., Serebryakov D.A. Spособ selektsii izobrazheniya ob"ekta na neodnorodnom fone [Selection method for the image on a non-uniform background]. Patent RF. No.2734655. МПК H04N 7/18. Published 21.10.2020.
8. Gonzalez R., Woods R. Digital Image Processing. Pearson, 2007, 972 p. (Rus. ed.: Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy. Moscow, Tekhnosfera, 2005, 1072 p.).
9. Kornyshev N.P., Serebryakov D.A. Computer simulation of the background-target environment when evaluating the effectiveness of selection methods for objects on a non-uniform background. Vestnik NovSU, 2020, no.2(118).
10. Kornyshev N.P., Serebryakov D.A. Journal of Physics: Conference Series 1658, 2020, 012029 IOP. Estimation of the probability of correct determination of the coordinates of an object in computer modeling of methods for selecting their images. DOI:10.1088/1742-6596/1658/1/012029
11. Kornyshev N.P., Serebryakov D.A. Research of selection method of the small object image on a non-uniformity background. Vestnik NovSU, 2020, no.5(121), pp.49-52.

**АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ СИГНАЛОВ
НА ФОНЕ ПОМЕХ В МНОГОЧАСТОТНОЙ РЛС****М.Ю.Кузнецов, А.А.Шаталов, В.А.Шаталова****ADAPTIVE SIGNAL RECOGNITION ALGORITHM IN MULTI-FREQUENCY
RADARS AGAINST BACKGROUND NOISE****M.Y.Kuznetsov, A.A.Shatalov, V.A.Shatalova***Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского, Санкт-Петербург, vka@mil.ru*

Рассматривается постановка и решение задачи автоматического распознавания образов целей по оценкам их импульсных характеристик, полученным в результате цифровой адаптивной обработки принимаемого случайного процесса, выполняемой в многочастотной РЛС с одновременным излучением сигналов с различными несущими частотами, в условиях параметрической априорной неопределенности статистических характеристик. Предполагается, что сигнал представляет собой отклик фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ) или бесконечной импульсной характеристикой (БИХ), принимаемый вместе с шумом. При этом считается, что число полюсов и нулей системной функции априори неизвестно и в процессе автоматического распознавания должно быть оценено по выборкам входного случайного процесса. В соответствии с этим условием и выполняется оценивание весовых коэффициентов и число полюсов и нулей системной функции фильтра и ее КИХ или БИХ составляющих.

Ключевые слова: *многочастотные РЛС с одновременным излучением сигналов с различными частотами, ранг случайного авторегрессионного, скользящего среднего, а также смешанного СПР*

Для цитирования: Кузнецов М.Ю., Шаталов А.А., Шаталова В.А. Адаптивный алгоритм распознавания сигналов на фоне помех в многочастотной РЛС // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С.71-75. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).71-75](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).71-75)

The formulation and solution of the problem of automatic recognition of target images by estimates of their impulse response (IR) is considered. These IR are obtained as a result of digital adaptive processing of the received random process (RP) in a multifrequency radar with simultaneous emission of signals with different carrier frequencies in conditions of parametric a priori uncertainty of statistical characteristics (SC). The received signal is the response of a finite impulse response (FIR) or infinite impulse response (IIR) filter against a background noise. It is assumed that the number of poles and zeros of the system function is a priori unknown and in the process of automatic recognition should be estimated from the samples of the input RP. In accordance with this condition, the weighting coefficients and the number of poles and zeros of the system filter function and its FIR or IIR components are estimated.

Keywords: *multi-frequency radar with simultaneous emission of signals with different frequencies, rank of random autoregressive, moving average, and mixed RP*

For citation: Kuznetsov M.Y., Shatalov A.A., Shatalova V.A. Adaptive signal recognition algorithm in multi-frequency radars against background noise // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.71-75. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).71-75](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).71-75)

Введение

Постановка и решение задачи распознавания сигналов, принимаемых от целей на фоне белого гауссовского шума (БГШ), рассмотрены в отечественной и зарубежной литературе [1,2] применительно к узкополосным, многочастотным и широкополосным РЛС.

Появление более совершенных многочастотных РЛС с одновременным излучением сигналов с различными несущими частотами и быстрой перестройкой частоты, обладающих существенными преимуществами в области обработки сигналов по сравнению с узкополосными РЛС, позволило разработать ряд эффективных алгоритмов распознавания сигналов, принимаемых на фоне помех. К их числу относятся методы спектрального оценивания, методы, использующие импульсные характеристики (ИХ) и передаточную

функцию распознавания объекта, методы, применяющие для распознавания собственные резонансы целей при облучении их сигналами с несколькими частотами, и ряд других [1,2]. При этом отмечается, что основными проблемами при использовании параметрических методов обработки сигналов являются выбор порядка используемого метода, а также исследование устойчивости метода по отношению к уровню шума, искажающего рассматриваемый сигнал. Важным вопросом является правильный выбор числа главных сингулярных чисел при использовании процедуры сингулярного разложения данных. Решение всех этих проблем не имеет однозначного и простого набора рекомендаций, а зависит от конкретной решаемой задачи, что создает немалые трудности при интерпретации результатов оценки параметров сигналов.

Целью работы является создание адаптивного алгоритма распознавания сигналов, основанного на

оценивании весовых коэффициентов и числа полюсов и нулей системной функции фильтра и ее КИХ или БИХ составляющих, применительно к многочастотным РЛС с ФАР, в которых используется одновременное излучение сигналов с различными несущими частотами и анализ их работы в условиях параметрической априорной неопределенности. Интерес к распознаванию принимаемых сигналов в многочастотных РЛС объясняется необходимостью создания усовершенствованных схем распознавания целей, оснащенных современными защитными покрытиями.

Системные характеристики линейных систем и модель рассеяния электромагнитного поля радиолокационных целей

В результате электромагнитного взаимодействия зондирующего сигнала с поверхностью радиолокационной цели формируется рассеянное электромагнитное поле, часть которого распространяется в направлении приемной ФАР. Это поле несет в себе всю доступную информацию о цели, которую можно выделить с помощью соответствующей обработки принятого сигнала. При этом под временной характеристикой рассеяния цели понимают так называемую ИХ объекта, являющуюся реакцией на электромагнитное возбуждение, имеющее форму и свойства δ -функции. На практике воздействие имеет конечную длительность и определенную форму, поэтому временная зависимость реакции объекта несет в себе не только информацию об ИХ, но и о форме возбуждающего сигнала.

Реальные объекты не могут быть эффективно и в большинстве случаев точно смоделированы в цифровой форме. Поэтому для извлечения из измеренных данных информации об ИХ обычно используют алгоритмы цифровой обработки. Модель отклика радиолокационной цели $s[n]$ в дискретном времени при наличии шума $w[n]$ имеет вид [3]:

$$\xi[n] = s[n] + w[n] = \sum_{k=1}^l a_k \exp(-\alpha_k n T_0) \cos(2\pi f_k n T_0 + \varphi_k) + w(n), \quad (1)$$

где $n = 0, 1, \dots, N-1$ — номера отсчетов сигнала $\xi[n]$, N — число отсчетов данных; l — число гармонических составляющих сигнала; $w(n)$ — отсчеты шума;

A_k, α_k, f_k и φ_k — значения амплитуд, коэффициентов затухания, частот и начальных фаз компонент сигнала соответственно; T_0 — период дискретизации.

Полюса $z_k = \exp(\alpha_k + j2\pi f_k T_0)$ и вычеты $b_k = A_k \exp(j\varphi_k)$ существуют комплексно-сопряженными парами, поскольку значения отсчетов сигнала — действительные числа.

Рассмотрим частный случай выражения (1) зависимости (отклика цели) $h(t, \theta)$ от угла наблюдения θ [2,4]:

$$h(t, \theta) = \sum_{k=1}^l A_k(\theta) \exp\{j f_k[t_k] + v(t)\}, \quad (2)$$

где l — число собственных типов колебаний в отклике, $A_m(\theta)$ — комплексные коэффициенты, зависящие

от интенсивности собственных типов колебаний в отклике, определяемые ориентацией цели и автокорреляционной функцией отклика, f_m — k -я собственная резонансная частота, соответствующая полюсам комплексной плоскости, $v[t]$ — шум.

При фиксированном θ выражение (2) по форме напоминает скалярный случайный процесс (СПр) авторегрессии (АР), широко используемый в анализе временных рядов.

Сигнал от датчика, поступающий на обработку в многочастотную РЛС, содержит информацию о спектре отраженного излучения, поэтому вычисление коэффициентов фильтра по корреляционным соотношениям упрощается.

Алгоритм идентификации ИХ объекта в условиях априорной неопределенности статистических характеристик

Будем считать, что с выхода ФАР на устройство распознавания поступает СПр ξ_n с полностью известными статистическими характеристиками (СХ), значения которого удовлетворяют уравнению авторегрессии

$$\xi_n = \sum_{k=1}^l a_k \xi_{n-k} + w_n = \bar{\mathbf{a}}^* \bar{\boldsymbol{\xi}}_n + w_n, \quad (3)$$

где $\bar{\mathbf{a}}^T = (a_1, \dots, a_l)$ и $\bar{\boldsymbol{\xi}}^T = (\xi_{n-1}, \dots, \xi_{n-l})$ — векторы комплексных весовых коэффициентов и выборки СПр s_n , w_n — независимые выборки СПр шума удовлетворяют условиям $M[w_n] = 0$, $M[w_n^2] = \sigma_w^2$, $M[w_i w_j^*] = 0$, $\forall i \neq j$, $M[\cdot]$ — означает операцию вычисления математического ожидания (МО) от выражения в квадратных скобках. Предполагается, что СПр w_n имеет постоянную спектральную плотность мощности в полосе частот рассматриваемого сигнала от цели, что соответствует СПр БГШ, а величина l известна.

Для оценивания вектора весовых коэффициентов $\bar{\mathbf{a}}$ воспользуемся критерием минимума среднего квадрата ошибки (СКО), в соответствии с которым $M[s_n - \hat{s}_n]^2 \rightarrow \min$. Обращаясь к (3), замечаем,

что $\hat{s}_n = \sum_{k=1}^l a_k \xi_{n-k} = \bar{\mathbf{a}}^* \bar{\boldsymbol{\xi}}_n$ — является оценкой s_n по всем предыдущим значениям s_k , полученным на

интервале $k = \overline{n-1, n-l}$ до момента n . Таким образом, $\varepsilon_n = s_n - \bar{\mathbf{a}}^* \bar{\boldsymbol{\xi}}_n$ и $M[s_n - \hat{s}_n]^2 = M[s_n - \bar{\mathbf{a}}^* \bar{\boldsymbol{\xi}}_n]^2 = M[s_n^2] - 2\bar{\mathbf{a}}^* M[\bar{\boldsymbol{\xi}}_n s_n^*] + \bar{\mathbf{a}}^* M[\bar{\boldsymbol{\xi}}_n \bar{\boldsymbol{\xi}}_n^*] \bar{\mathbf{a}}$.

В соответствии с критерием минимума СКО ошибка ε_n может быть минимизирована выбором соответствующего вектора $\bar{\mathbf{a}}_0$ коэффициентов a_i :

$$\bar{\mathbf{a}}_0 = \mathbf{K}_{\bar{\boldsymbol{\xi}}_n}^{-1} \bar{\mathbf{P}}_{\bar{\boldsymbol{\xi}}_n}, \quad (4)$$

где $\bar{\mathbf{P}}_{\bar{\boldsymbol{\xi}}_n} = M[\bar{\boldsymbol{\xi}}_n s_n^*]$, $\mathbf{K}_{\bar{\boldsymbol{\xi}}_n} = M[\bar{\boldsymbol{\xi}}_n \bar{\boldsymbol{\xi}}_n^*]$ — тёплицева матрица, $\mathbf{K}_{\bar{\boldsymbol{\xi}}_n}^{-1} \mathbf{K}_{\bar{\boldsymbol{\xi}}_n} = \mathbf{K}_{\bar{\boldsymbol{\xi}}_n} \mathbf{K}_{\bar{\boldsymbol{\xi}}_n}^{-1} = \mathbf{I}$, $\mathbf{I}$ — единичная матрица.

В реальных условиях работы РЛС значения $\bar{\mathbf{P}}_{\xi_s}$ и $\mathbf{K}_{\xi_n}$ априори неизвестны и должны быть заменены соответствующими оценками $\hat{\mathbf{P}}_{\xi_s}$ и $\hat{\mathbf{K}}_{\xi_n}$, полученными по обучающим выборкам. Получить оценку $\hat{\mathbf{P}}_{\xi_s}$ можно только в случае, если в распоряжении имеются выборки сигнальной составляющей s_n , что не соответствует действительности. Поэтому необходимо искать иное решение, которое позволило бы получить приемлемые результаты.

Такое решение может быть получено на основании теории обновляющих процессов [3] и соответствующих ей предположений. Применительно к рассматриваемой выше модели входного СПР ξ_n предполагается, что $\xi_n = s_n + w_n = \hat{s}_n + \hat{w}_n$, и

$$M[s_j w_k^*] = 0, \forall j > k, \quad M[\varepsilon_j \xi_k^*] = 0, \forall j > k. \quad (5)$$

В [3] показано, что ошибка ε_n в указанном случае соответствует СПР БГШ, который может быть представлен как обновляющий СП v_n . Поэтому, записывая выражение (4) в виде:

$$v_n = \xi_n - \sum_{k=1}^l \hat{a}_k \xi_{n-k} = \xi_n - \hat{\mathbf{a}}^* \bar{\xi}_n = \hat{\mathbf{a}}_0^* \bar{\xi}_n = w_n + \varepsilon_n, \quad (6)$$

где $\hat{\mathbf{a}}_0^T = (1, -a_1, -a_2, \dots, -a_l)$, $\bar{\xi}_n^T = (\xi_n, \xi_{n-1}, \dots, \xi_{n-l})$, можно определить так называемый «выбеливающий фильтр», который состоит из фильтра — оценщика и вычитателя.

В данном случае нет необходимости в знании s_n , а достаточно выполнения условия (5). Тогда, используя (4) и (5), умножая слева обе части (6) на $\bar{\xi}_n^*$ и вычисляя МО от обеих частей полученного уравнения, находим:

$$\bar{\mathbf{P}}_0^* = \hat{\mathbf{a}}_0^* \mathbf{K}_{\xi_{0n}}, \quad (7)$$

$$\text{где } \bar{\mathbf{P}}_0^* = M[v_n \bar{\xi}_n^*] = [M(v_n \xi_n^*), M(v_n \xi_{n-1}^*), \dots, M(v_n \xi_{n-l}^*)] = \\ = [M(v_n \xi_n^*), 0, 0, \dots, 0], \quad \mathbf{K}_{\xi_{0n}} = M[\bar{\xi}_n \bar{\xi}_n^*].$$

Решение уравнения регрессии (7) относительно $\bar{\mathbf{a}}_0^*$ дает следующий результат:

$$\bar{\mathbf{a}}_0^* = \bar{\mathbf{P}}_0^* \mathbf{K}_{\xi_{0n}}^{-1}. \quad (8)$$

В гауссовском случае (при параметрической априорной неопределенности числовых характеристик распределения вероятностей) значения $\bar{\mathbf{P}}_0^*$ и $\mathbf{K}_{\xi_{0n}}$ неизвестны и заменяются оценками максимального правдоподобия $\hat{\mathbf{P}}_0^*$ и $\hat{\mathbf{K}}_{\xi_{0n}}$, определяемыми выражениями:

$$\hat{\mathbf{K}}_{\xi_{0n}} = \chi^{-1} \sum_{i=1}^{\chi} \bar{\xi}_i \bar{\xi}_i^*, \quad \hat{\mathbf{P}}_{\xi_s} = \chi^{-1} \sum_{i=1}^{\chi} \bar{\xi}_i s_i, \quad \chi > l. \quad (9)$$

Следует отметить, что наряду с применением оценок (9) могут использоваться итеративные алгоритмы стохастической аппроксимации и непосредственного обращения выборочной матрицы.

Подстановка (9) в (8) позволяет найти оценку вектора $\hat{\mathbf{a}}_0^*$ коэффициентов. При этом точность оцен-

ки зависит от отношения сигнал — шум по каждой из выборок. Естественно ожидать, что увеличения отношения сигнал — шум можно добиться путем накопления пачечного сигнала и использования нескольких пачек сигнала.

Кроме этого, уменьшить влияние шумов при оценке корреляционной матрицы можно следующими тремя способами [2]:

1) повышением мощности зондирующих импульсов путем введения внутриимпульсной ЛЧМ или ЧМ более высоких порядков с последующим сжатием эхо-сигналов в согласованном фильтре;

2) увеличением длительности пачки импульсов, облучающих цель;

3) многократным периодическим повторением зондирующего сигнала и усреднением выборок до вычисления корреляционной матрицы.

При этом время усреднения ограничивается изменением угла визирования цели θ по времени. Оценить число собственных резонансов цели l в (6), равных сумме больших собственных чисел ковариационной матрицы $\hat{\mathbf{K}}_{\xi_{0n}}$, можно в результате выполнения унитарного преобразования $\hat{\mathbf{K}}_{\xi_{0n}} = \hat{\mathbf{U}} \cdot \hat{\mathbf{\Lambda}} \cdot \hat{\mathbf{U}}^*$, где $\hat{\mathbf{U}}$ — матрица собственных векторов, $\hat{\mathbf{\Lambda}}$ — матрица собственных чисел. Число выборок k при этом должно выбираться из условия $k > l$.

Поиск собственных чисел $\hat{\mathbf{\Lambda}}$ и собственных векторов $\hat{\mathbf{U}}$ оценки ковариационной матрицы $\hat{\mathbf{K}}_{\xi_{0n}}$ можно выполнить одним из хорошо известных методов [5]. К ним относятся метод вращений, метод биекций, QR-алгоритм и ряд других. Для получения оценок собственных чисел и собственных векторов необходимо использовать итерационный подход, при котором на каждой итерации уменьшается величина внедиагональных элементов матрицы. В [5] показано, что, например, на каждое собственное значение в QR-алгоритме требуется пять итераций, на каждый собственный вектор в обратных итерациях необходимо три итерации, для реализации метода вращения требуется шесть циклов. При этом вычисления должны выполняться с двойной точностью.

Алгоритм оценивания числа полюсов и нулей системной функции

Решения систем уравнений (7) и (11) предполагают, что длина ИХ l известна. Для разных объектов эта величина может быть различной и поэтому для получения решения требуется оценить величину $\hat{l}$, используя методы проверки статистических гипотез. Предлагаем следующий алгоритм оценки величины l .

Сформулируем гипотезы относительно l по следующему правилу:

$$H_i: \xi_{in} = \sum_{k=1}^i a_k \xi_{n-k} + w_n; \quad l+1 > i \geq 1. \quad (10)$$

В такой постановке оценка l сводится к решению задачи многоальтернативного обнаружения, в соответствии с которой необходимо сформировать

$i(i-1)/2$ отношений правдоподобия (или их логарифмов):

$$\Lambda_{ij} = \frac{p(\xi_n | H_i)}{p(\xi_n | H_j)} \underset{<}{\overset{\geq}{\gamma}}_{ij}, \quad \forall i, j = \overline{1, \rho}, \quad \forall i \neq j, \quad (11)$$

сравнить их с соответствующими порогами и между собой и выбрать наибольшее по величине. Соответствующая ему величина $\hat{l}$ будет принята за оценку числа l .

В гауссовском случае, вводя промежуточную гипотезу $H_0: \xi_n = w_n$, можно перейти к двухэтапной процедуре проверки статистических гипотез. На первом этапе проверять ρ гипотез $H_i, i = \overline{1, \rho}$ против альтернативы, что истинна гипотеза H_0 . На втором этапе осуществлять сравнение полученных отношений правдоподобия между собой и выбрать наибольшее

$$\ln \Lambda_{ij} = \frac{1}{\sigma_0^2} [\tilde{\xi}^* \mathbf{H}_i \tilde{\xi} - \tilde{\xi}^* \mathbf{H}_j \tilde{\xi}] = \frac{1}{\sigma_0^2} [\tilde{\xi}^* \hat{\mathbf{s}}_i - \tilde{\xi}^* \hat{\mathbf{s}}_j] \underset{<}{\overset{\geq}{0}}, \quad (12)$$

где σ_0^2 — дисперсия БГШ, $\mathbf{H}_i$ и $\mathbf{H}_j$ — циклические (ганкелевы) матрицы размера $i \times i$ и $j \times j$, $\hat{\mathbf{s}}_i = \mathbf{H}_i \tilde{\xi}$ и $\hat{\mathbf{s}}_j = \mathbf{H}_j \tilde{\xi}$ — оценки, формируемые на выходе оптимального приемника в виде оценщика-коррелятора [6].

Возможны и другие канонические реализации оптимальных приемников, описанные в [7].

В [7] показано, что ковариационная матрица оценки сигнала $\mathbf{K}_{\hat{S}_i} = \mathbf{M}[\hat{\mathbf{s}}_i \hat{\mathbf{s}}_i^*]$ имеет ранг, равный рангу ковариационной матрицы $\mathbf{K}_{S_i} = \mathbf{M}[\tilde{\mathbf{s}}_i \tilde{\mathbf{s}}_i^*]$. Это позволяет использовать процедуру Грамма—Шмидта для оценки ранга p неизвестной матрицы $\mathbf{K}_{S_i}$ в случае приема сигнала в условиях параметрической априорной неопределенности числовых характеристик входного СПр.

На практике отсчеты данных искажены аддитивным шумом наблюдения, что приводит к ухудшению характеристик и разрешения СП АР и спектральных оценок. Считается, что это ухудшение обусловлено тем, что используемая при спектральном анализе модель только с одними полюсами при наличии шума наблюдения оказывается уже непригодной. Поэтому вместо СП АР необходимо использовать более сложную модель авторегрессии — скользящего среднего (АРСС)

$$\xi_n = - \sum_{k=1}^l a_k \xi_{n-k} + \sum_{k=0}^p b_k v_{n-k} = -\tilde{\mathbf{a}}_0^* \tilde{\xi} + \tilde{\mathbf{b}}_0^* \tilde{\mathbf{v}}, \quad (13)$$

где v_n — СПр БГШ.

В работе [7] оценивание весовых коэффициентов выполняется для многомерного СПр $\tilde{\xi}_n$ АРСС в реальном масштабе времени при фиксированных значениях l . Процедура оценки выполняется двумя последовательно включенными фильтрами. Первый из них является трансверсальным КИХ, а второй — рекурсивным БИХ фильтром.

Величина z_n формируется с помощью трансверсального фильтра

$$z_n = \xi_n + \sum_{k=1}^l a_k \xi_{n-k} = \xi_n + \tilde{\mathbf{a}}^* \tilde{\mathbf{v}}_{n-1}. \quad (14)$$

Вектор оптимальных весовых коэффициентов такого фильтра $\tilde{\mathbf{a}}_0$ определяется аналогично (8) как решение уравнения регрессии (7). Для оценивания вектора весовых коэффициентов фильтра $\tilde{\mathbf{b}}_0$, определяемых суммой в правой части формулы (13), можно использовать метод Ньютона [7]. При неизвестных корреляционных характеристиках процесса z_n определяют выборочные оценки максимального правдоподобия и используют их в алгоритме (13).

Если l неизвестно, то для его оценивания необходимо осуществить проверку гипотез о числе $l, i = \overline{0, l+1}$. С этой целью для $\forall i = \overline{1, l+1}$ достаточно выполнять, например, проверку гипотез о равенстве нулю некоторых коэффициентов регрессии, принадлежащих текущему значению i . Если среди элементов вектора $\tilde{\mathbf{b}}_0$ отсутствуют нулевые элементы, то процедура должна продолжаться до появления хотя бы одного нулевого элемента.

Параллельно с проверкой гипотез о l должна выполняться оценка $\tilde{\mathbf{a}}_{0i} \quad \forall i = \overline{1, l+1}$.

На выходах фильтра устанавливается решающее устройство, которое реализует алгоритм (13)–(14). Устройство выполняет адаптивную обработку в соответствии с алгоритмом, описанным в [7].

Реализация предложенного алгоритма может осуществляться программным путем на основе специализированного ЦОС.

Заключение

Предложенные в работе оптимальные процедуры оценивания ранга сигнальной составляющей $\tilde{\mathbf{s}}_n$ СП $\tilde{\xi}_n$ сравнительно просто реализуются с помощью специально созданных адаптивных алгоритмов цифровой обработки, обладают высокой эффективностью и могут быть использованы при решении задач разрешения точечных объектов и распознавания образов по их ИХ.

Применение предварительной адаптивной ви́неровской фильтрации позволяет существенно улучшить характеристики предложенного алгоритма и избавиться от ограничений, указанных выше [7].

1. Небабин В.Г., Сергеев В.В. Методы и техника радиолокационного распознавания. М.: Радио и связь, 1984. 152 с.
2. Радиозлектронные системы. Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, переработанное и доп. / Под редакцией Я.Д.Ширмана, М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
3. Марпл-мл. С.Р. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 584 с.
4. Розанов Ю.А. Теория обновляющих процессов. М.: Наука, 1974. 128 с.
5. Уилкинсон Дж.Х. Алгебраическая проблема собственных значений. М.: Наука, 1970. 564 с.

6. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т.3. Обработка сигналов в радио и гидролокации и прием случайных гауссовых сигналов на фоне помех / Пер с англ.; под ред. В.Т.Горяинова. М.: Сов. радио, 1977. 664 с.
7. Давыдов В.С., Лукошкин А.П., Шаталов А.А., Ястребков А.Б. Радиолокация сложных целей. Разрешение и распознавание. СПб.: Янис, 1993. 280 с.

References

1. Nebabin V.G., Sergeyev V.V. Metody i tekhnika radiolokatsionnogo raspoznavaniya. [Methods and techniques of radar recognition]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1984, 152 p.
2. Radioelektronnyye sistemy. Osnovy postroyeniya i teoriya. [Electronic systems. Basics of construction and theory]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2007, 512 p.
3. Marple Jr. S.R. Digital Spectral Analysis: With Applications/Disk, Pc/MS Dos/IBM/Pc/at (Prentice Hall Signal Processing Series). Prentice Hall, 1987, 492 p. (Rus. ed.: Tsifrovoy spektralnyy analiz i yego prilozheniya. Moscow, Mir Publ., 1990, 584 p.).
4. Yu.A. Rozanov Teoriya obnovyayushchikh protsessov [The theory of renewal processes]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 128 p.
5. Wilkinson J.H. *The Algebraic Eigenvalue Problem*. Monograph on Numerical Analysis. Clarendon Press, Oxford, 1965, 662pp. (Rus.ed.: Algebraicheskaya problema sobstvennykh znacheniy. Moscow, Nauka, 1970, 564 p.).
6. Van Trees H. Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part III: Radar-Sonar Signal Processing and Gaussian Signals in Noise. New York, Wiley, 1972. (Rus. ed.: Teoriya obnaruzheniya, otsenok i modulyatsii. t.3. Obrabotka signalov v radio i gidrolokatsii i priyem sluchaynykh gaussovykh signalov na fone pomekh. Moscow, Sov. Radio Publ., 1977, 664 p.).
7. Davydov V.S., Lukoshkin A.P., Shatalov A.A. et al. Radiolokatsiya slozhnykh tseley. Razresheniye i raspoznavaniye [Radar of complex targets. Resolution and recognition]. Saint Petersburg, Yanis Publ., 1993. 280 p.

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ДЕМОДУЛЯТОРА СИГНАЛА КАМ-16 ПРИ ТРАНСФОРМАЦИИ ГРАНИЦ СИГНАЛЬНОГО СОЗВЕЗДИЯ В КАНАЛЕ С МНОГОЛУЧЕВОСТЬЮ**Г.М.Сидельников****NOISE STABILITY OF THE KAM-16 SIGNAL DEMODULATOR WHEN TRANSFORMING THE BOUNDARIES OF THE SIGNAL CONSTELLATION IN A CHANNEL WITH MULTIPATH****G.M.Sidelnikov***Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск, sid53@ngs.ru*

Проведен анализ помехоустойчивости демодулятора с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ-16) в каналах с многолучевостью при изменении конфигурации границ сигнального созвездия. Предложенный метод анализа построен на основе применения аппарата векторной алгебры, который позволяет учесть тонкую структуру многолучевого поля, включающую в себя учет значений информационных символов, задержек отраженных сигналов, а также их амплитуд и фаз. Помехоустойчивость приема определялась на основе интегральных функций распределения расстояний сигнала до границ принятия решений, полученных методом компьютерного моделирования. Показано, что трансформация границ сигнального созвездия эффективна только при малых задержках отраженных сигналов. Увеличение задержки отраженных сигналов в пределах длительности посылки значительно снижает помехоустойчивость. Установлено, что в канале с многолучевостью вращение границ принятия решений позволяет увеличить помехоустойчивость демодулятора на 10 дБ по сравнению с системой без вращения.

Ключевые слова: аппарат векторной алгебры, интегральная функция распределения, вращение границ принятия решений

Для цитирования: Сидельников Г.М. Помехоустойчивость демодулятора сигнала КАМ-16 при трансформации границ сигнального созвездия в канале с многолучевостью // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С.76-81. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).76-81](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).76-81)

The analysis of noise stability of a demodulator with quadrature amplitude modulation (KAM-16) in channels with multipath when changing the configuration of the boundaries of the signal constellation is carried out. The proposed method of analysis is based on the use of the vector algebra apparatus, which allows taking into account the fine structure of the multipath field, including the values of information symbols, delays of reflected signals, as well as their amplitudes and phases. The noise stability of reception was determined on the basis of integral distribution functions of signal distances to decision boundaries obtained by computer modeling. It is shown that the transformation of signal boundaries is effective only for small delays of reflected signals. Increasing the delay of reflected signals within the duration of sending significantly reduces noise stability. It is established that in a channel with multipath, the rotation of the decision boundaries can increase the noise immunity of the demodulator by 10 dB compared to the system without rotation.

Keywords: the apparatus of vector algebra, the cumulative distribution function, the rotation of the boundaries of decision-making

For citation: Sidelnikov G.M. Noise stability of the KAM-16 signal demodulator when transforming the boundaries of the signal constellation in a channel with multipath // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.76-81. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).76-81](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).76-81)

1. Введение

Повышенный интерес к квадратурной амплитудно-фазовой модуляции (КАМ) связан с ее высокой спектральной эффективностью [1]. Принципы и алгоритмы когерентного приема сигналов КАМ с прямоугольной конфигурацией созвездия на фоне аддитивного гауссова шума для модулирующего кода с кодовым расстоянием, равным единице, был рассмотрен в [2-4]. Воздействие аддитивной помехи накладывает свои отпечатки в снижение помехоустойчивости, связанное с изменением фаз квадратурных составляющих [5-7]. Кроме того, в [8] предложена методика трансформации сигнального созвездия сигналов с КАМ-16 с изменением его формы, где проведен поиск компромиссных решений между требуемым значением пик-фактора и допустимым минимальным сигнальным

расстоянием. К тому же сигнальные конструкции КАМ с трансформированными созвездиями нашли применение в телевизионном стандарте DVB-T2 [9], где поворот всех точек сигнального созвездия осуществлялся на $16,8^\circ$, что дает возможность получить неповторимые уникальные координаты по квадратурным и синфазным осям координат сигнала. В [10-11] предложены методы оценки помехоустойчивости сигнальных конструкций КАМ с трансформированными сигнальными созвездиями, где приведен вариант более плотной упаковки сигнальных расстояний, что повышает помехоустойчивость и снижает пик-фактор сигнала. Как показано в [12], принцип трансформации может быть любой, но без нарушений энергетических соотношений в сигнале.

Актуальность решаемой задачи связана с тем, что совершенствование радиосистем требует созда-

ния инженерных методов, которые позволяют учесть тонкую структуру многолучевого поля, включающего в себя как количество лучей, их интенсивность, задержку, фазу, а также порядок следования информационных символов [13]. Использование аппарата векторной алгебры позволяет получить статистические характеристики сигнальных расстояний как в зависимости от параметров многолучевого поля [14], так и при изменении конфигурации границ принятия решений сигнального созвездия КАМ-16.

Целью данной работы является разработка инженерного метода для определения помехоустойчивости демодулятора КАМ-16 в канале с многолучевостью и действия гауссовской помехи при трансформации границ сигнального созвездия.

2. Определение сигнальных расстояний при вращении границ созвездия КАМ-16

В однолучевом канале помехоустойчивость демодулятора при воздействии гауссовского шума определяется сигнальными расстояниями между сигналами, при этом граница принятия решений устанавливается кодовым расстоянием [4]. В канале со слабой многолучевостью сигнальные расстояния изменяются в меньшей мере, чем расстояния до границ принятия решений, что приводит к значительной разнице попарных переходных вероятностей ошибки [13].

Рассмотрим изменения расстояний до границ принятия решений для сигнала КАМ-16 для двухлучевой модели многолучевого канала, который включает основной и дополнительный луч, который является результирующим при сложении многих лучей. На первом этапе анализа необходимо определить аналитическую зависимость расстояния до границы принятия решения от угла поворота конфигурации границ.

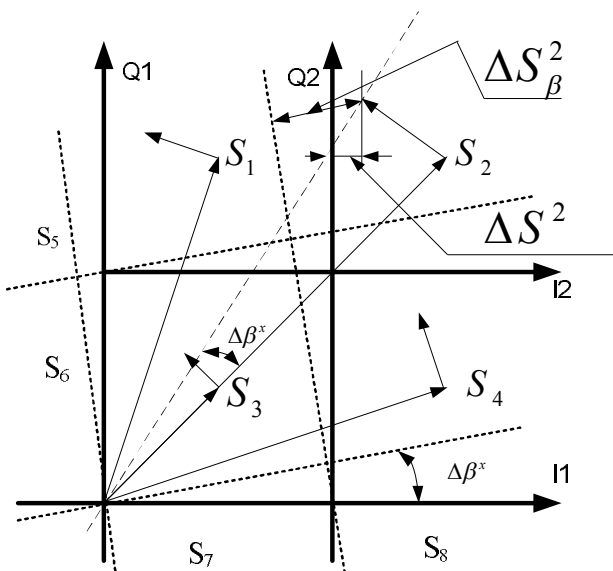


Рис.1. Деформация части сигнального созвездия КАМ-16 при приходе задержанного луча с изменением конфигурации границ принятия решения

На рис.1 представлена часть сигнального созвездия для КАМ-16 при двух конфигураций границ принятия решений, где результирующий вектор явля-

ется суммой основного и задержанного сигнала. Наиболее уязвимым вектором в двухлучевом канале является сигнал S_2 , так как для него предельное минимальное расстояние до линии принятия решения достигается при $S_3 = 0,236S_0$, в то время как для остальных сигналов оно значительно больше [14]. До поворота границ для сигнала S_2 расстояние до границы равно ΔS^2 . Здесь же пунктирными линиями показаны новые границы принятия решений (ГПР), полученные при повороте на угол $\Delta\beta^x$. При смещении ГПР на угол $\Delta\beta^x$ новое расстояние для сигнала S_2 равно ΔS_β^2 . Для сигнала S_2 при повороте на $\Delta\beta^x$ ГПР наилучшее для минимизации переходной вероятности $P(S_2 \rightarrow S_1)$, а для переходной вероятности $P(S_2 \rightarrow S_4)$, что будет показано ниже.

Таким образом, угол смещения результирующего вектора сигнала S_2 определяется углом поворота границ принятия решений $\Delta\beta^x$. Угол смещения может быть определен при зондировании канала пилот-сигналом.

Основная задача, рассмотрения на данном этапе, это определение максимального значения величины амплитуды задержанного луча, при котором поворот границ принятия решений ведет к повышению помехоустойчивости всего ансамбля сигналов.

Рассмотрим образование новых сигнальных расстояний при вращении границ принятия решений сигнального созвездия КАМ-16.

На рис.2 показано образование новых сигнальных расстояний при вращении границ принятия решений в направлении дополнительного луча на угол $\Delta\beta^x$ для сигналов S_2 и S_1 .

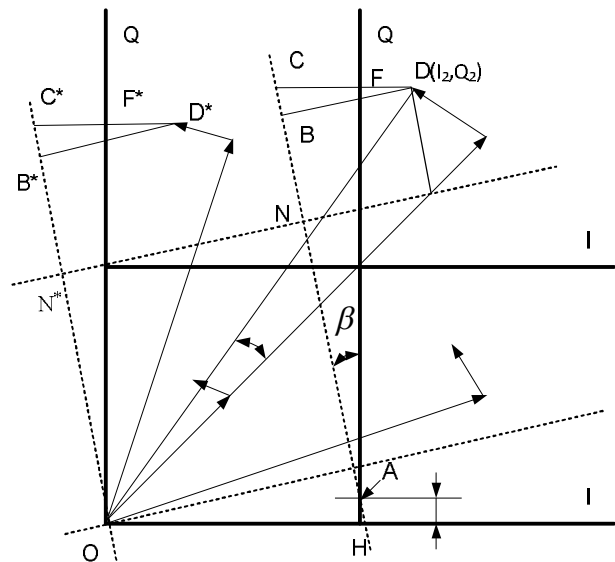


Рис.2. Образование новых относительных сигнальных расстояний при вращении границ принятия решений в направлении дополнительного луча

Из рассмотрения треугольника ACF следует, что $CF = \tan \beta^x AF$, где $AF = FH - AH$. Расстояние AH определяется как $AH = 2 \tan(\beta^x / 2)$, а $FH = Q(S_2^\Sigma)$ —

квадратурная составляющая сигнала S_2^Σ , которая определяется как [5]:

$$Q(S_2^\Sigma) = S_2 \sin \alpha_2 + S_3 \left(1 - \frac{t_3}{T}\right) \sin(\alpha_2 + \varphi) + S_3 \left(\frac{t_3}{T}\right) \sin(\beta_i + \varphi), \quad (1)$$

где S_2 — амплитуда основного сигнала, α_2 — начальная информационная фаза основного сигнала, β_i — информационная фаза задержанного сигнала, t_3 — время задержки дополнительного луча, T — длительность посылки, S_3 — амплитуда задержанного луча, φ — фаза задержанного сигнала.

Таким образом, $CF = \text{tg} \beta^x (Q(S_2^\Sigma) - 2 \text{tg}(\beta^x / 2))$. Расстояние $CD = CF + FD$, где $FD = I(S_2^\Sigma) - 2$, $I(S_2^\Sigma)$ — синфазная компонента сигнала S_2^Σ , определяемая в соответствии с [5]:

$$I(S_2^\Sigma) = S_2 \cos \alpha_2 + S_3 \left(1 - \frac{t_3}{T}\right) \cos(\alpha_2 + \varphi) + S_3 \left(\frac{t_3}{T}\right) \cos(\beta_i + \varphi). \quad (2)$$

Новое сигнальное расстояние BD сигнала S_2^Σ , образованное за счет вращения, определяется как:

$$BD = \cos \beta^x \{ \text{tg} \beta^x (Q(S_2^\Sigma) - 2 \text{tg}(\beta^x / 2)) \} + I(S_2^\Sigma) - 2. \quad (3)$$

Применяя такую же методику определения нового сигнального расстояния $B^x D^x$ для сигнала S_1^Σ , получим:

$$B^x D^x = \cos \beta^x \{ \text{tg} \beta^x (Q(S_1^\Sigma)) \} + I(S_1^\Sigma). \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) определяют новые расстояния до границы перехода $S_2 \rightarrow S_1$ и $S_1 \rightarrow S_5$. Для определения расстояния до границы перехода $S_2 \rightarrow S_4$ необходимо определить расстояние DN .

Рассмотрим треугольник ACF , определим уже $AC = \frac{AF}{\cos \beta^x}$, где $AF = (Q(S_2^\Sigma) - 2 \text{tg}(\beta^x / 2))$. Расстояние: $BN = AC - CB - 2 - 2 \text{tg}(\beta^x / 2)$, а с учетом треугольника BCF получим:

$$BN = \frac{Q(S_2^\Sigma) - 2 \text{tg}(\beta^x / 2)}{\cos \beta^x} - \text{tg} \beta^x BD - 2 - 2 \text{tg}(\beta^x / 2), \quad (5)$$

где BD определено в (1).

Таким же образом определяем $B^* N^*$:

$$B^* N^* = \frac{Q(S_1^\Sigma)}{\cos \beta^x} - \text{tg} \beta^x B^* D^* - 2. \quad (6)$$

Выражения (5) и (6) определяют новые сигнальные расстояния до границы перехода $S_2 \rightarrow S_4$ и $S_1 \rightarrow S_3$.

Переименуем сигнальные расстояния до границ принятия решений, определенные в (3)–(6) как:

— $BD \rightarrow \Delta S(S_2 \rightarrow S_1)$ — расстояние до границы принятия решения передачи сигнала S_1 при условии передачи сигнала S_2 ,

— $B^* D^* \rightarrow \Delta S(S_1 \rightarrow S_5)$ — расстояние до границы принятия решения передачи сигнала S_5 при условии передачи сигнала S_1 ,

— $B^* N^* \rightarrow \Delta S(S_1 \rightarrow S_3)$ — расстояние до границы принятия решения передачи сигнала S_3 при условии передачи сигнала S_3 ,

— $BN \rightarrow \Delta S(S_2 \rightarrow S_4)$ — расстояние до границы принятия решения передачи сигнала S_4 , при условии передачи сигнала S_4 .

На рис.3 представлены зависимости новых относительных сигнальных расстояний как при повороте границ принятия решений сигнального созвездия КАМ-16, так и без поворота (исходное состояние) в зависимости от фазы дополнительного луча наиболее уязвимого символа S_2 , так как он и определяет максимально допустимую амплитуду дополнительного луча, при превышении которой происходит ошибка при отсутствии гауссовского шума. Максимальная величина амплитуды задержанного луча $\max S_3 = 0,236 S_0$. Для сигнала S_1 : $\max S_3 = 0,316 S_0$, для сигнала S_3 : $\max S_3 = 0,707 S_0$ [5]. В зависимости от фазы дополнительного луча φ угол поворота может изменяться от 0 до 360°, при этом при $\varphi = 0$ и 180° поворота не происходит. Если для сигнала S_2 вращение позволяет одинаково увеличить расстояние до границ S_1 и S_4 , то для сигнала S_1 поворот не равнозначен, как видно из рис.3. Изменение границ принятия решений для сигнала S_3 не существенно по сравнению с сигналами S_1 и S_2 , поэтому в дальнейшем рассматриваться не будет.

Исследования поворота границ принятия решений показали, что равномерное увеличение сигнальных расстояний достигается только при $\beta < 13,64^\circ$, что соответствует значению амплитуды задержанного луча менее $S_3 < 0,236 S_0$. Увеличение угла поворота при увеличении амплитуды задержанного луча приводит к увеличению $\Delta S_\beta(S_2 \rightarrow S_1)$ и уменьшению $\Delta S_\beta(S_2 \rightarrow S_4)$, что негативно сказывается при действии гауссовской аддитивной помехи. При увеличении длительности задержки сказывается влияние информационного символа β , в выражении (1), что приводит к изменению сигнальных расстояний для символов созвездия КАМ-16. Эти изменения незначительны при задержке менее 20% от длительности посылки.

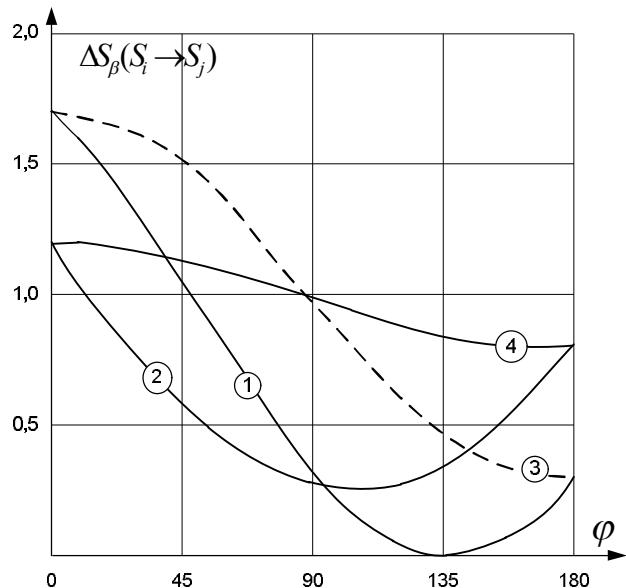


Рис.3 Зависимость относительных сигнальных расстояний при повороте на угол β границ принятия решений сигнального созвездия КАМ-16 от фазы задержанного луча. Кривая 1 — $\Delta S(S_2 \rightarrow S_1)$, кривая 2 — $\Delta S(S_1 \rightarrow S_5)$ исходное расстояние без поворота, кривая 3 — $\Delta S_\beta(S_2 \rightarrow S_1)$, $\Delta S_\beta(S_2 \rightarrow S_4)$, $\Delta S_\beta(S_1 \rightarrow S_3)$, кривая 4 — $\Delta S_\beta(S_1 \rightarrow S_5)$, при повороте на угол β

Для определения помехоустойчивости приема сигналов КАМ-16 при вращении границ принятия решений в канале с многолучевостью необходимо определить вероятностные характеристики изменения сигнальных расстояний.

3. Расчет статистических характеристик сигнальных расстояний КАМ-16 при изменении границ принятия решений

Для определения помехоустойчивости приема сигналов КАМ-16 в канале с многолучевостью необходимы статистические характеристики сигнальных расстояний, вызванные случайными изменениями амплитуды, задержки, фазы и информационными параметрами дополнительного луча. Рассмотрим двухлучевой канал, где дополнительный луч является суперпозицией многих лучей.

В соответствии с теорией случайных процессов [15] плотность распределения случайной величины на выходе нелинейного функционала, который обозначается как $y = f(x)$, где x — входной случайный параметр, имеющий плотность распределения $W(x)$, определяется как:

$$W(y) = \sum_i W_x[f^{-1}(y)] \left| \frac{dx_i}{dy} \right|,$$

где $x = f^{-1}(y)$ — обратный функционал $y = f(x)$, $i = N$, если одному значению y соответствует N значений x .

В рассматриваемом случае нелинейным функционалом $f(x)$ является сигнальное расстояние определяемой выражениями (3)-(6), а x — случайной фазой φ . Угол поворота границ определяется смещением сигнала S_2 , который равен:

$$\beta^x = \arctg\left(\frac{Q(S_2^x)}{I(S_2^x)}\right) - \arctg(1).$$

Учитывая сложность математических вычислений, целесообразно вычисления проводить численным методом на ЭВМ [5].

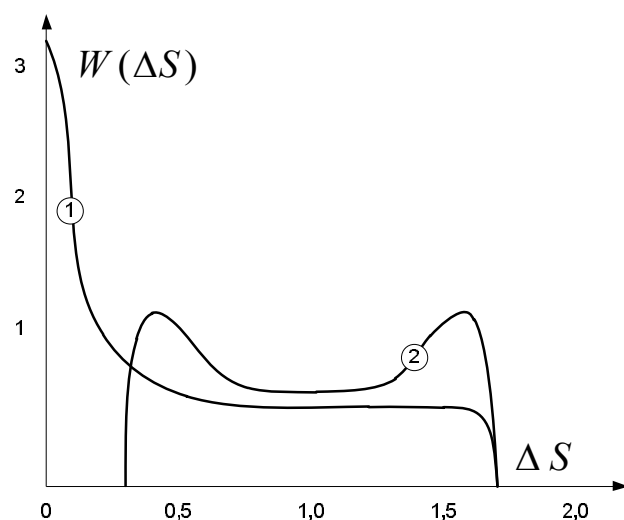


Рис.4. Плотность распределения вероятностей относительно сигнального расстояния $\Delta S(S_2 \rightarrow S_1)$ для предельного значения задержанного луча, равного $S_3 = 0,236S_2$, до поворота — кривая 1 и после поворота на угол β^x — кривая 2

На рис. 4 представлены плотности распределения вероятностей сигнального расстояния до границы принятия решения для наиболее уязвимого символа сигнала S_2 без поворота и после поворота на угол β^x . Выигрыш очень существен, так как угол поворота определялся именно для сигнала S_2 . При увеличении амплитуды задержанного сигнала выше предельного $S_3 > 0,236S_2$, выигрыш уменьшается, но не благоприятно сказывается на других сигналах созвездия КАМ-16.

На рис.5 представлены плотности распределения вероятностей сигнального расстояния до границы принятия решения для сигнала S_1 $\Delta S(S_1 \rightarrow S_2)$ без поворота и после поворота на угол β^x , где выигрыш незначителен, а для $\Delta S(S_1 \rightarrow S_3)$ практически не меняется.

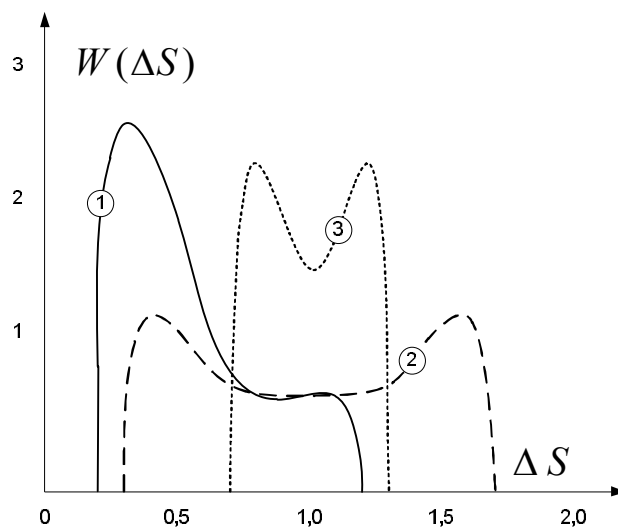


Рис.5. Плотность распределения вероятностей относительно сигнального расстояния $\Delta S(S_1 \rightarrow S_2)$ для предельного значения задержанного луча, равного $S_3 = 0,236S_2$, до поворота — кривая 1, после поворота на угол β^x — кривая 2 и $\Delta S(S_1 \rightarrow S_3)$ — кривая 3

Рассмотрение плотностей распределения вероятностей сигнальных расстояний до границы принятия решений дает возможность определить увеличение расстояний при различных углах поворота. Как показали исследования, то именно угол поворота, определяемый на основе рассмотрения деформации сигнального расстояния сигнала S_2 , является оптимальным.

4. Расчет вероятности ошибки при когерентном приеме сигналов КАМ-16 при вращении границ принятия решений

Для получения окончательных выводов об эффективности вращении границ принятия решений в канале с многолучевостью необходимо рассмотреть помехоустойчивость при воздействии гауссовской помехи и полученных вероятностных характеристик канала.

Переходная вероятность ошибки при изменении границ принятия решений определяется как [3]:

$$P(S_i \rightarrow S_j) = \int_0^\infty Q\left(\sqrt{\frac{\Delta S \cdot E}{10N}}\right) \cdot W(\Delta S) d\Delta S, \quad (7)$$

где $W(\Delta S)$ — плотность распределения вероятностей расстояния ΔS между сигналом S_i и границей принятия

тия решений сигнала S_j , E/N — отношение энергии сигнала к спектральной плотности мощности гауссовского шума, $Q(x)$ — табулированный интеграл вероятностей, определяемый как:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt.$$

Выражение (7) для различных значений $W(\Delta S)$ необходимо решать численными методами.

На рис.6 приведены зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/шум для сигналов S_1 и S_2 до поворота границ сигнального созвездия и после поворота, при этом сигнал S_3 не рассматривался, так как он находится в наиболее выгодном расположении.

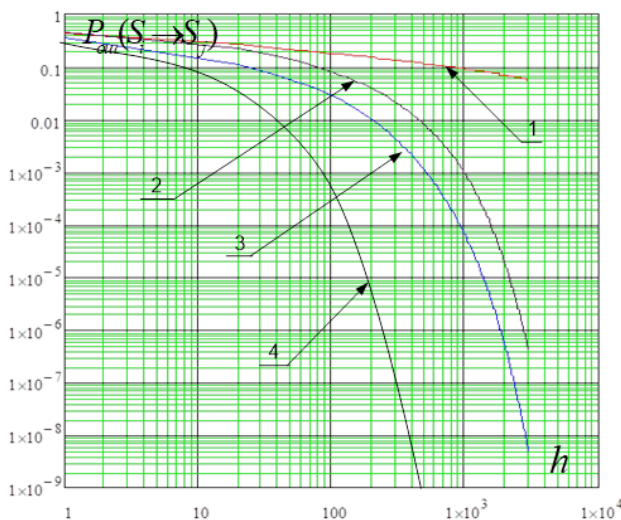


Рис.6. Зависимость переходных вероятностей ошибок от отношения сигнал/шум для различных сигналов созвездия KAM-16 в соответствии с рис.1. Кривая 1 — $P(S_2 \rightarrow S_1) = P(S_2 \rightarrow S_4)$ без вращения, кривая 2 — $P(S_1 \rightarrow S_5) = P(S_1 \rightarrow S_3)$ без вращения, кривая 3 — $P(S_2 \rightarrow S_1) = P(S_2 \rightarrow S_4) = P(S_1 \rightarrow S_3)$ при вращении, кривая 4 — $P(S_1 \rightarrow S_5)$ при вращении

При предельной амплитуде задержанного луча, равной $S_3 = 0,236S_2$, помехоустойчивость приема S_2 очень низкая, в то время как для остальных сигналов она приемлемая. Поскольку угол вращения определялся на основе рассмотрения деформации сигнала, то и переходные вероятности $P(S_2 \rightarrow S_1)$ и $P(S_2 \rightarrow S_4)$ равны между собой. Поворот границ сигнального созвездия благоприятно сказывается и на приеме сигнала S_1 , не говоря уже о сигнале S_3 , для которого при малых задержках вращение мало сказывается, так как амплитуда дополнительного луча для него сравнительно мала. Таким образом, вращение границ принятия решений позволяет увеличить помехоустойчивость демодулятора на 10 дБ в канале при предельной амплитуде задержанного луча по сравнению с системой без вращения.

5. Заключение

Рассмотренный метод вращения границ сигнального созвездия на основе анализа деформации зоны принятия решений наиболее уязвимых символов в многолучевом канале позволяет увеличить помехо-

устойчивость для предельных значений амплитуд задержанных сигналов.

Данный метод эффективен при стационарном положении приемного устройства, так как уменьшение скорости передачи за счет передачи пилот-сигналов незначительно.

Предложенный метод, включающий в себя анализ характера деформации сигнальных расстояний, рассмотрение их статистических характеристик, построенных на моделях многолучевого канала и расчета помехоустойчивости при воздействии гауссовского шума, позволяет рассматривать различные методы повышения эффективности приема.

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. Изд. 2-е, испр. М.: Издат. дом «Вильямс», 2003. 1104 с.
2. Мартиросов В.Е. Когерентные алгоритмы посимвольного приема сигналов QAM // Электросвязь. 2007. №1. С.47-51.
3. Мартиросов В.Е., Рамирес Х.А. Помехоустойчивость когерентного прием сигналов QAM // Электросвязь. 2007. №5. С. 44-48.
4. Алехин В.А., Шеболюков В.В. Помехоустойчивость сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2009. Т.90. №1. С.7-14.
5. Янушковский А.Ю., Кривошейкин А.В. Помехоустойчивость приема сигналов фазоамплитудной модуляции в условиях неидеальности квадратурных каналов // Изв. вузов. Приборостроение. Электронные и электромагнитные устройства. 2010. Т.53. №10. С.58-63.
6. Янушковский А.Ю., Кривошейкин А.В. Точность определения параметров демодулятора в системах с квадратурной амплитудно-фазовой модуляцией // Изв. вузов. Приборостроение. Электронные и электромагнитные устройства. 2010. Т.53. №10. С.55-60.
7. Яценко С.Ю. Анализ влияния искажений и шумов на помехоустойчивость приема сигналов квадратурной амплитудной модуляции // Журнал радиоэлектроники. 2016, №5. С.3.
8. Гужва А.Ю., Дворников С.В., Русин А.А., Пшеничников А.В. Методика трансформации сигнального созвездия KAM-16 с изменением его формы // Электросвязь. 2015. №2. С.28-31.
9. Framing structure, channel coding and modulation for second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2) [Эл. ресурс] // DVB. URL: <https://dvb.org/?standard=frame-structure-channel-coding-and-modulation> (дата обращения 24.01.2021).
10. Дворников С.В., Пшеничников А.В., Бурыкин Д.А. Структурно-функциональная модель сигнального созвездия с повышенной помехоустойчивостью // Информация и космос. 2015. №2. С.4-7.
11. Дворников С.В., Пшеничников А.В., Эконом В.П. Метод оценки помехоустойчивости сигнальных конструкций квадратурной модуляции с трансформированными констелляционными диаграммами // Радиопромышленность. 2017. №1. С.51-56.
12. Chen Y., Ueng Y. Noncoherent amplitude/phase modulated transmission schemes for rayleigh block fading channels // IEEE Transaction on communication. 2013. Vol.61. №1. P.217-227. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2012.101712.120023>
13. Сидельников Г.М. Помехоустойчивость демодуляторов сигналов с фазовой и относительной фазовой модуляцией в каналах с многолучевостью // Омский научный вестник. 2017. №5 (155). С.146-151.
14. Сидельников Г.М. Сравнительный анализ эффективности разнесенного приема сигналов с квадратурной амплитудной и с фазовой модуляцией в канале с дискретной многолучевостью // Вестник ПГТУ. Серия Радиотехнические и информационные системы. 2020. №2 (46). С.18-30. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2020.2.18>

15. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Советское Радио, 1970. 600 с.

References

1. Zubarev Ju.B., Krivosheev M.I., Krasnosel'skij I.N. Cifrovoe televizionnoe veshhanie. Osnovy, metody, sistemy. [Digital television broadcasting. Fundamentals, methods, systems]. Moscow, Nauchno-issledovatel'skij institut radio, 2001, 568 p.
2. Martirosov V.E. Kogerentnye algoritmy posimvol'nogo priema signalov QAM [Coherent algorithms for character-by-character reception of QAM signals]. *Elektrosvyaz*, 2007, no. 1, pp. 47-51.
3. Martirosov V.E., Ramires H.A. Pomehoustojchivost' kogerentnogo priema signalov QAM [Noise Immunity of coherent QAM signal reception]. *Elektrosvyaz*, 2007, no. 5, pp 44-48.
4. Alehin V.A., Shebolkin V.V. Pomehoustojchivost' signalov s kvadraturnoj amplitudnoj moduljaciej [Noise Immunity of signals with quadrature amplitude modulation]. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2009, no. 1, vol.90, pp.7-14.
5. Janushkovskij A.Ju., Krivoshejkin A.V. Pomehoustojchivost' priema signalov fazoamplitudnoj moduljaciej v uslovijah neideal'nosti kvadraturnyh kanalov [Noise-Immune Receiving of Phase-Amplitude Modulated Signals with Imperfect Quadrature Channels]. *Journal of Instrument Engineering*, 2011, vol. 54, no. 9, pp 58-63.
6. Janushkovskij A.Ju., Krivoshejkin A.V. Tochnost' opredeleniya parametrov demodulyatora v sistemah s kvadraturnoj amplitudno-fazovoj moduljaciej. [Accuracy of determining demodulator parameters in systems with quadrature amplitude-phase modulation]. *Journal of Instrument Engineering*, 2010, vol. 53, no. 10, pp 55-60.
7. Jacenko S.Ju. Analiz iskazhenij i шумов na pomehoustojchivost' priema signalov kvadraturnoj amplitudnoj moduljaciej [Analysis of distortion and noise on the noise immunity of receiving signals of quadrature amplitude modulation]. *Radioelektronika*, 2016, no. 5, p 3
8. Guzhva A.Ju., Dvornikov S.V., Rusin, Pshenichnikov A.V. Metodika transformacii signal'nogo sozvezdija signala KAM-16 s izmeneniem ego formy [Method of transformation of the signal constellation of the QAM-16 signal with a change in its shape]. *Elektrosvyaz*, 2015, no. 2, pp. 28-31.
9. Framing structure, channel coding and modulation for second generation digital terrestrial broadcasting system (DVB-T2). DVB Document A122, Jun. 2008.
10. Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V., Burykin D.A. Strukturno-funkcional'naja model' signal'nogo sozvezdija s povyshennoj pomehoustojchivost'ju [Structural and functional model of a signal constellation with increased noise immunity]. *Information and space*, 2015, no. 2, pp. 4-7.
11. Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V., Jekonom V.P. Metod ocenki pomehoustojchivosti signal'nyh konstrukcij kvadraturnoj moduljaciej s transformirovannymi konstellyacionnymi diagrammami [Method for evaluating the noise immunity of signal structures of quadrature modulation with transformed constellation diagrams]. *Radio industry (Russia)*, 2017, no. 1, pp 51-56.
12. Chen Y., Ueng Y. Noncoherent Amplitude Phase Modulated Transmission for Rayleigh Block Fading Channels. *IEEE Transaction on communication*, vol. 61, no.1, Jan. 2013, pp.217-227
13. Sidel'nikov G.M. Pomehoustojchivost' demodulyatorov signalov s fazovoj i odnositel'noj fazovoj moduljaciej v kanalakh s mnogoluchevost'ju [Noise Immunity of signal demodulators with phase and relative phase modulation in channels with multipath]. *Omskiy nauchnyy vestnik*, no. 5, pp. 146-151
14. Sidel'nikov G.M. Sravnitel'nyj analiz jeffektivnosti raznesennogo priema signalov s kvadraturnoj amplitudnoj i s fazovoj moduljaciej v kanale s diskretnoj mnogoluchevost'ju [Comparative analysis of the efficiency of distributed signal reception with quadrature amplitude m with phase modulation in a channel with discrete multipath]. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series "Radio Engineering and Information Systems"*. 2020, no. 2, pp. 18-30.
15. Tihonov V.I. Statisticheskaja radiotekhnika [Statistical radio engineering]. Sovetskoye Radio Publishing house, 1970, p.600.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ АВТОРЕГРЕССИИ

А.А.Шерстнева

RELIABILITY FORECASTING ON THE BASE OF AUTOREGRESSION MODELS FOR INFOCOMMUNICATION SYSTEMS

A.A.Sherstneva

*Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск,
asherstneva@sibgti.ru*

Рассматривается задача расчета показателей надежности инфокоммуникационных систем, основывающаяся, как правило, на статистических данных, сбор и обработку которых осуществляет система мониторинга. Для получения максимально приближенных к реальным практическим результатам расчётных показателей необходимо проводить большое число измерений. В этом смысле теория фильтрации находит широкое применение в разнообразных задачах оценивания. Популярность обусловлена возможностью эффективного решения технических вопросов и реализацией через программы математического моделирования. Статья направлена на прогнозирование параметров инфокоммуникационных систем на основе моделей авторегрессии. Целью статьи является применение методов регрессионного анализа и рассмотрение задачи оценки показателей по экспериментальным значениям для прогнозирования тренда данных. В результате предлагается решение задачи идентификации интересующего временного ряда переменных методом наименьших квадратов. Помимо теоретических выкладок, разработана программа, позволяющая автоматизировать процесс вычислений.

Ключевые слова: *регрессионный анализ, метод наименьших квадратов, прогнозирование, изменение данных, интеллектуальный анализ данных, машинное обучение*

Для цитирования: Шерстнева А.А. Прогнозирование надежности инфокоммуникационных систем на основе моделей авторегрессии // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С.82-86. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).82-86](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).82-86)

The solution to the problems of calculating the reliability indicators of infocommunication systems is based, as a rule, on statistical data. Their collection and processing are carried out by the monitoring system. To obtain the most accurate results of indicators calculation, it is necessary to conduct a large number of measurements. The article aims to make a forecast the parameters based on autoregressive models. The article considers methods of regression analysis and solves a problem indicators estimation based on experimental values for data trend forecasting. As a result, a solution to the problem of identifying the time series of variables by least squares method is proposed.

Keywords: *regression analysis, least squares estimation, forecasting, data trend, data mining, machine learning*

For citation: Sherstneva A.A. Reliability forecasting on the base of autoregression models for infocommunication systems // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.82-86. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).82-86](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).82-86)

Введение

В процессе эксплуатации инфокоммуникационных систем возникают ситуации, когда необходимо быстро принимать решение о перенастройке системы для поддержания качества обслуживания на принятом уровне. Выбор верного решения в настоящем должен быть основан на достоверном прогнозе поведения системы в будущем. Поскольку значения параметров, от которых зависит поведение системы, являются совокупностью статистических данных, собираемых системой мониторинга, то задача анализа временных рядов, рассматриваемая в статье, актуальна на сегодняшний день. Однако желательное получение таких результатов анализа, которые были бы максимально приближены к реальным значениям показателей инфокоммуникационных систем. С этой целью строится авторегрессионная модель ряда на основе прошлого поведения системы. Для решения проблемы прогнозирования до-

пускается, что полученная информация о системе актуальна и адекватно отображает поведение системы. В дальнейшем этот подход экстраполирует прошлое поведение на будущее.

Линия регрессии описывает, как меняется прогнозируемая зависимая переменная y (регрессионная переменная) при изменении независимых переменных x (предиктор). Другими словами, линия регрессии используется для прогнозирования значения y для данного значения x . Наиболее распространенной является линия регрессии наименьших квадратов, которая минимизирует вертикальное расстояние от точек данных до линии регрессии. Переменная растет линейно, т.е. в каждый равный период времени к значению переменной добавляется фиксированное приращение. Однако многие переменные, описывающие конкретные процессы в инфокоммуникационных системах, демонстрируют нелинейный рост. В этом случае целесообразно применять принцип наименьших квадратов, который обеспечивает способ эффектив-

ного выбора коэффициентов путем минимизации суммы квадратов ошибок [1,2].

При моделировании инфокоммуникационная система представляется в виде графовой модели, включающей множество состояний с описанием со-зависимостей между ними. Соответственно, необходимы программные решения, которые позволят качественно улучшить прогнозирование системных параметров, повысить точность сложных вычислений и уменьшить время обработки массивов данных. В частности, при решении поставленной задачи методом наименьших квадратов необходимо решить систему уравнений в матричной форме из $(N-k)$ -уравнений и k -неизвестных.

Постановка задачи

На рис.1 в виде графа состояний приведена модель функционирования сетевого элемента с точки зрения надежности. Здесь под сетевым элементом понимается любой элемент, который входит в состав инфокоммуникационной системы, будь то линия связи или функциональный блок. Состояние сетевого элемента контролируется системой мониторинга, которая включает как постоянный вид контроля, так и периодический. Система мониторинга позволяет получить разнообразные статистические данные и характеристики выборки [3,4].

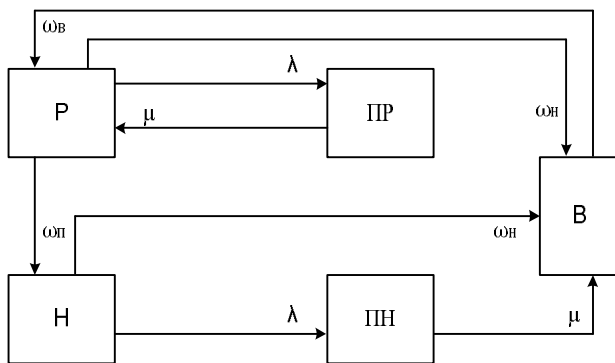


Рис.1. Граф состояний сетевого элемента

На рис.1 состояния обозначены символами Р, Н, В, которые соответствуют работоспособному, неработоспособному состояниям и состоянию восстановления, а также отдельно выделены состояния проверки сетевого элемента, который находится в работоспособном (ПР) и неработоспособном (ПН) состоянии.

Переход из одного состояния в другое осуществляется в результате обнаружения отказа элемента. Переходы обозначены через интенсивности отказов, обнаруживаемых системой контроля, периодического (ω_{Π}) и непрерывного $(\omega_{\text{Н}})$. В модели учитываются интенсивность проверки работоспособного состояния сетевого элемента (γ) , интенсивность завершения периодического контроля (μ) и интенсивность восстановления $(\omega_{\text{В}})$. Для оценки, например, надежности сетевого элемента необходимо вычислить ключевые параметры надежности. В данном случае был использован матричный метод анализа вероятностных сис-

тем [3]. Получены расчетные формулы для коэффициента простоя и среднего числа проверок, приходящегося на одно восстановление:

$$K_{\Pi} = \frac{\omega_{\Pi}\omega_{\text{В}} + \omega_0(\omega_{\text{Н}} + \gamma)}{\omega_{\text{В}}\gamma + \omega_0(\omega_{\text{В}} + \omega_{\text{Н}} + \gamma)},$$

$$n_{\text{Н}} = \frac{\gamma(1 + \omega_0)}{\omega_0(\omega_{\text{Н}} + \gamma)},$$

$$K_{\Gamma} = 1 - K_{\Pi}.$$

Для удобства вычислений в полученных расчетных формулах принято: $\omega_0 = \omega_{\text{Н}} + \omega_{\Pi}$.

По приведенным формулам можно вычислить текущие значения интересующих параметров, построить необходимые графики зависимости и сделать определенные выводы [4]. Но интерес представляет задача прогнозирования поведения системы при изменении факторов, влияющих на ее надежность, живучесть, продолжительность «жизненного цикла» и т.п. Изменение внешних и внутренних факторов системы приводит и к изменению параметров, включенных в расчетные формулы для приведенного на рис.1 примера. Используемые в модели и в расчетных формулах параметры перехода определяются по статистическим данным, которые собирает и обрабатывает система мониторинга в разные моменты времени. Таким образом, прогнозирование поведения системы в целом зависит от прогнозирования значений этих параметров. Решение задачи прогнозирования можно выполнить путем построения авторегрессионной модели ряда и дальше решить задачу идентификации авторегрессионного процесса, т.е. определения его параметров и оценки порядка с помощью возможностей программы математического моделирования Matlab.

Актуальной является задача оценивания параметров авторегрессионного процесса и дисперсии. Для решения задачи определения порядка модели используется метод наименьших квадратов. Подход заключается в допущении того, что временной ряд является авторегрессионным процессом, и тогда порядок авторегрессии увеличивают до тех пор, пока сумма квадратов ошибок в схеме оценивания параметров авторегрессии не перестанет ощутимо уменьшаться.

Популярность теории фильтрации в задачах оценивания обусловлена возможностью эффективно решения технических вопросов и реализацией через программы математического моделирования. На базе теории фильтрации созданы системы навигации и управления космическими аппаратами и другими подвижными объектами. Предлагаемая теория также находит широкое применение и при расчете надежности инфокоммуникационных систем.

Теория

Согласно теории прогнозирования лучшим результатом нахождения минимума среднеквадратичной ошибки при линейном прогнозе случайной последовательности является расчет условного математического ожидания [1,2,5-7]:

$$\hat{x}_{t+\tau} = M\{x_{t+\tau} / x_0, x_1, \dots, x_t\}.$$

С учетом приведенного выражения можно выполнить прогноз временного ряда для модели авторегрессии.

Авторегрессионная модель представляет собой:

$$X_t + a_1 X_{t-1} + a_2 X_{t-2} + \dots + a_p X_{t-p} = Z_t.$$

Или в более удобной форме записи:

$$X_t = Z_t - \sum_{n=1}^p a_n X_{t-n},$$

где $a_0, a_1, a_2, \dots, a_p$ — постоянные коэффициенты, а Z_t — белый шум.

Коэффициенты измеряют влияние каждого предиктора после учета влияния всех других предикторов в модели. Таким образом, коэффициенты измеряют предельные эффекты переменных предиктора. На практике, конечно, есть набор наблюдений, но значения коэффициентов $a_0, a_1, a_2, \dots, a_p$ неизвестны. Они должны быть оценены на основе данных. Здесь при ссылке на оценочные значения используется обозначение $\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_p$.

С помощью функции *filter* программа математического моделирования Matlab позволяет создать авторегрессионную модель. Функция *filter* с входным вектором (b, a, z) фильтрует последовательность данных $Z[m]$, используя цифровой фильтр с коэффициентами $a_n (n=0, 1, 2, \dots, p)$ и $b_n (n=0, 1, 2, \dots, p)$.

Выходная последовательность X_m определяется выражением:

$$x[m] = \frac{1}{a_0} \left(\sum_{n=0}^q b_n z[m-n] - \sum_{n=1}^p a_n x[m-n] \right),$$

где p — порядок фильтра обратной связи, а q — порядок фильтра прямой связи.

Порядок фильтра прямой связи должен быть $q=0$, чтобы создать авторегрессионную модель:

$$x[m] = \frac{1}{a_0} \left(b_0 z[m] - \sum_{n=1}^p a_n x[m-n] \right).$$

Это выражение показывает, что коэффициенты фильтра b_0 и a_0 должны быть равны единице для создания авторегрессионной модели порядка p .

$$x[m] = z[m] - \sum_{n=1}^p a_n x[m-n],$$

где $b=b_0=1$, $a=(1, a_1, \dots, a_p)$ и последовательность $Z[m]$ — белый шум.

На рис.2 показана блок-схема функции *filter* Matlab с входной последовательностью $x[m]$ и выходной последовательностью $y[m]$.

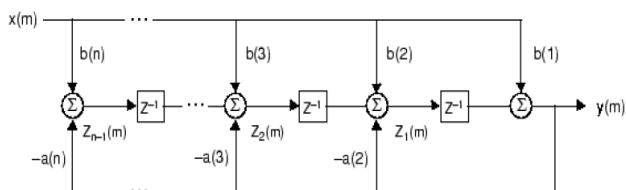


Рис.2. Схема функции «фильтр» в программе математического моделирования

Выражение авторегрессионной модели может быть представлено в виде [5-9]:

$$\sum_t \left(X_t - (\underbrace{-a_1}_{c_1} X_{t-1} - \underbrace{a_2}_{c_2} X_{t-2} - \dots - \underbrace{a_k}_{c_k} X_{t-k}) \right)^2 = \sum_t Z_t^2.$$

С учетом того, что $-a_i = c_i$, выражение, приведенное выше, можно интерпретировать как сумму ошибок в зависимости от параметра c_i .

$$q(c) = \sum_t (X_t - (c_1 X_{t-1} + c_2 X_{t-2} + \dots + c_k X_{t-k}))^2 = \sum_t Z_t^2.$$

Это выражение приводит к методу МНК с параметрами $c_1, \dots, c_k$ и матричной записи, состоящей из $(N-k)$ -уравнений и k -неизвестных:

$$\begin{bmatrix} X_{k+1} \\ X_{k+2} \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{k1} & X_{k-1} & \dots & X_1 \\ X_{k+1} & X_k & \dots & X_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{N-1} & X_{N-2} & \dots & X_{N-k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{k+1} \\ z_{k+2} \\ \vdots \\ z_N \end{bmatrix} \quad N \geq 2 \cdot k.$$

Минимальное количество наблюдений — $n=2k$ для решения системы уравнений, которая привела бы к интерполяции экспериментальных данных. Поэтому для оценки методом наименьших квадратов требуется $n > 2k$ наблюдений. Параметр c_i , который минимизирует сумму квадратов ошибок, необходимо вычислить $2k$ раз.

Применяя метод МНК, получаем решение системы уравнений:

$$\hat{c} = (H^T H)^{-1} H^T X \\ \Rightarrow \hat{a} = -\hat{c}.$$

МНК-оценка фильтра с коэффициентами $\hat{a} = (\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_k)$ и дисперсией σ_Z^2 определяется с помощью матрицы проекции P .

Матрица проекции, также известная как матрица влияния, отображает вектор значений отклика (зависимых переменных) к вектору прогнозируемых значений. Применяя матрицу влияния и ее свойства [1, 2], выражение для определения оценки дисперсии принимает вид:

$$P = H(H^T H)^{-1} H^T, \\ \hat{\sigma}_Z^2 = \frac{X^T (I - P) X}{N - 2 \cdot k}.$$

Практическая реализация

Для генерации авторегрессионного процесса необходимо отфильтровать белый шум с помощью рекурсивного цифрового фильтра.

Авторегрессионный процесс может быть сгенерирован функцией *filter*. Последовательность нормально распределенных случайных величин является реализацией дискретного белого шума. Коэффициенты фильтра принимают значения: $a_1 = 0,5$, $a_2 = 0,3$, $a_3 = 0,1$, $a_4 = 0,7$, $a_5 = 0,3$. При заданных условиях и нулевом значении коэффициентов a_0 и b_0 можно определить три входных вектора функции *filter*. Таким образом, a и b представляют собой векторы коэффициентов, а z — вектор с последовательностью белого шума. Получаем последовательность авторегресси-

онного процесса x с определенными коэффициентами фильтра и последовательностью белого шума. Порядок авторегрессионного процесса равен $p = 5$, так как коэффициенты фильтра $a_0, \dots, a_5$.

Следующей задачей является оценка параметров a_i , при $i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ и дисперсии σ_z^2 авторегрессионного процесса. Программная реализация в среде Matlab осуществляется в соответствии с теоретическими выкладками для нахождения матрицы коэффициентов и матрицы проекции.

В таблице показана МНК-оценка коэффициентов при допущении, что реальный порядок модели p известен.

МНК-оценка параметров авторегрессионного процесса

Коэффициент	Расчетное значение	Отклонение
$\hat{a}_1$	0,4749	0,0251
$\hat{a}_2$	0,2884	0,0116
$\hat{a}_3$	0,0910	0,0090
$\hat{a}_4$	0,6725	0,0275
$\hat{a}_5$	0,2883	0,0117
	Σ	0,0847

Все оценочные коэффициенты МНК-исследования несколько меньше реальных коэффициентов, но тем не менее максимально приближены к реальным. Дисперсия оценивается согласно приведенному в теоретической части выражению:

$$\sigma_z^2 = 0,8935.$$

По сравнению со встроенной функцией в программе математического моделирования дисперсия $var(z) = 0,8902$. Полученное число максимально приближенно к реальному значению.

Заключение

Подход к прогнозированию, основанный на анализе временных рядов, строится на предпосылке о том, что механизмы поведения системы не меняются со временем с тем, чтобы будущее поведение системы определялось прошлым процессом. В этом заключается и основной недостаток подхода. Параметры моделей неизбежно меняются со временем, вносятся сезонные коррективы, меняется тренд данных. Поэтому данный подход особенно результативен в случае краткосрочного прогнозирования на небольшие отрезки времени. Поиск наиболее подходящих оценок коэффициентов можно рассматривать как обучение модели. Метод регрессионного анализа является видом машинного обучения, использование которого востребовано и актуально в настоящее время.

Для нахождения коэффициентов авторегрессионного процесса были написаны программы в среде математического моделирования Matlab. Оценка порядка модели достигается использованием метода наименьших квадратов. Для нахождения порядка модели также была написана программа по заданным параметрам.

При построении моделей коротких временных рядов статистические показатели адекватности модели, такие как коэффициент детерминации, дисперсии параметров и прогнозов, а также процедуры проверки гипотез относительно параметров и построения доверительных интервалов, становятся практически не работоспособными, поскольку на коротких выборках невозможно выявить статистические закономерности. Поэтому для выбора наиболее адекватной (наилучшей) модели временного ряда среди возможных моделей необходимо привлекать экспертную информацию. По существу, в этом случае только экспертные суждения являются той доступной информацией, на основе которой можно выбрать наилучшую модель.

Решением проблемы становится комбинация статистических прогнозов и экспертных систем, предназначенных для решения задач идентификации моделей. Это позволяет значительно улучшить технологию сбора и анализировать уже структурированную информацию. Сочетание методологии мнения эксперта и объективных методов позволяет улучшить надежность прогнозов в условиях недостатка наблюдаемых данных. С помощью экспертных систем становится доступной информация о тенденциях и темпах изменения изучаемого показателя, возможных нижних и верхних границах значений временного ряда на периоде упреждения прогноза.

Чтобы улучшить описанную в статье методику, необходимо построение комплексной модели, которая будет описывать не только внешнюю, но и внутреннюю структуру системы, отражающую внутренние зависимости параметров и влияние внешних факторов. Безусловно, это означает существенно более сложные модели, их построение требует серьезной статистической информации и большого количества наблюдений, иными словами, глубокого механизма изучения процесса. Оценивание таких параметров будет рассмотрено в дальнейшем.

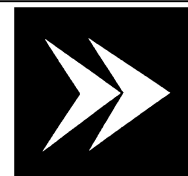
Очевидно, что прогнозы строятся на основе актуальной и достоверной информации в настоящем. Причем для улучшения прогнозирования информация обновляется постоянно, а в современных системах даже в режиме реального времени это позволяет существенно снизить указанные недостатки и корректировать возможности модели. Более того, при прогнозировании поведения реальных процессов пользуются, как правило, не только одним методом, а комплексом доступных инструментов, математических и имитационных.

1. Домбровский В.В., Пашинская Т.Ю. Оптимальные стратегии прогнозирующего управления системами со случайными параметрами, описываемыми многомерной регрессионной моделью с марковским переключением режимов // Вестник Томского гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика. 2019. №48. С.4-12. DOI: <https://doi.org/10.17223/19988605/48/1>
2. Домбровский В.В., Пашинская Т.Ю. Прогнозирующее управление системами с марковскими скачками и авторегрессионным мультипликативным шумом с марковским переключением режимов // Вестник Томского гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика. 2018. №44. С.4-9. DOI: <https://doi.org/10.17223/19988605/44/1>

3. Шерстнева А.А. Оценка параметров одномерного и двумерного распределения случайных величин // Вестник НовГУ. 2020. №5 (121). С.63-67. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.5\(121\).63-67](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.5(121).63-67)
4. Шерстнева О.Г., Шерстнева А.А. Анализ сети связи с учетом показателей надежности // Вестник РГРТУ. 2020. №73. С.52-58. DOI: <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2020-73-52-58>
5. Bergmeir C., Hyndman R.J., Koo B. A note on the validity of cross-validation for evaluating autoregressive time series prediction // Computational Statistics and Data Analysis. 2018. Vol.120. Issue C. P.70-83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csda.2017.11.003>
6. Wickramasuriya S.L., Athanasopoulos G., Hyndman R.J. Optimal forecast reconciliation for hierarchical and grouped time series through trace minimization // J American Statistical Association. 2019. Vol.114(526). P.804-819. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.2018.1448825>
7. Harrell F.E. Regression modeling strategies: With applications to linear models, logistic and ordinal regression, and survival analysis. 2nd ed. New York, USA: Springer, 2015. 582 p.
8. Паклин Н.Б., Орешков В.И. Бизнес-аналитика. От данных к знаниям. Учебное пособие. 2-е изд., СПб: Питер, 2013. 704 с.
9. Вилков А.П., Родионова Т.Е. Использование систем одновременных уравнений для получения моделей описания технических объектов // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем. 2016. №10. С.175-177.
2. Dombrovskiy V.V., Pashinskaya T.Yu. Prognostiruyushchee upravlenie sistemami s markovskimi skachkami i avtoregressionnym multiplikativnym shumom s markovskim pereklyucheniem rezhimov [Predictive control of systems with Markov jumps and autoregressive multiplicative noise with Markov mode switching]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie vychislitel'naya tekhnika i informatika [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science], 2018, no. 44, pp. 4-9.
3. Sherstneva A.A. Otsenka parametrov odnomernogo i dvumernogo raspredeleniya sluchaynykh velichin [Parameters estimation of one-dimensional and two-dimensional distribution of random variables]. Vestnik NovSU, 2020, no. 5 (121), pp. 63-67.
4. Sherstneva O.G., Sherstneva A.A. Analiz seti svyazi s uchedom pokazateley nadezhnosti [Analysis of the communication network with reliability indicators]. Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta, 2020, no. 73, pp. 52-58.
5. Bergmeir C., Hyndman R.J., Koo B. A note on the validity of cross-validation for evaluating autoregressive time series prediction. Computational Statistics and Data Analysis, 2018, no. 120, pp. 70-83.
6. Wickramasuriya S.L., Athanasopoulos G. Optimal forecast reconciliation for hierarchical and grouped time series through trace minimization. J American Statistical Association, 2019, no. 114(526). pp. 804-819.
7. Harrell F.E. Regression modeling strategies: With applications to linear models, logistic and ordinal regression, and survival analysis. 2nd ed. New York, USA, Springer, 2015. 568 p.
8. Paklin N.B., Oreshkov V.I. Biznes-analitika. Ot dannykh k znaniyam [Business analytics. From data to knowledge]. Uchebnoe posobie. Saint Petersburg, 2013. 704 p.
9. Vilkov A.P., Rodionova T.E. Ispolzovanie sistem odnovernennykh uravneniy dlya polucheniya modeley opisaniya tekhnicheskikh ob'ektov [Using systems of simultaneous equations to obtain models for describing technical objects]. Sovremennye problemy proektirovaniya, proizvodstva i ekspluatatsii radiotekhnicheskikh sistem. UGTU, 2016, no. 10, pp. 175-177.

References

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ



УДК 530.12

DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).87-88](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).87-88)

К РАСЧЕТУ ДВИЖЕНИЯ ПЕРИАСТРА

Я.И.Грановский

ON THE CALCULATION OF THE PERIASTRON'S MOTION

Ya.I.Granovsky

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, yagran1931@gmail.com

Для цитирования: Грановский Я.И. К расчету движения периастра // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С. 87-88. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).87-88](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).87-88)

For citation: Granovsky Ya.I. On the calculation of the periastron's motion // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.87-88. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).87-88](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).87-88)

В гравитационном поле сферически-симметричной звезды планета движется по плоской, вообще говоря, незамкнутой кривой. Если положить $x = a \cos(\omega t)$, $y = b \sin(\omega' t)$, то орбита замкнется при равенстве частот $\omega = \omega'$ и окажется эллипсом*. В противном случае траектория представляется фигурой Лиссажу, чем-то вроде вращающегося эллипса. Уравнение орбиты при этом выражается двояко-периодической функцией.

Согласно 1-му закону И.Кеплера орбитой планеты является неподвижный эллипс — его периастр (точка орбиты, ближайшая к звезде) после полного оборота** остается на том же месте. Однако в 1859 г. французский ученый У.Лeverье [1] обнаружил, что орбита Меркурия медленно (около 40 угловых секунд за 100 лет) поворачивается, причем влиянием остальных тел Солнечной системы этот поворот объяснить невозможно. Вскоре выяснилось, что этот эффект присущ всем планетам, но особенно он заметен у внутренних, близких к Солнцу планет.

Объяснение пришлось ждать более полувека: в 1915 г. А.Эйнштейн показал [2], что созданная им теория тяготения (известная сегодня как общая теория относительности, ОТО) без дополнительных гипотез объясняет эффект Leverье. Великий математик Д.Гильберт тут же написал Эйнштейну «Я не могу так быстро вычислять!» — он, видимо, забыл, что адресат думал и работал над ОТО долгих 10 лет после создания специальной теории относительности (СТО).

В качестве уравнения движения ОТО предлагает принцип геодезической, кратчайшей линии в пространстве-времени. То, что это предложение — гипотеза, которая не противоречит уравнениям Эйнштейна (определяющим геометрию Мира), было ус-

тановлено (в первом приближении) группой Эйнштейна [3] и независимо от нее акад. Фоком В.А. [4] и Петровой Н.М. [5] (во втором приближении). Другой путь — использование гамильтонова метода — был предложен Л.Ландау и Е.Лифшицем [6]. Во всех этих работах гравитация считалась слабой. Хотя все исследователи, включая Эйнштейна, согласно считали траекторию эллиптической кривой, но только С.Вейнберг выписал интегральное уравнение орбиты [7], однако и он вместо точного решения перешел к приближениям, как и все коллеги.

Мы получим формулу орбиты и сдвиг периастра с помощью функции действия $S(r, \varphi; t)$. Согласно гамильтоновой механике, уравнение траектории имеет вид $\varphi = \partial S / \partial L$ (φ — угол, L — момент). Ввиду симметрии по φ и t эти переменные входят в действие линейно: $S = -Et + L\varphi + \int dr \partial S / \partial r$. Производную $\partial S / \partial r$ (т. е. импульс p_r) определяет уравнение Гамильтона—Якоби $g^{\mu\nu} p_\mu p_\nu = m^2$. В явном виде оно гласит

$$g^{tt}(p_t)^2 - g^{rr}(p_r)^2 - g^{\varphi\varphi}(p_\varphi)^2 = m^2, \quad (1)$$

причем метрические коэффициенты $g^{\mu\nu}$ центрально-симметричного гравитационного поля задаются формулами К.Шварцшильда

$$g^{rr} = (g^{tt})^{-1} = e^v = 1 - R/r; \quad g^{\varphi\varphi} = r^{-2}. \quad (2)$$

Здесь $R = 2GM/c^2$ — гравитационный радиус центральной звезды. Следует подчеркнуть, что кроме массы звезды M и мировых констант (постоянной тяготения G и скорости света c) никаких других параметров ОТО не вводит. Именно это я имел в виду, говоря «без дополнительных гипотез».

$$\text{Подставив в (1) } p_t = \frac{\partial S}{\partial t} = -E \text{ и } p_\varphi = \frac{\partial S}{\partial \varphi} = L,$$

найдем

$$p_r = \sqrt{e^{-2v} E^2 - e^{-v} (m^2 + L^2 r^{-2})} = e^{-v} \sqrt{E^2 - e^v (m^2 + L^2 r^{-2})}. \quad (3)$$

* Это произойдет также в случае соизмеримых частот.

** В данном случае это перигелий, ведь нашу звезду, Солнце, греки называли *Гелиос*.

Таким образом, уравнение орбиты принимает вид

$$\varphi = \frac{\partial}{\partial L} \int dr e^{-v} \sqrt{E^2 - e^v(m^2 + L^2 r^{-2})} \quad (4)$$

и после дифференцирования под знаком интеграла приводится к

$$\varphi = \int \frac{-L dr r^{-2}}{\sqrt{E^2 - e^v(m^2 + L^2 r^{-2})}} = \int \frac{dv}{\sqrt{v^3 - v^2 + (v + \varepsilon^2 - 1)\gamma^{-2}}} \quad (5)$$

(сделана очевидная замена $\frac{R}{r} = v$ и введены два безразмерных параметра $\gamma = L/mR$ и $\varepsilon = E/m$)

Этот интеграл можно выразить через эллиптическую функцию Вейерштрасса $\wp(z)$, если предварительно положить $v = t + \frac{1}{3}$ и получить под корнем $t^3 - at - b$. Подстановка $t = \wp(z|\omega, \omega')$ приводит этот полином к $[\wp'(z)/2]^2$, а так как $dv = \wp'(z)dz$, то $\varphi = 2z$.

Таким образом,

$$\frac{R}{r} = \wp\left(\frac{\varphi}{2}|\omega, \omega'\right) + \frac{1}{3}. \quad (6)$$

Функция $\wp(z)$ имеет два периода: вещественный 2ω и мнимый $2\omega'$. Поэтому вещественная функция $r(\varphi)$ имеет период $4\omega = 4K(\lambda)(e_1 - e_3)^{-1/2}$.

Здесь $K(\lambda)$ — полный эллиптический интеграл 1-го рода (с модулем λ), равный $\frac{\pi}{2} F\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; 1|\lambda\right)$, или приближенно $\frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{\lambda}{4}\right)$. Константы λ и $\sqrt{e_1}$ найдены в *Приложении* и равны $\frac{2R\epsilon}{\rho}$ и $1 - \frac{R}{2\rho}(3 - \epsilon)$ (ϵ — эксцентриситет, $\rho = b^2/2a$ — фокальный параметр кеплерова эллипса).

В 1-м порядке по ϵ

$$\begin{aligned} 4\omega &= 2\pi \left[1 + \frac{\lambda}{4}\right] \left[1 + \frac{R}{2\rho}(3 - \epsilon)\right] = \\ &= 2\pi \left[1 + \frac{R\epsilon}{2\rho} + \frac{R}{2\rho}(3 - \epsilon)\right] = 2\pi + 3\pi \frac{R}{\rho} \end{aligned} \quad (7)$$

сдвиг периастра равен***

$$\Delta = 3\pi \frac{R}{\rho}. \quad (8)$$

В Солнечной системе наибольший эффект наблюдается у Меркурия, чей параметр ρ наименьший. Гравитационный радиус Солнца $R = \frac{2GM}{c^2} = 2,953$ км, фокальный параметр орбиты Меркурия $\rho = 55,46 \cdot 10^6$ км. За один оборот $\Delta = 0,1034''$, но за 100 лет он делает 415 оборотов, и сдвиг достигает величины $42,91''$. Наблюдаемая величина сдвига равна $\Delta_{\text{наб}} = 43,11'' \pm 0,45''$. Разность между теоретической и наблюдаемой величиной равна 1/2 стандартной ошибки.

Следует, однако, иметь в виду, что наблюдения орбит двойных пульсаров PSR B1913 и PSR J0737

показали, что сдвиг их периастров выражается не в секундах, а в градусах дуги, соответственно $4,2^\circ$ и 17° за год, что в тысячи раз больше эйнштейновской величины. Впечатляет также недавно опубликованный результат 30-летних наблюдений за звездой S2 в созвездии Стрельца, чей сдвиг равен $12,1'$ за оборот (более 7000 меркурианских).

В этих условиях необходимо пользоваться уже не приближенной формулой (8), а точным выражением $4K/\sqrt{e_1}$.

Приложение. Корни полинома $P(v)$

Как видно из уравнения (7), все три корня a_k пропорциональны $R = 2,95$ км, тогда как размер планетных орбит — миллионы километров. Это значит, что корни малы, и мы можем для их определения воспользоваться ньютоновым приближением: наименьший корень равен $e_3 = \frac{R}{a+c} = \frac{R}{\rho}(1 - \epsilon)$; средний

$$e_2 = \frac{R}{\rho}(1 + \epsilon) \quad \text{и} \quad \text{старший} \quad e_1 = 1 - 2\frac{R}{\rho}. \quad \text{Разности:}$$

$$e_{23} = 2\epsilon \frac{R}{\rho} \quad \text{и} \quad e_{13} = 1 - \frac{R}{\rho}(3 - \epsilon). \quad \text{С точностью} \quad \sim \epsilon:$$

$$\lambda = \frac{e_{23}}{e_{13}} \approx 2\epsilon \frac{R}{\rho} \quad \text{и} \quad \sqrt{e_1} \approx 1 - \frac{R}{2\rho}(3 - \epsilon).$$

1. Le Verrier U.-J. Théorie et tables de mouvement de Mercure // Annales de L'Observatoire Imperial de Paris. 1859. T.5. P.1-195.
2. Einstein A. Erklärung der Perihelsbewegung der Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie // Sitz. Preuss. Akad. Wiss. 1915. Band 47. Heft 2. S.831-839.
3. Einstein A., Infeld L., Hoffmann B. The Gravitational Equations and the Problem of Motion // Annals Math. Second series. 1938. Vol.39. No.1. P.65-100.
4. Фок В.А. О движении конечных масс в общей теории относительности // ЖЭТФ. 1939. Т. 9. № 4. С.375-410.
5. Петрова Н.М. Об уравнении движения и тензоре материи для системы конечных масс в общей теории относительности // ЖЭТФ. 1949. Т.19. №4. С.929-946.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Физматлит, 2001. 534 с.
7. Вейнберг С. Гравитация и космология. М.: Мир, 1975. 696 с.

References

1. Le Verrier U.-J. Théorie et tables de mouvement de Mercure // Annales de L'Observatoire Imperial de Paris. 1859. T.5. P.1-195.
2. Einstein A. Erklärung der Perihelsbewegung der Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie // Sitz. Preuss. Akad. Wiss. 1915. Band 47. Heft 2. S. 831-839.
3. Einstein, A., Infeld, L., Hoffmann, B. The Gravitational Equations and the Problem of Motion // Annals Math. Second series. 1938. Vol. 39. No.1. P.65-100.
4. Fok V.A. O dvizhenii konechnykh mass v obshchey teorii otноситel'nosti [On the motion of finite masses after the Einstein theory of gravitation]. Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP), 1939, vol.9, no.4, pp.375-410.
5. Petrova N.M. Ob uravnenii dvizheniya i tenzore materii dlya sistemy konechnykh mass v obshchey teorii otноситel'nosti [On equations of motion and tensor of matter for a system of finite masses in general theory of relativity]. Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP), 1949, v.19, no.4, pp.929-946.
6. Landau L.D., Lifshits E.M. Teoriya polya [The Classical Theory of Fields]. Moscow, Fizmatlit, 2001. 510 p.
7. Veynberg S. Gravitatsiya i kosmologiya [Gravitation and cosmology]. Moscow, Mir, 1975. 696 p.

***Эйнштейн [3] записывал эту формулу как $24\pi^3(a/cT)^2(1 - \epsilon^2)^{-1}$.



РАБОТА С УПРАВЛЕНЧЕСКОЙ КОМАНДОЙ ПО ФОРМИРОВАНИЮ ПСИХОЛОГО-ПЕДАГОГИЧЕСКОГО КЛИМАТА В КОНТЕКСТЕ ЗАДАЧИ ПОВЫШЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Г.А.Уланова, О.В.Пополитова, Г.Ю.Панарина

WORKING WITH THE SCHOOL MANAGEMENT TO ENSURE THE WELLBEING OF CHILDREN AND IMPROVE ACADEMIC ACHIEVEMENT

G.A.Ulanova, O.V.Popolitova, G.Yu.Panarina

Институт развития образования, Ярославль, ulanova@iro.yar.ru

Статья посвящена теме современных подходов в системе дополнительного профессионального образования, а именно — организации научно-методического сопровождения школ со стабильно низкими образовательными результатами по итогам государственной итоговой аттестации. Дается описание основных принципов сопровождения таких школ — «диалоговое» взаимодействие с управленческими командами образовательных организаций, практико-ориентированность курсовой подготовки, регулярной рефлексии введения изменений в управленческую деятельность и в образовательный процесс. Раскрываются элементы технологии научно-методического сопровождения, заключающиеся в поэтапной разработке программ повышения образовательных результатов на основе управленческого анализа, стажировки на базе школ со стабильно высокими результатами, посткурсовом сопровождении реализации итогового продукта в образовательной деятельности школы и др. Особое внимание уделяется вопросам формирования психологического благополучия в коллективе и его влияния на положительную динамику изменений, в том числе детей с ОВЗ. Основанием для реализации комплексного научно-методического сопровождения стали результаты исследования результатов ГИА у выпускников 9 и 11 классов образовательных организаций Ярославской области за год, предшествующий участию школы в программе, и за текущий год, а также результаты диагностики «Определение эффективности образовательной среды». Авторы приходят к выводу, что концентрация усилий управленческой команды, направленная на решение задач повышения образовательных результатов, будет более успешна, если научно-методическое сопровождение будет организовано в форме программы повышения квалификации, основанной на индивидуальных особенностях образовательных организаций, профессиональных дефицитах управленческих команд и психологическом благополучии участников образовательного процесса.

Ключевые слова: школы с низкими результатами обучения, управленческая команда, психолого-педагогический климат, психологическое благополучие, образовательные результаты, профессиональные компетенции педагогов

Для цитирования: Уланова Г.А., Пополитова О.В., Панарина Г.Ю. Работа с управленческой командой по формированию психолого-педагогического климата в контексте задачи повышения образовательных результатов // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С.89-95. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).89-95](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).89-95)

The article deals with the issues of the organization of scientific and methodological support for schools that consistently show downward trends in overall student performance in the course of the Unified State Examination. The basic principles of supporting schools with low-achieving students are described: interaction with the school management, hands-on training, implementation of new models in management activities and educational process. The article also reveals the components of scientific and methodological support technology, involving step-by-step development of education improvement programmes based on the management analysis, internship at schools with a positive learning outcome, post-course support after the implementation of the project in the school, etc. Particular attention is paid to the formation of psychological well-being in the team and its impact on the positive changes, including children with disabilities. The support programme is based on the study of the results of the GIA exam in grade 9 and 11 in Yaroslavl region for the past year, as well as the results of the survey "Effectiveness of the educational environment". The authors of the article conclude that school management can solve the problem more successfully if the professional development programmes that teachers undergo take into account individual characteristics of educational organizations, professional deficits in the school management and psychological well-being of students and teachers.

Keywords: schools with low learning outcomes, management team, psychological and pedagogical climate, psychological well-being, educational results, professional competencies of teachers

For citation: Ulanova G.A., Popolitova O.V., Panarina G.Yu. Working with the school management to ensure the wellbeing of children and improve academic achievement // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.89-95. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).89-95](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).89-95)

Одной из важных стратегических задач реформирования общего образования является обеспечение качественного образования. В рамках государственной программы «Развитие образования», утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации от 26 декабря 2017 г. №1642 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие образования», по мероприятию 2.2 «Повышение качества образования в школах с низкими результатами обучения и в школах, функционирующих в неблагоприятных социальных условиях, путем реализации региональных проектов и распространение их результатов» следует обратить внимание на решение задачи 2 «Развитие современных механизмов и технологий общего образования» [1]. Кроме этого, соответствующие требования по обеспечению качественного образования заложены в Паспорте национального проекта «Образование», утвержденном президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам, протокол от 24.12.2018 №16 [2].

Актуальность темы определяется государственной политикой в области образования в части разработки, апробации и внедрения системы мер по повышению качества работы школ с низкими результатами обучения и затратами ресурсов школы, а именно:

1. Повышение качества образовательных результатов обучающихся в школах с низкими результатами обучения через реализацию программ повышения образовательных результатов.
2. Создание условий для развития различных форм профессионального взаимодействия в региональной системе образования.
3. Внедрение в образовательную практику школ эффективных педагогических стратегий, техник, технологий, методов и приемов, способствующих повышению учебных достижений школьников.

Реализация указанных мер ориентируется на идею гуманного образования. Гуманизация образования означает уважение и принятие ученика как личности [3], при этом учитываются интеллектуальные, физические, нравственно-психологические особенности ребенка. Особое место занимает психологическое благополучие школьников. Теоретические основы понимания феномена психологического благополучия были заложены в исследованиях Н.Брэдберна, который считал, что данное понятие характеризует область переживаний и состояний, свойственных здоровой личности [4]. В современной науке выделяются два основных подхода к пониманию психологического благополучия — гедонистический и эвдемонистический. При гедонистическом подходе благополучие описывается главным образом в терминах удовлетворенности — неудовлетворенности [5-8]. Эвдемонистическое понимание данной проблемы строится на том, что личностный рост — главный и самый необходимый аспект благополучия [9,10]. Эти подходы сопоставляются с пониманием природы психологического благополучия. Намечаются возможные пути их интеграции в контексте построения комплексной, системной модели психологического благополучия обучающегося. Психологическое благополучие мы будем рассматривать как

«системное качество человека, приобретаемое им в процессе жизнедеятельности на основе психофизиологической сохранности функций и проявляющееся у субъекта в переживании содержательной наполненности и ценности жизни в целом как средства достижения внутренних социально ориентированных целей, и являющееся условием реализации его потенциальных возможностей и способностей» [4].

По данным TALIS у российских учителей есть запрос на практико-ориентированные курсы. По мнению Р.В.Горбовского, С.И.Заир-Бек, Т.А.Мерцаловой, в настоящее время программы повышения квалификации часто имеют сугубо вербальный характер и не решают задачи практического оснащения учителей современными педагогическими технологиями. В ходе повышения квалификации учителя не всегда приобретают полезные инструменты, позволяющие создавать условия для учебной самостоятельности учащихся, стимулировать дискуссию и диалог на уроке, дифференцировать задания и формы работы с учетом особенностей контингента, стимулировать развитие критического мышления учеников [4].

По мнению В.И.Сопина [11], администрация образовательной организации должна способствовать профессиональному и личностному росту педагогических кадров с использованием формальных, неформальных и информальных форм их профессионального образования, опираясь для этого на систему научно-методического сопровождения повышения профессионального уровня. О возможности улучшить образовательные результаты, используя ресурс образовательной организации, творческий потенциал учителя, его профессиональный рост, говорит и Е.Н.Куксо в своей работе «Миссия выполнима: как повысить качество образования в школе» [12].

Целью работы является представление опыта Института развития образования Ярославской области (далее — ИРО) по сопровождению школ с низкими образовательными результатами путем создания психологического комфорта для представителей школьных команд.

В ходе сопровождения административных команд осуществлялось освоение способов, приемов создания благоприятного психологического климата, а затем трансляция приобретенного опыта на разные уровни педагогического и детского коллектива.

В Ярославском регионе имеется опыт работы с административными командами школ, стабильно показывающих низкие образовательные результаты по итогам государственной итоговой аттестации (далее — ГИА) в своем кластере. На основе данных, представленных Центром оценки и контроля качества образования (далее — ЦОиККО) за три последних года, департаментом образования была сформирована целевая группа таких образовательных организаций (далее — ОО). Административным командам этих ОО было предложено пройти обучение по программе дополнительного профессионального образования «Управление образовательным процессом по результатам ГИА». Начиная с 2016 г., программа реализовывалась Центром образовательного менеджмента Института развития образования (далее — ЦОМ). Она — межкафедр-

ральная, для ее реализации привлекались специалисты организаций-партнеров института. При работе с этой группой особая значимость придавалась практико-ориентированности процесса обучения, использования всех имеющихся в ИРО ресурсов, которые помогли бы коллективам ОО преодолеть ситуацию «последней рейтинговой строки» в своем кластере.

При реализации программы в 2019 г. большое внимание уделялось моменту психолого-педагогического сопровождения административных команд. К моменту прихода на программу многие обучающиеся испытывали трудности в управленческой деятельности, снижалась мотивация, росла напряженность в коллективах. Много внимания уделялось разговорам о своем прежнем разном опыте, о сложности контингента, низкой мотивации всех участников образовательного процесса. Сначала организовали занятия так, чтобы снять этот «барьер». Каким образом мы работали в этой ситуации на положительный результат?

Во-первых, в самом начале программы было обозначено, что для обучающихся открыты все ресурсы ИРО, и им будет оказана методическая и консультативная помощь как в процессе обучения, разработке итогового продукта — программы повышения образовательных результатов, так и в сопровождении ее реализации.

Во-вторых, была предоставлена возможность обучающимся по программе руководителям, а также всему коллективу школы пройти процедуру тестирования на предмет выявления степени сформированности основных профессиональных компетенций педагогов. Это новый проект ИРО, который проходит процедуру апробирования. Он позволяет определить профессиональные ресурсы и дефициты по целеполаганию, методической, технологической, коммуникативной, информационной, оценочной, мотивационной компетентностям и получить индивидуальные рекомендации по работе над их развитием [9].

Администрация имеет в результате тестирования общий результат и видит, над формированием и развитием каких профессиональных компетенций стоит поработать. Важно, что есть возможность выполнить подробное тестирование по любой из «западающих» компетенций и получить детальные рекомендации, например, пройти обучение на курсах повышения квалификации, поучаствовать в онлайн-мероприятиях на устранение выявленных профессиональных дефицитов и т.д.

В-третьих, в рамках курсов была проведена стажировка на базовой площадке средней школы, показывающей хорошие результаты ГИА выпускников в течение последних трех лет. Это обычная школа — не лицей, не гимназия, но здесь действует система работы коллектива по достижению и поддержке стабильных результатов ГИА. Учителя познакомили участников программы со своими методическими находками, которые позволяют ученикам с очень разным уровнем знаний и социальным положением достигать хороших результатов. При этом в школе созданы благоприятные, комфортные условия для всех участников образовательного процесса. Это вселяло уверенность, что возможен хороший результат при использовании опыта коллег.

В-четвертых, мы организовали работу администраторов школы по анализу внутришкольного контроля, построению системы оценки качества образования. Участники курсов получили ответы на актуальные для них вопросы, были представлены образцы документации, положительный опыт работы по мотивированию коллектива на решение сложных задач [2, с.69]. Кроме этого был организован обмен опытом среди коллег.

В-пятых, уже по ходу обучения давались методические, психологические приемы работы с детьми, педагогическим коллективом, позволяющие достигать более высоких результатов. Режим обучения (один раз в неделю) позволял в период между занятиями проверить на практике новые технологии. Каждое последующее занятие начиналось с рефлексии: что удалось сделать, каков результат применения того, что увидели на курсах.

В комфортной атмосфере поддержки, с оптимальным режимом организации учебных занятий, заданиями по ходу реализации программы, подготовка итогового продукта осуществлялась поэтапно. Так, например, в начале программы было дано задание провести мониторинг образовательных результатов по математике и русскому языку выпускников 9 и 11 классов за последние три года. Следующий этап — предположить результат, который хотим достичь в текущем учебном году. Для этого следовало определить шаги по его достижению путем коллективного планирования с учителями, ведущими русский язык и математику. Намеченный план содержал такие направления работы, как:

- улучшение предметных, метапредметных и личностных результатов,
- совершенствование системы оценивания и учета результатов,
- индивидуальная поддержка учеников,
- поддержка профессионального развития учителей,
- работа в сотрудничестве с родителями.

Обязательным условием создания итогового продукта было наличие краткосрочного плана действий на три месяца — март-июнь, при желании ОО могли представить и более долгосрочную программу (этой возможностью воспользовалось большинство участников).

Важно, что при составлении программ ожидались такие результаты, как снижение численности учащихся, имеющих низкую мотивацию к обучению, повышенный уровень тревожности, низкую самооценку, а также работа с учащимися, ведущими асоциальный образ жизни.

Защита итогового продукта проходила публично. Была создана максимально благоприятная обстановка в кругу заинтересованных коллег, вопросы задавались только на понимание представленного проекта и на его улучшение. Важно было представить свой паспорт программы, реализуемой в период с марта по май.

Организованная таким образом работа привела к достижению планируемых результатов — положительной динамике по результатам ГИА, которые представ-

лены на диаграммах. В качестве примера представлены в динамике образовательные результаты основной и средней школы по русскому языку и математике: июнь 2018 г., планируемый результат по программе повышения образовательных результатов, июнь 2019.

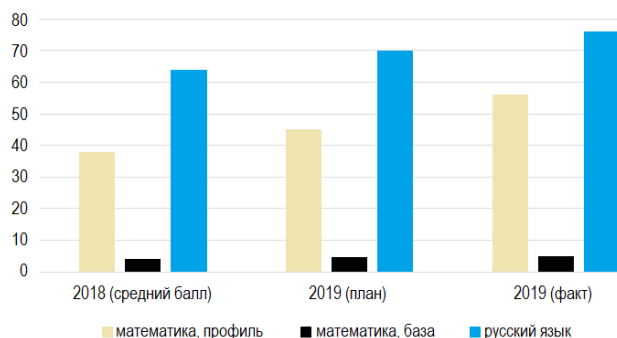


Рис.1. Результаты ЕГЭ Дубковской средней школы

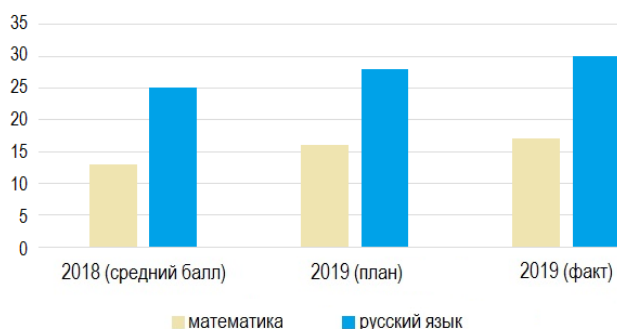


Рис.2. Результаты ОГЭ Высоковской основной школы

При реализации программы по повышению образовательных результатов появились приоритетные направления в деятельности образовательной организации. На некоторых из них мы бы хотели остановиться.

1. Внедрение программ повышения образовательных результатов. При успешном введении программы особое место занимает работа по просвещению педагогов и родителей по психолого-педагогическим аспектам ее реализации. В данном случае перед администрацией и психологом стоит задача не только довести до каждого необходимость изменений, но и разъяснить специфику происходящих в образовательном процессе изменений, помочь

понять сущность системно-деятельностного подхода, особенности ключевых принципов образования, таких как принципа деятельности, вариативности, системности, психологической комфортности, психологического здоровья и др.

2. Повышение квалификации участников программы — учителей русского языка и математики. Важно, что педагоги проходили обучение параллельно с административными командами на курсах учителей-предметников по улучшению результатов ГИА по предмету.

3. Диагностика обучающихся на предмет формирования универсальных учебных действий (далее — УУД). Выявление особенностей психического развития ребенка, наиболее важных особенностей деятельности, сформированности определенных психологических новообразований, соответствия уровня развития предметных, личностных и межличностных образовательных возрастным ориентирам и требованиям ФГОС.

Этапы диагностического направления:

— анализ информации, поступающей к психологу от учителей, родителей, обучающихся, с целью определения проблем, выбор методов и методик исследования;

— заключение психолога об основных характеристиках изучавшихся компонентов психического развития или формирования личности школьника, в том числе постановка психологического диагноза;

— разработка рекомендаций, программы психокоррекционной работы с обучающимися, составление комплекса мер по решению возникших проблем.

В Брейтовской средней школе педагогом-психологом в ноябре 2018 г. проводилась диагностика «Определение эффективности образовательной среды», целью которой была оценка выраженности следующих психологических факторов:

- 1) интенсивность образовательной среды;
- 2) эмоционально-психологический климат;
- 3) удовлетворенность образовательной средой;
- 4) демократичность образовательной среды;
- 5) содействие формированию познавательной мотивации (учебной, профессиональной, творческой), развитию познавательных интересов;
- 6) удовлетворенность качеством образовательных услуг, предоставляемых учебным учреждением.

В исследовании принимали участие 126 обучающихся. Результаты представлены на рис.3.

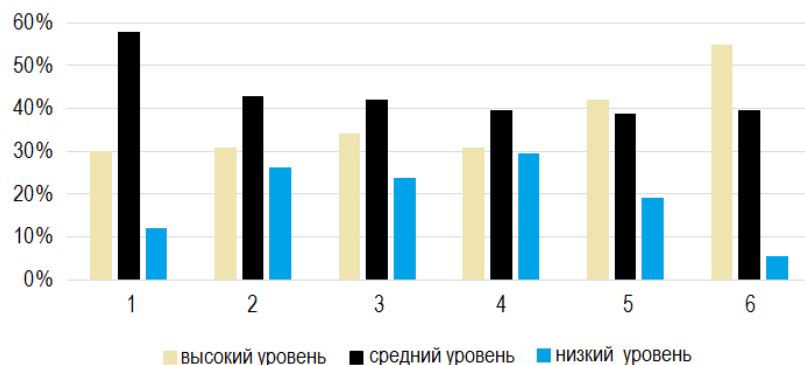


Рис.3. Результаты диагностики «Определение эффективности образовательной среды», ноябрь 2018 г.

По ответам учащихся можно констатировать, что большинство отмечают:

- среднюю интенсивность нагрузки в ОУ — 57,9%,
- средний уровень эмоционально-психологического комфорта участников образовательного процесса — 42,8%,
- среднюю степень удовлетворенности своей школой — 42,1%,
- среднюю степень демократичности образовательной среды — 39,7%,
- высокую степень содействия развитию познавательной мотивации — 42,1%,
- высокий уровень качества образовательных услуг — 54,8%.

По результатам психологом школы был разработан комплекс мер, способствующий уменьшению параметра «низкий уровень» таких показателей, как эмоционально-психологический климат, удовлетворенность образовательной средой и ее демократичность.

4. Оценка достижений планируемых предметных, метапредметных и личностных результатов. Администрация школы и психолог оказывает консультативную помощь учителям при оценке достижений планируемых результатов, учитывая, что у педагогов возникают сложности не только в проведении диагностики, но и в интерпретации полученных результатов.

Так, например, в качестве результативно сработавших на достижение результата административных приемов коллеги назвали работу по индивидуальному учебному плану учащегося и педагога, тематические педсоветы по анализу и списку проблемных зон и путей их решения, систематически проводимые срезовые работы по математике и русскому языку. Предоставление дополнительно 1 часа для проведения занятий по математике и 1 часа — по русскому языку. Разделение учащихся на группы при подготовке к ГИА (профильный и базовый). Введение карт успешности при подготовке к экзаменам (еженедельный мониторинг).

Кроме этого, представляют интерес результаты, полученные психологом Брейтовской средней школы при проведении повторной диагностики в июне 2019 г. (рис.4).

По ответам учащихся можно констатировать, что большинство отмечают:

- среднюю интенсивность нагрузки в ОУ — 55,56%,
- высокий уровень эмоционально-психологического комфорта участников образовательного процесса — 48,89%,
- высокую степень удовлетворенности своей школой — 55,56%,
- среднюю степень демократичности образовательной среды — 42,22%,
- высокую степень содействия развитию познавательной мотивации — 53,33%,
- высокий уровень качества образовательных услуг — 51,11%.

Анализ результатов показывает уменьшение параметра «низкий уровень» по всем показателям факторов, а также положительную динамику по факторам: эмоционально-психологический климат, удовлетворенность образовательной средой и ее демократичность.

5. Реализация программы формирования УУД с учетом возрастных и психологических особенностей и выявление обучающихся с проблемами. Для этого педагогу необходимо изучить программу формирования УУД школы, определить свои задачи, свой вклад в реализацию данной программы. Психологу нужно разработать и реализовать индивидуальные программы коррекционного воздействия, предоставить рекомендации педагогам и родителям ребенка, испытывающего трудности в обучении.

Очень важными становятся занятия с элементами тренинга, направленные на личностное развитие обучающихся, на развитие познавательных, регулятивных, коммуникативных действий.

В качестве примера можно говорить о системе мер, разработанных и реализованных школьным психологом МОУ «Брейтовская средняя школа», которая включала работу со всеми представителями образовательного процесса: администрацией школы, учителями, классными руководителями, учениками и их родителями. Результаты представлены выше.

Особое внимание следует уделить созданию условий для полноценного включения в образовательное пространство детей с ограниченными возможностями здоровья.

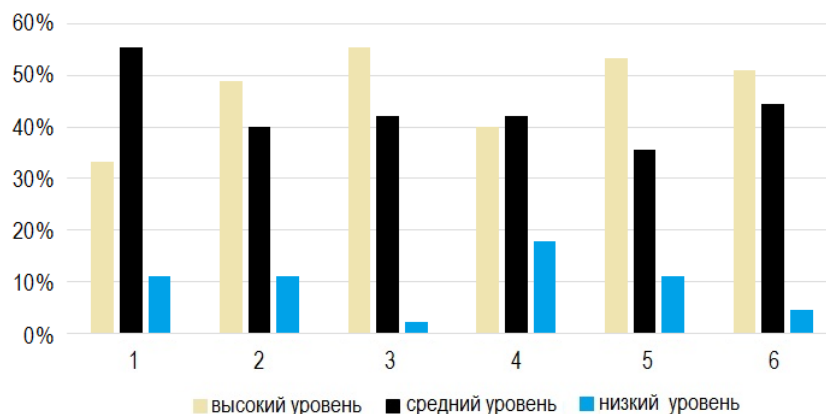


Рис.4. Результаты диагностики «Определение эффективности образовательной среды», июнь 2019 г.

Имеется положительный опыт организации инклюзивного образования обучающихся с ОВЗ в средней школе №72 г.Ярославля. Созданы специальные условия для получения образования обучающимися с интеллектуальными нарушениями, организована логопедическая работа с детьми с ЗПР, отрабатываются формы и приемы работы с обучающимися с ОВЗ на уроках естественно-математического цикла, проводятся коррекционно-развивающие занятия по курсу «Основы логики» (внеурочная деятельность), используются коррекционно-развивающие технологии в практике инклюзивного образования (на примере урока математики), разработана система оценки достижений обучающихся с ЗПР. Используется конструктор урока при разработке технологической карты урока в инклюзивном классе. Проводимая работа дает положительные результаты в динамике ГИА:

Процент выпускников средней школы №72 Ярославля, получивших за ЕГЭ по математике, русскому языку положительные отметки (средний показатель за 3 года, %)

Год	Математика		Русский язык	Средний показатель
	Базовый уровень	Профильный уровень		
2017	100	47,05	100	82,35
2018	100	100	100	100
2019	100	100	100	100

«Игра по одним правилам» создает более благоприятную психологическую атмосферу, наличие единых подходов, требований в работе с детьми с ОВЗ способствует повышению образовательной результативности. Данным опытом школа делится, проводя мастер-классы, открытые занятия в рамках реализации программ повышения квалификации. Школа участвует в региональных и Всероссийских конкурсах «Школа — территория здоровья» и «Лучшая инклюзивная школа».

6. Профилактика профессионального выгорания педагогов. Психологическая поддержка педагогов связана с коренными изменениями в организации образовательного процесса. Психолог проводит групповые и индивидуальные консультации, организует тренинги развития профессиональных и личностных компетенций учителя.

Большинство административных команд, выполняя SWOT-анализ, в качестве слабых сторон указывали на отсутствие системы психолого-педагогического сопровождения образовательного процесса, средний и низкий уровень моральных установок и климата в ОО. В качестве приоритетных задач многие указали поддержку профессионального роста педагогов, психологическое сопровождение их деятельности, составление индивидуальных программ профессионального развития, содержащих элементы психологической поддержки, включая формирование компетентности психолого-педагогического сопровождения обучающихся.

7. Работа с педагогами и родителями как с непосредственными участниками образовательного процесса. Психолог проводит профилактическую работу с учащимися с целью формирования у них установок, личностных ориентиров и норм поведения, которые обеспечивают сохранение и укрепление психологического и социального здоровья, содействуют развитию регулятивных, коммуникативных, познавательных компетентностей.

Существенное место в работе с педагогическим коллективом отводится обучению педагогов установлению психологически грамотной, развивающей системы взаимоотношений со школьниками, основанной на взаимопонимании и взаимном восприятии друг друга. Для педагогов школы проводятся семинары, практические задания, лекции.

Профилактическая работа с родителями осуществляется с целью обеспечения родителей знаниями и навыками, способствующими развитию эффективного, поведения в семье, посредством бесед, лекций, консультаций, рекомендаций для успешного воспитания детей с учетом возрастных особенностей.

Интересен опыт взаимодействия с семьей через реализацию образовательно-игровых тренингов, придание образовательному процессу единой празднично-событийной формы взаимодействия детско-взрослой образовательной общности, использование технологии «создания успеха» как для детей, так и для взрослых, возобновление форм педагогического наставничества и методических объединений (Дубковская средняя школа Ярославского района). Важно, что выстроена при этом система мониторинга активности, интереса детей и взрослых к реализации программы, включая интернет-пространство, средствами анкетирования, опросов, статистики.

После защиты программы проходил мониторинг результатов. Важно было, чтобы разработанная программа служила руководством к действию. И это, с нашей точки зрения, с одной стороны, не дает возможности расслабиться (сжатые сроки в достижении первого результата), с другой стороны, подтверждает наличие возможности у административной команды получить помощь и поддержку.

Таким образом, опыт ИРО по сопровождению школ с низкими образовательными результатами представляет интерес не только наличием положительной динамики образовательных результатов, но и созданием психологического комфорта для участников образовательного процесса. Учитывая гедонистический подход, при реализации программы ДПО занятия проектировались таким образом, чтобы проанализировать состояние неудовлетворенности, угнетенности, агрессии представителей управленческих команд, показать психологические, методические приемы, позволяющие закрепить состояние успеха, уверенности, удовлетворенности. Приобретенные навыки слушатели далее использовали при работе со школьным коллективом. Эвдемонистический подход закладывался в программы по повышению образовательных результатов, где учитывался не только предметный результат, но и личностный рост.

1. Государственная программа Российской Федерации «Развитие образования» (Постановление Правительства Российской Федерации от 26 декабря 2017 г. №1642 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие образования») [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/556183093> (дата обращения: 27.01.2020)
 2. Паспорт национального проекта «Образование» (утв. президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам (протокол от 24 декабря 2018 г. №16)) [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/72192486/> (дата обращения: 27.01.2020).
 3. Иванова В.А., Левина Т.В. Педагогика. Электронный учебно-методический комплекс [Электронный ресурс]. URL: http://www.kgau.ru/distance/mf_01/ped-asp/12_01.html (дата обращения: 27.01.2020).
 4. Брэдберн Н. Структура психологического благополучия. Ярославль: Инфра, 2005. 13 с.
 5. Куксо Е.Н. Миссия выполнима: как повысить качество образования в школе. М.: Издательские решения, 2016. 252 с.
 6. Метапредметные компетентности педагога: коллективная монография / Под ред. А.В.Золотаревой. Ярославль: ГАУ ДПО ЯО ИРО, 2018. 168 с.
 7. Российская школа: начало XXI века / Под ред. С.Г.Косарецкого, И.Д.Фрумина. М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2019. 432 с.
 8. Созонтов А.Е. Гедонистический и эвдемонистический подходы к проблеме психологического благополучия // Вопросы психологии. 2006. №4. С.105-114.
 9. Сопин В.И. Управление повышением профессионального уровня педагогических работников профессиональных образовательных организаций // Управление образованием: теория и практика. 2017. №2(26). С.65-82.
 10. Уланова Г.А., Ключева Н.В., Назарова И.Г. Социально-психологическое и организационно-управленческое сопровождение психологического благополучия обучающихся школ // Вестник Костромского государственного университета. Педагогика. Психология. СоциокINETика. 2019. №3. С.66-71.
 11. Diener E. Cross-cultural of life satisfaction and self-esteem // J. of Personality and Social Psychology. 1995. №68(4). P.653-663.
 12. Diener E. Subjective well-being // Psychological Bulletin. 1984. №95(3). P.542-575.
- References**
1. Gosudarstvennaya programma Rossiyskoy Federatsii "Razvitie obrazovaniya" (Postanovlenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 26 dekabrya 2017 g. №1642 «Ob utverzhdenii gosudarstvennoy programmy Rossiyskoy Federatsii "Razvitie obrazovaniya"») [State program of the Russian Federation "Development of education" (Decree of the Government of the Russian Federation of December 26, 2017 No. 1642 "On approval of the state program of the Russian Federation" Development of education)]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/556183093> (accessed 27.01.2020).
 2. Pasport natsional'nogo proekta "Obrazovanie" (utv. prezidiumom Soveta pri Prezidente Rossiyskoy Federatsii po strategicheskemu razvitiyu i natsional'nym proektam (protokol ot 24 dekabrya 2018 g. N 16)) [Passport of the national project "Education"(approved by the Presidium of the Council under the President of the Russian Federation for Strategic Development and National Projects (December 24, 2018, protocol no. 16))]. Available at: <https://base.garant.ru/72192486> (accessed 27.01.2020).
 3. Ivanova V.A., Levina T.V. Pedagogika [Pedagogy]. Available at: http://www.kgau.ru/distance/mf_01/ped-asp/12_01.html (accessed 27.01.2020).
 4. Bredbern N. Struktura psikhologicheskogo blagopoluchiya [The structure of psychological well-being]. Yaroslavl', Infra Publ., 2005, 13 p.
 5. Kukso E.N. Missiya vypolnima: kak povysit' kachestvo obrazovaniya vshkole [Mission possible: how to improve the quality of education at school]. Moscow, Izdatel'skie resheniya Publ., 2016, 182 p.
 6. Zolotareva A.V., Borodkina N.V., Budanova D.S. Metapredmetnye kompetentnosti pedagoga: kolektivnaya monografiya [Metasubject competences of a teacher: a collective monograph]. Yaroslavl', Institut razvitiya obrazovaniya Publ., 2018, 165 p.
 7. Kosaretskiy S.G., Barannikov K.A., Belikov A.A. Rossiyskaya shkola: nachalo XXI veka [Russian school: the beginning of the 21st century]. Moscow, Vysshaya shkola ekonomiki Publ., In-t obrazovaniya Publ., 2019, 432 p.
 8. Sozontov A. E. Gedonisticheskii i evdemonisticheskii podkhody k probleme psikhologicheskogo blagopoluchiya [Hedonistic and eudemonistic approaches to the problem of psychological well-being]. Voprosy psikhologii, 2006, no.4, pp. 105-114.
 9. Sopin V.I. Upravlenie povysheniem professional'nogo urovnya pedagogicheskikh rabotnikov professional'nykh obrazovatel'nykh organizatsiy [Management Of Professional Development of Educators in Professional Education Institutions]. Upravlenie obrazovaniem: teoriya i praktika, 2017, no.2(26), pp. 65-82.
 10. Ulanova G.A., Klyueva N.V., Nazarova I.G. Sotsial'no-psikhologicheskoe i organizatsionno-upravlencheskoe soprovozhdenie psikhologicheskogo blagopoluchiya obuchayushchikhsya shkol [Socio-Psychological, Organisational And Managerial Support of Schoolchildren's Psychological Well-Being]. Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo universiteta. Pedagogika. Psikhologiya. Sotsiokinetika. 2019, no.3, pp. 66-71.
 11. Diener E. Cross-cultural of life satisfaction and self-esteem. J. of Personality and Social Psychology, 1995, no. 68, pp.653-663
 12. Diener E. Subjective well-being. Psychological Bulletin, 1984, no.95, pp. 542-575.

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПУБЛИКУЕМЫМ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК НОВГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА»

Учредителем журнала является Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого. Журнал зарегистрирован Министерством по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций Российской Федерации (свидетельство ПИ №77-17766 от 10 марта 2004 года).

Решением Высшей аттестационной комиссии журнал включен в перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук (дата включения 1 декабря 2015 г.).

«Вестник НовГУ» включен в Реферативный журнал и базы данных ВИНИТИ. Для оценки качества публикуемых статей по каждой серии созданы институты рецензирования. Заключение на публикацию статей в журнале дают экспертные советы по каждой серии на основании двух рецензий докторов наук и представленной рукописи. Журнал размещается на сайте научной электронной библиотеки (НЭБ, eLIBRARY.ru), при которой создан «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ) для цитирования научных статей.

Электронная версия журнала также размещается на сайте НовГУ <http://www.novsu.ru/vestnik>. Журнал издается по сериям: «Технические науки», «Медицинские науки», «Педагогические науки» и распространяется по подписке – индекс 78597 в каталоге «Пресса России».

Все статьи подвергаются обязательному рецензированию. Качество публикуемых статей контролируется редколлегией, в состав которой входят ведущие ученые вузов и академических институтов Российской Федерации.

Статьи, представленные к публикации в журнале «Вестник НовГУ», должны соответствовать следующим требованиям.

Рукопись статьи формата А4 должна быть набрана в текстовом редакторе Microsoft Word в формате *.doc или *.rtf шрифтом Times New Roman, 12 pt, интервал не менее полуторного. Объем статьи не должен превышать 20 тыс. знаков.

В левом верхнем углу первой страницы проставляется индекс УДК; консультации при определении этого индекса дают библиографы библиотек. Затем следует фамилия (фамилии) с инициалами автора (авторов), заголовок статьи, аннотация на русском и английском языках объемом 100–250 слов. Приводятся ключевые слова.

Содержащиеся в статье формулы и символы помещаются в тексте с использованием формульного редактора Microsoft Equation. Все формулы должны сопровождаться полными экспликациями, в которых могут быть опущены лишь общепринятые и повторяющиеся обозначения.

Таблицы должны быть компактными, озаглавлены и пронумерованы.

Иллюстрации к статьям должны быть качественными. Рисунки, графики, диаграммы — только черно-белые, в графическом редакторе, совместимом с Word (формат PCX, TIF, BMP, XLS). Все рисунки, графики, диаграммы прикладываются к статье в виде отдельных файлов.

Список литературы оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. Ссылки на литературные источники даются в тексте в квадратных скобках и нумеруются в порядке их приведения ([1], [2], [3]...), список использованных источников приводится в конце статьи с обязательным указанием конкретной страницы (страниц) при цитировании, общего количества страниц книги или журнальной публикации (с какой по какую).

Ссылки на авторефераты и диссертации не допускаются.

В конце статьи приводятся сведения об авторе (авторах) — место работы (полное название), ученая степень, ученое звание, шифр специальности, согласно номенклатуре научных работников, адрес электронной почты, контактные телефоны, почтовый адрес. Рукопись статьи должна быть тщательно вычитана и подписана автором (авторами) с указанием: «Статья публикуется впервые» и датой.

В редакцию журнала рукопись статьи передается в распечатанном виде на бумаге формата А4 (распечатка должна быть качественной) и в электронном виде, одним файлом.

Никакой автор не может быть представлен в одном номере журнала более чем одной статьей.

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются. Редакция не вступает в переписку и телефонные переговоры с авторами, не выдает никаких справок.

Гонорары не выплачиваются. За содержание статьи ответственность несет автор (авторы) статьи.

УСЛОВИЯ ПОДПИСКИ:

Стоимость подписки на один номер — 450 руб. Подписной индекс в каталоге «Пресса России» — 78597.

Почтовый адрес: Россия, 173003, г. Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, ул. Б. Санкт-Петербургская, 41, ауд.1216. Редакция журнала «Вестник НовГУ».

Тел.: (8162) 338830 (доб. 22-93), факс: (8162) 974526. E-mail: vestnik@novsu.ru.