



# Межрегиональное общественное учреждение "Институт инженерной физики"

(научное, образовательное и производственное учреждение)

#### **B HOMEPE**

#### приборостроение. **МЕТРОЛОГИЯ И** ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

2 Смородин А.И., Сергеев С.С., Кулик М.В., Коробков А.А.

Научно-методический аппарат расчёта детандер-компрессорного агрегата структурно-технологической схемы адсорбционно-криоген-

10 Смирнов Д.В., Алаторцев И.И., Алаторцев А.И. 74 Пантелеев А.В., Каранэ М.С.

Особенности параметрического синтеза кусочно-непрерывных программ угла тангажа космического летательного аппарата на активном участке траектории с учетом временных пауз между работой двигательных установок его ступеней

#### РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

13 Зеленевский В.В., Зеленевский А.В., Кургузов В.В., Черноусов М.С., Наконечный Б.М.

> Статистический анализ и методика оценки надежности радиоканалов по помехоустойчивости при наличии замираний сигнала

18 Зеленевский В.В., Зеленевский А.В., Шмырин Е.В., Черноусов М.С.

> Помехозащищенность кодированных систем передачи данных с расширенным спектром радиосигнала

23 Атакищев О.И., Мухин А.И., Смирнов А.Н., Смирнов Д.Н.

> Методика выявления изменений режимов функционирования РЭС при обработке резуль- 103 Ермаков А.М., Царькова Е.А. татов дистанционного зондирования Земли

29 Линец Г.И., Мельников С.В.

Оптимизация порогов классификации состояния трансионосферных каналов связи, описываемых распределением Накагами

34 Рясный Ю.В., Ремизов С.Л.

коммуникационных устройств рекурсивной дискретной цепью на основе рабочей функции

37 Шевченко В.А.

Верхняя аддитивная граница вероятности ошибки в канале связи в условиях воздействия случайной импульсной помехи и блоковых замираний

45 Захаров В.Л., Смирнов Д.В., Денискина А.Р., Мирошниченко П.В.

> Современное состояние и перспективы развития отечественных космических систем связи

50 Атакищев О.И., Гудаев Р.А., Мухин А.И., Кузин А.В.

Методика выделения информативных областей спектральных портретов излучающих объектов и определения весовых коэффициентов в интересах решения задачи распознавания

56 Захаров В.Л., Смирнов Д.В., Васильев В.А.

> Методика расчета максимальной дальности действия радиолокационной станции по обнаружению баллистических целей по критерию Неймана-Пирсона

#### ИНФОРМАТИКА. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

65 Вершинин В.Е., Вершинин Е.В., Мазин А.В.

Использование базовых рекурсивных блоков для обеспечения высокого уровня параллельности рекурсии

68 Фёдорова В.А., Колягина И.А., Руссак Д.А.

Концепции и реализация Центра операционной безопасности

Параметрический синтез оптимального программного управления на основе спектрального метода и мультиагентных алгоритмов опти-

79 Федулин А.М., Садеков Р.Н.

Алгоритм навигации беспилотных летательных аппаратов с учетом местоположения средств противовоздушной обороны

85 Смуров С.В., Волков Г.Г., Столбов С.Н., Царьков А.Н.

Новые симметрии многомерной геометрии в квантовой физике и квантовой информации

#### ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И **РОБОТОТЕХНИКА**

95 Бугаков И.А.

От глубокого обучения к глубокому пониманию

#### СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И ФАРМАЦЕВТИКА

К вопросу об антиоксидантной активности препарата «ТАМЕРОН»

#### **107 AUTHORS**

#### Моделирование передаточной функции теле- 109 ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

#### 110 ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ

#### Научно-технический журнал

#### **ИЗВЕСТИЯ** Института инженерной физики

№3 (57) 2020

Издается с апреля 2006 г. Выходит ежеквартально

ISSN 2073-8110

Включен в «Перечень ВАК» по научным специальностям: 05.11.16. Информационно-измерительные и управляющие системы 05.12.13. Системы, сети и устройства телекоммуникаций 05.13.01. Системный анализ, управление и обработка информации 05.13.19. Методы и системы защиты информации,

информационная безопасность Главный редактор,

председатель редакционного совета и редакционной коллегии

Алексей Николаевич Царьков Президент - Председатель Правления МОУ «ИИФ».

заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор

Редакционный совет

Геннадий Иванович Азаров главный научный сотрудник ФГУП «16 ЦНИИИ МО РФ» заслуженный деятель науки РФ, заслуженный изобретатель РФ, лауреат Государственной премии РФ, лауреат премии Правительства РФ,

доктор технических наук, профессор Сергей Владимирович Дворянкин начальник департамента Государственной корпорации «POCTEX» ОАО КРЭТ,

доктор технических наук, профессор

Николай Михайлович Емелин

главный научный сотрудник ФГБНУ «Госметодцентр», заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор

Валерий Иванович Николаев научный референт ОАО «Концерн «Созвездие», лауреат Государственной премии СССР, лауреат премии Правительства РФ, доктор технических наук, профессор

Владимир Георгиевич Редько

заместитель руководителя Центра оптико-нейронных технологий НИИ системных исследований РАН, доктор физико-математических наук

Юрий Александрович Романенко

старший научный сотрудник филиала ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов) заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор

#### Александр Викторович Синьговский

старший научный сотрудник Европейского центра ядерных исследований (CERN), Adjunct Assistant Professor Университета Миннесоты (США), кандидат физико-математических наук

Анатолий Васильевич Тодосийчук главный советник аппарата Комитета ГД ФС РФ по образованию и науке, почетный работник науки и техники РФ, доктор экономических наук, профессор

Александр Павлович Царёв

заведующий кафедрой компьютерных архитектур и телекоммуникаций Западно-поморского технологического университета (Польша), доктор технических наук, профессор

Игорь Анатольевич Шеремет

заместитель директора Российского фонда фундаментальных исследований по науке, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор

#### Редакционная коллегия

#### Олег Николаевич Андрух

почетный работник науки и техники РФ, кандидат технических наук, доцент

# **Борис Фёдорович Безродный** доктор технических наук, профессор

## Сергей Борисович Беркович

почетный геодезист РФ доктор технических наук, профессор

#### Владимир Эрнестович Бородай

лауреат Государственной премии СССР, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

#### Игорь Александрович Бугаков

заслуженный изобретатель РФ, почетный работник науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор

#### Вадим Геннадьевич Грибунин

почетный работник науки и техники РФ, доктор технических наук

# Сергей Григорьевич Данилюк доктор технических наук, профессор

#### Владимир Владимирович Зеленевский

почетный работник науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор

#### Николай Николаевич Казаков

член Союза писателей России выпускающий редактор

### Олег Павлович Кузнецов

кандидат технических наук, доцент

# **Александр Ильич Куприянов** доктор технических наук, профессор

**Анатолий Викторович Мазин** доктор технических наук, доцент

#### Алексей Сергеевич Марков

доктор технических наук, старший научный сотрудник

#### Дмитрий Геннадьевич Митрофанов

заслуженный изобретатель РФ, доктор технических наук, профессор

#### Роман Леонидович Мусатов

кандидат технических наук заместитель главного редактора

#### Игорь Николаевич Оков

доктор технических наук, профессор

# Владимир Петрович Пашинцев

заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук, профессор

#### Дмитрий Вячеславович Смирнов

почетный работник науки и техники РФ, доктор технических наук, доцент

#### Сергей Владимирович Смуров

почетный работник науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор

# Валерий Николаевич Умников доктор технических наук, профессор

Владимир Анатольевич Цимбал заслуженный деятель науки РФ,

# доктор технических наук, профессор Сергей Николаевич Шиманов

почетный работник высшего профессионального образования РФ, почетный радист РФ, доктор технических наук, профессор



#### Валерий Кузьмич Курочка

заслуженный врач РФ кандидат медицинских наук, профессор руководитель Секции медикобиологических проблем обороны Экспертного совета Комитета ГД РФ по обороне советник Президента МОУ «ИИФ»

Поиск новых и эффективных лекарственных форм является первостепенной задачей современной медико-биологической науки. В условиях развития пандемии коронавирусной инфекции все передовые страны мира сразу же сосредоточились на поиске лекарственного препарата для лечения данного заболевания.

В МОУ «ИИФ» разработана и запатентована активная фармацевтическая субстанция, представляющая собой химическую молекулу аминодигидрофталазиндион натрия и способ ее получения. Доклинические исследования препарата «Тамерон» доказали отсутствие как острой, так и хронической токсичности, а также местно-раздражающего действия, что говорит о полной безопасности его применения, биодоступности и достижении максимальной концентрации препарата за минимальное время. На сегодня препарат «Тамерон» проходит государственную регистрацию в Министерстве здравоохранения России. Линейка препаратов серии «Тамерон» в нашем Институте предполагает выпуск в форме лиофилизата для внутримышечного введения, в форме суппозиторий, спрея для назального применения, а также лиофилизат для внутримышечного применения при лечении животных. В организме человека «Тамерон» вызывает снижение концентрации цитокинов ИЛ-1 и ИЛ-6, ведущих к уменьшению клинических и лабораторных показателей аутоиммунного ответа.

Как показывают последние исследования, инфекция COVID-19 ассоциирована с нарушениями дыхательной системы, при которой вирус запускает процесс иммунной воспалительной реакции, вызывающей острое легочное повреждение и дополнительный выброс Интерликина-6, который и формирует «цитокиновый шторм» (лавинообразное нарастание уровней многих маркеров воспаления: ИЛ-1В, ИЛ-6, СРБ, ФНОС, ИФНу, Ферритина и др.).

Эти осложнения ассоциированы с тяжелым течением COVID-19 и высоким риском летальных исходов. На сегодняшний день нет пока точно установленных лекарственных средств, непосредственно убивающих вирус, и специалисты пытаются решить проблему с вакциной против COVID-19. Мы считаем, что необходимо провести поиск уже имеющихся в стране готовых противовирусных лекарственных средств, показавших ранее эффективное противовирусное действие.

В МОУ «ИИФ» есть что предложить для частичного решения этой важнейшей на сегодняшний день проблемы. С этой точки зрения мы и предлагаем изучить на федеральном уровне возможности препарата «Тамерон», который снижает окислительный стресс в клетках и тканях и, таким образом, ингибирует развитие «цитокинового шторма» и гиперреакции иммунной системы у заболевшего, препятствует размножению вируса и способствует сохранению клеток, а также активирует иммунный ответ на уровне Т-клеток, которые уничтожают пораженные вирусом клетки.

Нам всем необходимо сделать серьезные выводы из пандемии коронавирусной инфекции, и мы не просто должны, а обязаны продолжать работу в интересах государства и расширять наши возможности в этом направлении.



#### Анатолий Иванович Смородин

почетный работник науки и техники РФ доктор технических наук, профессор профессор кафедры Э-4

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)» Адрес: 107005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5

Тел.: +7 (499) 263-61-27 E-mail: smorodin38@rambler.ru

#### Степан Сергеевич Сергеев

руководитель расчетной группы ПАО «Криогенмаш» Адрес: 143907, Московская обл., г. Балашиха, пр. Ленина, д. 67 Тел.: +7 (495) 505-93-33 E-mail: stepan.sergeev@omzglobal.com

**УДК 661.9** 

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ АППАРАТ РАСЧЕТА ДЕТАНДЕР-КОМПРЕССОРНОГО АГРЕГАТА СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ АДСОРБЦИОННО-КРИОГЕННОЙ УСТАНОВКИ

SCIENTIFIC-METHODICAL
APPARATUS FOR CALCULATING
THE EXPANDER-COMPRESSOR
UNIT OF THE STRUCTURALTECHNOLOGICAL SCHEME OF
THE ADSORPTION-CRYOGENIC
INSTALLATION

#### Максим Васильевич Кулик

начальник отдела организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов) Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17 Тел.: +7 (903) 797-36-67 E-mail: mklik@mail.ru

#### Алексей Александрович Коробков

кандидат технических наук, доцент начальник научно-методического управления МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: +7 (4967) 35-31-93 E-mail: korobkow@iifmail.ru

#### Аннотация

Представлен разработанный научно-методический аппарат расчета детандер-компрессорного агрегата структурно-технологической схемы адсорбционно-криогенной (АК) установки, включающий математические модели и методики расчета турбодетандера (ТД) и турбокомпрессора (ТК). Проведены расчеты ТД и ТК, включая: расчет основных параметров ТД и ТК, определение геометрических размеров рабочего колеса ТД и ТК, расчет лабиринтных уплотнений ТД и определение потерь технической работы ТК. По результатам сопоставительного анализа показателей термодинамического совершенства и надежности конкурирующих вариантов АК-установок произведен выбор базового варианта схемы и типов машинного и технологического оборудования АК-установки. Результаты данной работы могут быть полезны при проектировании АК-систем азотообеспечения испытаний ракетно-космической техники. Дальнейшие направления исследований в целях выявления возможного дополнительного повышения эффективности азотной АК-установки состоят в:

- исследованиях по определению влияния чистоты адсорбционного азота на эксергетический КПД установки обратной конденсации;
  - исследованиях и испытаниях влажно-парового ТД;
- расчетно-теоретических исследованиях влияния концентрации продукционного азота адсорбционного разделения на термодинамическую эффективность АК-установки.

**Ключевые слова:** адсорбционно-криогенная технология, детандер-компрессорный агрегат, изоэнтропное расширение, термодинамическая эффективность, термодинамические характеристики, турбодетандер, турбокомпрессор, установка обратной конденсации, эксергетический КПД.



#### Summary

The developed scientific and methodological apparatus for calculating the expander-compressor unit of the structural and technological scheme of the adsorption-cryogenic (AC) installation, including mathematical models and methods for calculating the turbo expander (TE) and turbocharger (TC), is presented. Calculations of TE and TC were carried out, including: calculation of the main parameters of TE and TC, determination of the geometric dimensions of the impeller of TE and TC, calculation of labyrinth seals of TE and determination of losses of technical work of TC. Based on the results of a comparative analysis of indicators of thermodynamic perfection and reliability of competing versions of AC-installations, the basic version of the scheme and types of machine and process equipment of the AC-installation were selected. The results of this work can be useful in the design of AC-systems for nitrogen supply of rocket and space technology tests. Further research directions, in order to identify a possible additional increase in the efficiency of the nitrogen AC-installation, are as follows:

- studies to determine the effect of adsorption nitrogen purity on the exergetic efficiency of the reverse condensation unit;
  - research and testing of wet-steam TE;
- computational and theoretical studies of the effect of the concentration of production nitrogen of the adsorption separation on the thermodynamic efficiency of the AC-installation.

**Keywords:** the adsorption-cryogenic technology, the expander-compressor unit isoentropic expansion, thermodynamic efficiency, thermodynamic characteristics, and a turbo-expander, the turbo-compressor installation is the reverse of condensation, exergy efficiency.

Криовакуумная техника имеет особое значение при исследовании космического пространства, так как, вакуум и низкие температуры являются важнейшими характеристиками космической среды. Моделирование термического состояния космического пространства осуществляется в криогенных термовакуумных камерах (КТВК) с азотными экранами, охлаждаемыми жидким азотом. Для реконденсации паров азота, образующихся в азотных экранах, применяются криогенные установки обратной конденсации (УОК). Они могут базироваться на различных циклах, с различными термодинамическими характеристиками и показателями надежности [1,2]:

- 1) цикл Клода среднего давления с двумя турбодетандерами (ТД);
- 2) цика низкого давления с дожатием детандерного потока в компрессорной ступени;
- 3) цикл низкого давления с дожатием потока в компрессорной ступени, влажно-паровым (ВП)  $T\mathcal{A}$  и переохладителем.

В [1] по результатам проведенного сопоставительного анализа показателей термодинамического совершенства и надежности конкурирующих вариантов в качестве базового варианта схемы адсорбционно-криогенной (АК) УОК выбрана схема УОК, построенная по рефрижераторному циклу низкого давления с ВПТД, с пластинчато-ребристыми теплообменниками и адсорбционной воздухоразделительной установкой для обеспечения непрерывного функционирования УОК.

В целях решения задач по проектированию АК азотной жидкостной системы КТВК необходимо, в числе прочего, провести моделирование детандер-компрессорного агрегата (ДКА) АКустановки, для чего требуется разработать научно-методический аппарат расчета ДКА, освеще-

нию чего и посвящена данная научная статья.

# **В.1. Исходные данные Таблица 1**Исходные данные для расчета ТД и ТК

Патаматт	Значение		
Параметр	ТД	TK	
Давление на входе в ТД (ТК) $p_{_{H^{\prime}}}$ МПа	9,00.10-1	7,00.10-1	
Давление на выходе из ТД (ТК) $p_{_{2}}$ , МПа	1,31·10 <sup>-1</sup>	9,10·10 <sup>-1</sup>	
Температура газа на входе в ТД (ТК) $T_{\mu}$ , К	1,20·10 <sup>2</sup>	3,05·10 <sup>2</sup>	
Расход газа $m_{_1}$ , кг/с	1,29	1,50	
Газ	Азот	Азот	

# 1. Математическая модель и методика расчета $T\mathcal{A}$

#### 1.1. Расчет основных параметров ТД

С использованием исходных данных были произведен расчет следующих параметров:

• приведенный расход для определения оптимальных параметров (по методике Т.М. Розеноер [3]):

$$m_{np} = m_1(p_{np}/p_0)\cdot\sqrt{(T_0/T_{np})} = 8,60\cdot10^{-1} \text{ kg/c};$$

• параметры газа на входе в ТД (определены с использованием программы T-S PROG):

$$h_n = 1,12\cdot10^4$$
 Дж/кг;  $s_n = 1,02\cdot104$  Дж/кг;  $p_n = 2,90\cdot104$  кг/м³;

• энтальпия и температура газа в конце процесса (при изоэнтропном расширении (ИЭР)):

 $\hat{h}_{bs} = 6,50 \cdot \hat{1}0^4 \, \text{Дэк/кг}; \, T_b = 7,96 \cdot 10^1 \, \text{K};$ 

• изоэнтропный (ИЭ) перепад:

$$\Delta_{hs} = |h_u - h_{hs}| = 4,70.10^4 \, \text{Дж/кг};$$

• условная скорость газа в сопловом аппарате (CA) при ИЭР:

$$c_s = \sqrt{(2 \cdot \Delta h s)} = 3.07 \cdot 10^2 \text{ m/c};$$

• значения степени реактивности  $p_m$  и скоростного коэффициента направляющего аппарата  $\varphi$  (по [3, с.12]):

$$p_m = 5,00.10^{-1} \text{Дж/кг}; \varphi = 9,10.10^{-1};$$



• реальная скорость истечения газа из СА:  $c_1 = \varphi \cdot \sqrt{(1 - p_m \cdot c_s)} = 1,97 \cdot 10^2 \text{ M/c};$ 

• угол выхода газа из СА:

$$\alpha_1 = 8^{\circ}$$
;

• радиальная составляющая:

$$c_{1r} = c_1 \cdot \sin(\alpha_1) = 2,75 \cdot 10^1 \text{ m/c};$$

• коэффициент приведенной окружной скорости (по [3, с. 12]):

 $\overline{u_1} = 6.80 \cdot 10 - 1;$ 

• окружная скорость рабочего колеса:

$$u1 = \overline{u_1} \cdot cs = 2,08.102 \text{ m/c};$$

• относительная скорость на входе в рабочее колесо:

$$w_1 = \sqrt{(u_1^2 + c_1^2 - 2 \cdot u_1 \cdot c_1 \cdot \cos(\alpha_1))} = 30.4 \text{ m/c};$$

• угол входа потока в относительном движе-

$$\beta_1 = (180^{\circ} - arcsin(c1/u_1)) = 115.5^{\circ};$$

• величина приведенного диаметра принимается по [3, с. 12]:

$$\overline{d} = 0.5$$
;

• окружная скорость на среднем диаметре на выходе из рабочего колеса:

$$u_2 = \bar{\mathbf{d}} \cdot u_1 = 1.04 \cdot 10^2 \,\text{M/c};$$

• теплоперепад в СА (при ИЭР):

$$\Delta h_{ls} = (1 - p_m) \cdot \Delta h_s = 2,35 \cdot 10^4 \, \text{Дж/кг};$$

• действительный теплоперепад в СА:

$$\Delta h_{I_s} = \varphi^2 \cdot \Delta h_{I_s} = 1.95 \cdot 10^4 \, \text{Дэк/кг};$$

• энтальпия за СА (при ИЭР):

$$h_{1s} = h_n - \Delta h_{1s} = 8,85 \cdot 10^4 \, \text{Джc/кc};$$

• энтальпия за СА в действительном процессе

$$h_1 = h_2 - \Delta h_1 = 9.26 \cdot 10^4 \, \text{Дж/кг};$$

• давление за направляющим аппаратом (определяемое по параметрам  $s_{\mu}$  и  $p_{\mu}$ ):

$$p_{*} = 3.73 \cdot 105 \text{ Ha};$$

 $p_{_{I}}=3.73\cdot 105\ \Pi a;^{^{n}}$ • температура  $T_{_{I}}$  и энтропия  $s_{_{I}}$  за направляющим аппаратом (определяемые по параметрам  $p_{_{1}}$  и  $h_{_{1}}$ ):

$$T_1 = 9,52 \cdot 10^1 \text{ K}; s_1 = 5,20 \cdot 10^3 \text{Дж/кг};$$

• энтальпия за направляющим аппаратом (определяемые по параметрам  $p^2$  и  $s^1$ ):

$$h_{2s} = 6.82 \cdot 10^4 \, \text{Дж/кг};$$

• располагаемый теплоперепад в рабочем колесе:

$$\Delta h'_{2s} = h_1 - h_{2s} = 2,44.10^4 \text{Дж/кг};$$

(по [3, с. 13]):

$$\psi = 0.83;$$

- скорость газа на выходе из рабочего колеса:  $w_{2s} = \sqrt{(2 \cdot \Delta h_{2s}^2 - u_1^2 + w_1^2 + u_2^2)} = 1.31 \cdot 10^2 \text{ M/c};$
- действительная скорость газа на выходе из рабочего колеса:

$$w^2 = \psi \cdot w_{2s} = 1,08 \cdot 10^2 \text{ M/c};$$

- отношение радиальных составляющих скорости  $K_c = 2$  (ввиду того, что:  $\alpha_t = 8^{\circ}$  по [3, с. 16]);
  - угол выхода потока из РК:
- =  $arcsin((K_c \cdot c_{1r})/w_2) = 30,5^{\circ}$  (принимается  $\beta_2$  $=30^{\circ}$ );
- абсолютная скорость потока на выходе из

$$c2 = \sqrt{(u_2^2 + w_2^2 + 2 \cdot u_2 \cdot w_2 \cdot \cos(\beta_2))} = 5.52 \cdot 10^1 \text{ m/c};$$

• потери холода в рабочем колесе:

$$\delta h_{yay} = (w_2 s^2 - w_2^2)/2 = 2,65 \cdot 10^3 \, \text{Дж/кг};$$

- потери холода с выходной скоростью:  $\delta h_{_{\rm BMX}} = c_{_2}{}^2/\,2 = 1{,}52{\cdot}10^3\,{\rm Amc/ke};$
- энтальпия на выходе из рабочего колеса:

$$h_2 = h_{2s} + \delta h_{\kappa o \pi} = 7,09 \cdot 10^4$$
Дж/кг;

- ullet температура  $T_2$  и плотность  $ho_2$  за рабочим колесом (определенные по параметрам Рг и Пг):  $T_2 = 7.96 \cdot 101 \text{ K}, \rho_2 = 6.12 \text{ kg/m}^3;$
- радиальная составляющая скорости на выходе из рабочего колеса:

$$c_{2r} = K_c \cdot c_{1r} = 5,50 \cdot 10^1 \text{ M/c}.$$

#### 1.2. Определение геометрических размеров рабочего колеса ТД

• коэффициент стеснения (принято по [3, с.

$$\tau_2 = 0.9;$$

- площадь выхода из рабочего колеса:  $f_2 = m_1/(c_{2r} \cdot \tau_2 \cdot p_2) = 4.27 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2;$
- втулочное отношение (принято по [3, с.17]):  $\zeta_{_{em}}=0,\hat{4};$
- диаметр на выходе из рабочего колеса:

$$d_2 = \sqrt{((2 \cdot f_2/n) \cdot ((1 + \zeta_{sm}^2)/(1 - \zeta_{em}^2))} = 6.13 \cdot 10^{-2} \text{м}$$
 (принято  $d_2 = 6.2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ );

• диаметр на входе в рабочее колесо:

$$d_1 = d_2 / \bar{d}^{-1} = 1,24 \cdot 10^{-1} \text{ м}$$
 (принято  $d_1 = 1,25 \cdot 10^{-1} \text{ м}$ );

• выходной диаметр воронки рабочего коле-

$$\begin{array}{c} d_{_{\mathcal{O}}}=d_{_{2}}\text{-}\!\sqrt{(2/\left(1+\zeta_{_{\mathit{em}}}^{2}\right))}=8.14\text{--}10^{\text{-}2}\,\mathrm{м}\\ (\text{принято}\ d_{_{\mathcal{O}}}=8.00\text{--}10^{\text{-}2}\,\mathrm{м}); \end{array}$$

• диаметр втулки на выходе из рабочего ко-

$$d = d \cdot \zeta = 3.20 \cdot 10^{-2} \text{ M}$$

 $d_{_{\it em}}=d_{_{\it 0}}{:}\zeta_{_{\it em}}=3{,}20{\cdot}10^{\cdot2}\,{\rm M;}$  • угол выхода потока из рабочего колеса в абсолютном движении:

$$\alpha_2 = 180^{\circ} + arctg(sin(\beta_2)/(cos(\beta_2) - (u_2/w_2))) = 100.9^{\circ};$$

• частота вращения ротора:

$$n = (u_1.60/n.d_1) \cong 3.19.10^4 \Gamma u_i$$

• гидравлический КПД:

$$\eta_r = (\bar{h}_n - h_2 - \delta h_{\text{edds}}) / \Delta h_s = 8,44 \cdot 10^{-1};$$

• коэффициент стеснения на входе в рабочее колесо (по [3, с.17]):

$$\tau_1 = 9,50 \cdot 10^{-1};$$

• плотность за СА:

$$\rho_1 = 1.45 \cdot 10^1 \text{ kg/m}^3$$

(определена по параметрам р1 и Т1);

• высота лопатки РК:

$$\begin{array}{c} b_{\scriptscriptstyle I} = m_{\scriptscriptstyle I}/\left(p_{\scriptscriptstyle I} \cdot n \cdot d_{\scriptscriptstyle I} \cdot c_{\scriptscriptstyle I} \cdot \tau_{\scriptscriptstyle I} \cdot sin(\alpha_{\scriptscriptstyle I})\right) = 8,69 \cdot 10^{-3} \text{M} \\ (npunamo \ b_{\scriptscriptstyle I} = 8,75 \cdot 10 - 3 \ \text{M}); \end{array}$$

• соотношение:

$$b_1/d_1 = 0.07;$$

• техническая работа ТД:

$$L = h_1 - h_2 + \delta h = 2.32 \cdot 10^4 \, \text{Дэк/кг}$$
:

 $L_{_{I}}=h_{_{I}}-h_{_{2}}+\delta h_{_{\it solx}}=2{,}32{\cdot}10^{4}\,{\it Дж/кг};$  вязкость азота (определяется по формуле Сазерленда):

$$\mu N_2 = \mu N_{20} \cdot ((C_{N2} + 2,73 \cdot 10^2)/(C_{N2} + T_1)) \cdot (T_1/2,73 \cdot 10^2)^{3/2} = 6,50 \cdot 10^{-6} \, \Pi a \cdot c;$$

• число Рейнольдса на входе в рабочее колесо:  $Re_d = (d_1 \cdot u_1 \cdot p_1) / \mu_1 = 5.80 \cdot 10^7;$ 

• коэффициент сопротивления вращающегося диска:

$$c_f = 8,90 \cdot 10^{-3} \cdot Re^{-0.2} = 2,50 \cdot 10^{-4};$$

• величина потерь на трение:

 $N_{md} = (c_f u_1^{\hat{3}} \cdot d_1^{3} \cdot p_1) / 8 = 6,40 \cdot 10^1 Bm;$ 

• коэффициент потерь на трение:

 $\alpha_{ma} = N_{md} / (\hat{m}_1 \cdot L_1) = 2.14 \cdot 10^{-3};$ 

• ИЭ КПД ступени:

$$\eta_s = \eta_r - \alpha_{mo} = 0.844 - 2.14 \cdot 10^{-3};$$

• мощность на валу ТД:

$$N_{\text{dem}} = m_1 \cdot \eta_s \cdot \Delta h_s = 5,10 \cdot 10^1 \text{ kBm}.$$

#### 1.3. Расчет лабиринтных уплотнений Таблица 2

Исходные данные для расчета лабиринтных уплотнений

Параметр	Значение
Давление перед уплотнением $p_{_1}$ , МПа	3,73·10 <sup>-1</sup>
Давление за уплотнением $p_{_{\kappa'}}$ МПа	1,31·10 <sup>-1</sup>
Температура перед лабиринтными	7,96·10 <sup>-2</sup>
уплотнениями $T_{\gamma_{\kappa'}}$ К	
Диаметр вала, м	3,50·10-2

коэффициент расхода (по [6, с. 206]):

$$\mu_{\pi} = 0.7;$$

• число лабиринтов (принято):

$$n_{_{\Lambda ab}}=18;$$

#### Таблица 3

Геометрические характеристики лабиринтного уплотнения

,	
Геометрические характеристики	Значения
Ширина лабиринтного уплотнения $\Delta_{na6}$ , м	7,50·10 <sup>-4</sup>
Шаг лабиринтного уплотнения $t_{na6'}$ м	1,00.10-3
Диаметр лабиринтного уплотнения $d_{not}$ м	3,78·10-2

относительный зазор [6, с. 206]:

$$\delta \pi = (8,00\cdot10\text{-}4)/\sqrt{(d_0)} = 2,82\cdot10^{-3}$$
  
(принято  $\delta_0 = 3,00\cdot10^{-3}$ ;

• зазор в уплотнении:

$$\delta_{_{_{3}}} = \delta_{_{_{N}}} \cdot d_{_{N}a6} = 1.31 \cdot 10^{-4} \text{ M};$$

• площадь поперечного сечения щели:

$$f_{nab} = \Pi \cdot \delta_{3} \cdot d_{nab} = 1,80 \cdot 10^{-5} \text{ M}^{2};$$

• величина утечек (ввиду дозвукового течения):

$$m_{ym} = \mu_{x} \cdot f_{xab} \cdot \sqrt{((p_{1}^{2} + p_{\kappa}^{2})/(n_{xab} \cdot R_{N2} \cdot T_{2\kappa}))} = 6.80 \cdot 10^{3} \, \text{kg/c};$$

• длина лабиринтного уплотнения:

$$l_{nab} = t_{nab} \cdot (n_{nab} - 1) + \Delta_{nab} \cdot n_{nab} = 3,05 \cdot 10^{-2} \text{ m};$$

• уточненный коэффициент утечек:

$$\alpha_{ym} = m_{ym}/m_1 = 5,20 \cdot 10^{-3};$$

• уточненный ИЭ КПД ТД:

$$\eta_s' = \eta_s - \alpha_{vm} = 8.36 \cdot 10^{-1};$$

#### 2. Математическая модель и методика расчета ТК

#### 2.1. Расчет основных параметров ТК

• плотность газа на входе:

$$\rho_{y} = 7,75 \text{ } \kappa \text{?/} \text{M}^{3};$$

• объемный расход газа:

$$V_{u} = m/\rho_{u} = 1,90 \cdot 10^{-1} \text{ m}^{3/c};$$

• степень повышения давления:

$$n_k = p_k / p_u = 1.30;$$

• угол установки лопатки на выходе из колеса (по рек. [4, с. 4]):

$$\beta_{2n} = 60^{\circ};$$

• коэффициент ИЭ работы (по [4, с. 4]):

$$\bar{L}_{s} = 0.56;$$

• радиальная составляющая абсолютной скорости (по [4, с. 4]):

$$\overline{\mathbf{C_{2r}}} = 0.28;$$

• полная ИЭ работа сжатия для идеального газа:

$$L_{s \text{ norm}} = (k/(k-1)) \cdot R \cdot T_{n} \cdot (n_{k}^{(k/k-1)}) = 2,47 \cdot 10^{4} \text{Дж/кг};$$

• окружная скорость на внешнем диаметре колеса:

$$u_{2} = \sqrt{(L_{s \text{ nonn}}/L_{s})} = 2,10\cdot10^{2} \text{ m/c};$$

• политропный  $\vec{K} \vec{\Pi} \mathcal{A}$  (по [4, с. 6]):

$$\eta_{nnm} = 0.80;$$

• величина  $\sigma$ :

$$\sigma = (k/(k-1)) \cdot \eta_{nnm} = 2,80;$$

• коэффициент загромождения (по рек. [4, с. 6]):

$$\tau_1 = 0.82;$$

• скорость газа на входе в колесо:

$$c_0 = c_1 = 0.3 \cdot u_2 / \tau_1 = 7.68 \cdot 10^1 \text{ m/c};$$

• скорость газа на входе и выходе из ТК (по рек. [4, с.6]):

$$c_{_{\mathit{H}}} = c_{_{_{\mathit{K}}}} = 2,50 \cdot 10^{1} \,\mathrm{M/c};$$

• понижение температуры при входе во вса-

$$\Delta T_1^{1/2} = (c_1^2 - c_n^2)/c_p = 5.1 \text{ K};$$

• температура газа на входе в колесо:

$$T_1 = T_n - \Delta T_1 = 3,00.10^2 \text{ K};$$

• давление на входе в ТК:

$$p_1 = p_{\nu} \cdot (T_1 / T_{\nu})^{(k/(k-1))} = 6,60 \cdot 10^{-1} M\Pi a;$$

• плотность (по электронным таблицам):

$$\rho_1 = 8.05 \text{ kg/m}^3;$$

• температура в конце политропного процесса сжатия:

$$T_k = T_1 \cdot (p_1/p_k)^{(1/\sigma)} = 3.29 \cdot 10^2 \text{ K};$$

• угол на входе в колесо лопатки на выходе из колеса (по рек. [4, с.6]):

$$\beta_{1n} = 32^{\circ};$$

• угол потока в абсолютном движении согласно (по рек. [4, с.6]):

$$\beta_1 = 35^{\circ};$$

• приведенный диаметр (по [4, с. 6]):

$$\bar{d} = 0.5;$$

• приведенная меридиональная составляющая скорости (для  $\phi_1 = 0$ ):

$$\overline{\mathbf{C_{1m}}} = (1 - \psi_l) \cdot \overline{\mathbf{d}} \cdot tg(\beta_l) = 3.50 \cdot 10^{-l};$$
• приведенная абсолютная скорость:

$$\bar{c}_1 = \sqrt{\bar{c}_{1m}}^2 + (\phi_1 \bar{d})^2 = 3,50 \cdot 10^{-1};$$
• приведенная относительная скорость:

$$\overline{\mathbf{W_1}} = ((1 - \varphi_1) \cdot \bar{\mathbf{d}}) / \cos(\beta_1) = 6.10 \cdot 10^{-1};$$

• абсолютная скорость на входе в колесо:

$$c_1 = \overline{c_1} \cdot u_2 = 7,68 \cdot 10^1 \text{ m/c};$$



- относительная скорость на входе в колесо:  $w_1 = \overline{\mathbf{W_1}} \cdot u_2 = 1.28 \cdot 10^2 \,\text{m/c};$
- густота решетки принимается (по рек. [4, с. 8]):  $(l/t)_{cp} = 2.6;$
- число лопаток на выходе из колеса:

$$z_{2}=(l/t)_{cp}\cdot n\cdot ((1+ar{d})/(1-ar{d}))\cdot sin((eta_{_{1}}+eta_{_{2\pi}})/2)=18,1$$
 (принимается:  $z_{_{2}}=20$ );

- коэффициент закрутки на выходе из колеса
  - $\mathbf{C}_{2u\infty} = 1 \overline{\mathbf{C}_{2r}} \cdot ctg(\beta_{2n}) = 8,40 \cdot 10^{-1};$
- коэффициент циркуляции (для угла
  - $\mu = 1 (n \cdot \sin(\beta_{2u})/z_2 \cdot \overline{\mathbf{C}_{2u\infty}}) = 8,60 \cdot 10^{-1};$
  - коэффициент закрутки на выходе из колеса:  $\overline{\mathbf{c}_{2u}} = \mu \cdot \overline{\mathbf{c}_{2u\infty}} = 7,20 \cdot 10^{-1};$
- приведенная абсолютная скорость потока на выходе из колеса:
- $\bar{c_2} = \sqrt{\bar{c}_{2r}^2 + \bar{c}_{2u}} = 7,80\cdot 10^{-1};$  приведенная относительная скорость потока на выходе из колеса:
  - $\overline{w_2} = \sqrt{\overline{c_{2r}^2 + (1 \overline{c_{2u}})^2}} = 3.90 \cdot 10^{-1};$
  - абсолютная скорость на выходе из колеса:  $c_2 = \overline{\mathbf{c_2}} \cdot u_2 = 1,63 \cdot 10^2 \text{ m/c};$
  - относительная скорость на входе из колеса:  $w_{_2} = \overline{\mathbf{W_2}} \cdot u_{_2} = 8,24 \cdot 10^1 \text{ m/c};$
- угол потока в абсолютном движении на выходе из колеса:
  - $\alpha_2 = arctg \left( \overline{\mathbf{c}_{2r}} / \overline{\mathbf{c}_{2u}} \right) = 21.1^\circ;$
- угол потока в относительном движении на выходе из колеса:
  - $\beta_2 = arctg \left( \overline{\mathbf{C}_{2r}} / \left( 1 \overline{\mathbf{C}_{2u}} \right) \right) = 136,5^{\circ};$
  - - $M_u = u_2 / \sqrt{(k \cdot R \cdot T_u)} = 6,00 \cdot 10^{-1};$
- коэффициент, учитывающий влияние числа Маха на потери в колесе:
  - $k_{_{M}} = 1, m.\kappa. M_{_{u}} < 1;$
- коэффициент потерь абсолютной скорости в колесе (по рек. [4, с. 8]):
  - $\zeta_{a} = 2,70 \cdot 10^{-1};$
- коэффициент потерь относительной скорости в колесе (по рек. [4, с. 8]):
  - $\zeta_{yy} = 0.15 + (0.076/\sqrt{(V_{yy})}) = 3.20 \cdot 10^{-1};$
  - коэффициент технической работы:
  - $\overline{L}_{\mathsf{t}} = \overline{c_{2u}} \varphi_1 \overline{d^2} = 7,20 \cdot 10^{-1};$  относительные потери в колесе:

  - $\zeta_{_{\text{NOA}}} = (k_{_{\text{M}}}/(2\cdot \bar{L_{\text{t}}}\cdot u_{_{2}}^{2}))\cdot(\zeta_{_{\text{W}}}\cdot w_{_{1}}^{2} + \zeta_{_{\text{c}}}\cdot c_{_{1}}^{2}) = 1,10\cdot 10^{-1};$
  - степень реактивности:
    - $p_{cm} = 1 (/2 \cdot L_t) = 5,80 \cdot 10^{-1};$
  - ИЭ КПД колеса:
    - $\eta_s = 1 \zeta_{\kappa o x} / p_{cm} = 8,20 \cdot 10^{-1}.$
- 2.2. Определение геометрических размеров рабочего колеса ТК
  - втулочный коэффициент (по рек. [4, с. 10]):  $\Xi_{\rm em} = D_{\rm em}/D_{\rm o} = 5,00\cdot\bar{1}0^{-1};$
- отношение диаметров для осерадиального колеса:

- $k_0 = D_0/D_1 = \sqrt{(2/(1 + \Xi_{am}^2))} = 1,26;$
- диаметр колеса (определяется из соотношения:

$$\begin{array}{c} n=(60\cdot u_{2})\!/\,(n\cdot d_{2})):\\ d_{2}=(60\cdot u_{2})\!/\,(n\cdot n)=1,\!26\cdot 10^{\text{-1}}\text{м}\\ (принимается: }d_{9}=1,\!25\cdot 10^{\text{-1}}\,\text{м}); \end{array}$$

• диаметр колеса на входе:

$$d_1 = \bar{d} \cdot d_2 = 6.25 \cdot 10^{-2} \text{ m};$$

• диаметр входа в рабочее колесо:

$$d_0 = k_0 \cdot d_1 = 7,91 \cdot 10^{-2} \text{ M}$$

(принимается:  $d_0 = 8,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ );

- диаметр втулки:
  - $d_{am} = \zeta_{am} \cdot d_0 = 4,00 \cdot 10^{-2} \text{ M};$
- толщина лопатки (по рек. [4, с. 11]):  $\delta_{1} = \delta_{1} = 8,00 \cdot 10^{-4} \text{ M};$
- коэффициент стеснения сечения лопатками на входе в колесо:
  - $\tau_1 = 1 (z_1 \cdot \delta_1) / (n \cdot d_1 \cdot \sin(\beta_{1\pi})) = 8,20 \cdot 10^{-1};$
- коэффициент стеснения сечения лопатками на выходе из колеса:

$$\tau_2 = 1 - (z_2 \cdot \delta_2) / (n \cdot d_2 \cdot \sin(\beta_{2n})) = 1.$$

- 2.3. Определение потерь технической работы
- плотность газа на выходе из колеса:
  - $\rho_2 = 9.15 \text{ kg/m}^3;$
- вязкость азота (по формуле Сазерленда):

$$\mu_{N2} = \mu_{N20} \cdot ((C_{N2} + 2,73 \cdot 10^2)/(C_{N2} + T_2)) \cdot (T_2/2,73 \cdot 10^2)^{3/2} = 2,02 \cdot 10^{-5} \, \Pi a \cdot c;$$

- шероховатость дисков (по рек. [4, с. 12]):  $R_z = 5,00 \cdot 10^{-6} \text{ m};$
- предельное число Рейнольдса для колеса:  $Re_{nped} = (50 \cdot d_2) / R_z = 1,26 \cdot 10^6;$
- коэффициент сопротивления вращающегося диска (для случая, когда  ${\rm Re} > {\rm Re}_{_{nped}}$ ):  $c_f = 8,90 \cdot 10^{-3} \cdot Re_{nbed}^{-0,2} = 5,40 \cdot 10^{-4}.$

#### 3. Математическая модель и методика расчета ДКА

#### 3.1. Расчет системы подвески ротора ДКА

ТД является высокооборотной машиной. Тип используемой подвески ротора зависит от числа оборотов и массы ротора. К наиболее используемым относятся магнитные масляные и лепестковые подшипники. Лепестковые подшипники в данном случае неприменимы, в виду их меньшей несущей способности, а также сложности ремонта. Магнитные подшипники в данный момент на территории России не производятся, поэтому их использование (в виду возможных санкций) ограничено.

Осевая сила определяется по формуле:

$$\begin{split} F_{o} &= (\Pi/4) \cdot [p_{1} \cdot (D_{1}^{2} - D_{x}^{2}) - (D_{1}^{2} - D_{o}^{2}) \cdot (p_{1} + p_{k})/2 - (D_{0}^{2} - D_{em}^{2}) \cdot p_{k} - ((p_{1} \cdot U_{1}^{2})/8) \cdot (D_{o}^{2} - D_{x}^{2}) \cdot (1 - (D_{o}^{2} - D_{x}^{2})/2 \cdot D_{1}^{2})] - M_{1} \cdot C_{2} = 1.34 \cdot 10^{3} \, H. \end{split}$$

Для определения массы ротора и рабочих колес требуется знать их объем. Объем элементов вычисляется на основе трехмерной модели

ДКА, выполненной с использованием программы «Generative structural analysys» (CATIA v.5.20):

• объем колеса ТД:

$$V_{\text{кол}_{\kappa}} = 1,82 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3;$$

• объем ротора (вала):

$$V_{pom} = 1,03 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3,$$

т.о. (при плотности алюминия  $\rho_{Al} = 2.85 \cdot 10^3$ кг/м³ и плотности стали  $\rho_{cm} = 7.85 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ):

• масса колеса ТД:

$$m_{_{\kappaon\_\partial}}=V_{_{\kappaon\_\partial}}$$
: $ho_{_{Al}}=5,20\cdot 10^{-1}$  кг; • масса колеса ТК:

$$m_{hom} = V_{hom} \rho_{Al} = 8,08 \text{ Ke}$$

 $m_{_{pom}} = V_{_{pom}} \cdot \rho_{_{Al}} = 8,08 \; \text{кг}.$  Сила тяжести, действующая на один подшипник:

$$F_{\rm cm} = ((m_{\rm pom} + m_{{\rm kos\_k}} + m_{{\rm kos\_l}}) \cdot g)/2 = 4,11 \cdot 10^1~H.$$
 Размеры шипа (по рек. для ТД):

- диаметр шипа:  $d_{m} = 4,00 \cdot 10^{-2} \,\mathrm{M}$ ,
- $\bullet$  длина шипа:  $L_{_{^{\prime\prime\prime}}} = d_{_{^{\prime\prime\prime}}} = 4,00\cdot10^{-5}$  м. Параметры подшипника:
- температура масла в рабочей зоне:

$$T_{\rm M} = 3.05 \cdot 10^2 \, \text{K};$$

• перегрев масла:

$$\Delta T_{_{M}} = 2,00 \cdot 10^{1} \text{ K};$$

• относительный зазор в подшипнике:

$$\bar{h} = 0.8 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[4]{\pi \frac{n}{60} d_m} = 2.3 \cdot 10^{-3};$$

• зазор в подшипнике:

 $h_0 = \bar{\mathbf{h}} d_{yy} = 4.6 \cdot 10^{-5} \text{м}$  (принимается  $h_0 = 9.00 \cdot 10^{-5} \text{м}$ );

• угловая скорость:

$$\omega = ((2 \cdot n)/60) \cdot n = 3,36 \cdot 10^{3} c^{-1};$$

• средняя удельная нагрузка на шип:

$$R_{\rm yd} = p_{\rm cm}/(d_{\rm w} \cdot L_{\rm w}) = 2.82 \cdot 10^4 \, \Pi a.$$

Согласно [5, с.30] предельное значение безразмерного критерия Зоммерфельда  $S_0$  при котором возможно жидкостное трение:

$$S_{0\underline{n}p} = 1,00\cdot10^{-5}, \text{ T.o.:}$$
  
 $S_{0} \leq (R_{yo} \cdot \overline{h}^{2})/(\mu_{M} \cdot \omega),$ 

где  $\mu_{\!\scriptscriptstyle M}$  – динамическая вязкость масла, Па·с.

Откуда максимальная вязкость, при которой возможно жидкое трение:

$$\mu_{\text{uniform}} \ge (R_{\text{uni}} \cdot \overline{\mathbf{h}}^2) / (S_{\text{out}} \cdot \omega)$$

 $\mu_{_{M\_Mdx}} \ge (R_{y0}\overline{\cdot h}^2)/\left(S_{onp}\cdot w\right).$  Для применения в турбомашинах предлагается использовать турбинное масло марки  $\Lambda 22$ (из рекомендуемых марок Л22 и УТ30), поскольку оно обладает меньшей вязкостью (вязкость масла  $\mu_{MA22} = 4,75 \cdot 10^{-2} \, \Pi a \cdot c$ ).

• безразмерный конструктивный параметр опоры:

$$F_{on} = (R_{yo} \cdot \mathbf{h}^2) / (\mu_{M} \cdot \omega) = 4,06 \cdot 10^{-1};$$

параметр (по [5, с. 30])

$$e_{b} = 5.39 \cdot 10^{-1};$$

• минимальная толщина смазочного слоя:

$$h_{min} = 0.5 \cdot \overline{\mathbf{h} \cdot (1 - e_p)} \cdot d_u = 2.12 \cdot 10^{-5} \text{ M};$$

• шероховатость вала и вкладыша:

$$R_{\tau} = 2,00 \cdot 10^{-6} \text{ m};$$

• критическая толщина смазочного слоя:

$$h_{KD} = 2 \cdot R_z = 4,00 \cdot 10^{-6} \text{ M};$$

• конструктивный параметр:

$$a = 0.05 \cdot d_{m} + 3.00 \cdot 10^{-3} = 2.30 \cdot 10^{-5} \text{ m};$$

• круговая скорость на шипе вала:

$$u_{m} = 0.5 \cdot d_{m} \cdot \omega = 6.72 \cdot 10^{1} \text{ M/c};$$

• мощность трения в радиальном подшипнике:

$$N_{mp\_pao} = (n/(2 \cdot \hat{h}_0)) \cdot \mu_{_{M}} \cdot \mu_{_{u}}^{2} \cdot d_{_{u}} \cdot L_{_{u}} (1 + + ((2 \cdot a)/L_{_{u}}) = 7,50 \cdot 10^{3} Bm;$$

коэффициент (по [5, с. 33]):

$$f_{mp} = 9,75 \cdot 10^{-3};$$

• перегрев масла:

$$\Delta T_{_{\rm M}} = 2,00 \cdot 10^1 \, \mathrm{K};$$

ullet плотность  $ho_{_{\!M}}$  и удельная теплоемкость  $c_{_{\!M}}$ масла (по [5, с.29]):

$$ρ_{M} = 8,89 \cdot 10^{2} \, \text{Дж/м}^{3};$$
 $c_{M} = 1,88 \cdot 10^{3} \, \text{Дж/(κε·K)};$ 

- расход масла через один подшипник:
- $G_{pad} = (f_{mp} \cdot p_{cm} \cdot u_{w}) / (c_{M} \cdot \Delta T_{M}) = 6.87 \cdot 10^{-2} \text{ kg/c};$
- коэффициент расхода подшипника:

$$\alpha_{p} = (2 \cdot G_{pab}) / (\overline{\mathbf{h}} \cdot \omega \cdot d_{u}^{2} \cdot L_{u} \cdot \rho_{u}) = 3,60 \cdot 10^{-2};$$

• общий коэффициент расхода:

$$\alpha_{b} = \alpha_{1s} + \alpha_{2s} + \alpha_{3s},$$

где  $\alpha_{1s}$  – коэффициент расход смазки через торцы нагруженной зоны (по [5, с.34]);

 $\alpha_{9x}^{2}$  – коэффициент расхода смазки через торцы ненагруженной зоны;

$$\alpha_{2s} = K_2 \cdot F_{on} \cdot (d_u / L_u)^2 \cdot (\rho_s / R_{vo});$$

 $lpha_{_{\mathbf{q}_{\mathrm{c}}}}$  – коэффициент, учитывающий дополнительное истечение смазки через вкладыш:

$$\alpha_{3s} = K_3 \cdot F_{on} \cdot (d_u / L_u)^2 \cdot (\rho / R_{vo});$$

• коэффициенты (по [5, с. 34]):

$$K_2 = 1.85 \cdot 10^{-1}, K_3 = 1.20 \cdot 10^{-1};$$

• конструктивный размер подшипника:

$$b_{u} = 0.25 \cdot d_{u} = 1.00 \cdot 10^{-2} \text{ M}.$$

Выражая из уравнения для общего коэффициента истечения значение  $p_s$ , получаем:

$$p_{s} = R_{yd} \left( \frac{\frac{2G_{pad}}{\overline{h}\omega L_{ud}d_{ud}^{2}}}{F_{on}\frac{d_{ud}}{L_{ud}}\left(K_{2} + K_{3}\frac{d_{ud}}{L_{ud}}\left(\frac{L_{ud}}{\alpha} - 2\right)\right)} \right) = 1.45 \cdot 10^{-1} M\Pi a$$

Т.о., принятый расход масла через подшипник –  $7,00\cdot10^{-2}$  кг/с, суммарный расход –  $1,40\cdot10^{-1}$ кг/с. Давление в подшипнике –  $1,45\cdot 10^{-1}$  МПа.

#### 3.2. Определение первой критической частоты вращения вала

Первая критическая частота определяет тип вала («гибкий»/ «жесткий»), а также необходимость установки демпфирующих устройств, особых методик выхода на режим. Как указано

в [6], первая критическая частота совпадает с первой собственной частотой вала, в результате чего возникает резонанс. Для определения собственных частот проектируемых изделий используются численные методы в частности - модуль программы CATIA v. 5.20.

Исходными данными для проведения расчета являются геометрическая модель, свойства материалов, размер элементов сетки и граничные условия.

Для создания сетки была построена модель в масштабе 1:1 (рисунок 1).

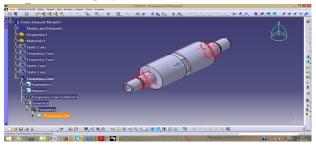


Рис. 1. Общий расчетной вид модели вала

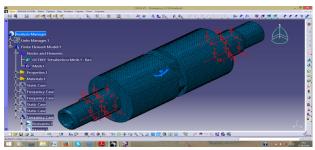


Рис. 2. Общий вид расчетной сетки

щью инструмента «user defined restraint». Граничные условия приложены к шипу вала и выбраны таким образом, что единственно возможное направление перемещения - вращение вокруг оси вала, т.к. вал установлен в двух радиальноосевых подшипниках и уравновешен в осевом направлении. Расчетная сетка наложена на вал (см. рисунок 2).

#### Описание расчетной схемы:

- тип сетки тетраэдрическая;
- характерный размер элемента 2,00·10<sup>-3</sup> м;
- тип закрепления: «user defined restraint», с вращением вокруг оси ОХ.

#### Результаты расчета

В результате расчета были определены собственные частоты вала, вплоть до 10-й гармоники:

• первая собственная частота:

$$h_1 = 3,43.10^3 \Gamma u_i$$

• частота вращения вала:

$$h_{\text{gang}} = 3.19 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot n = 5.31 \cdot 10^2 \, \Gamma \text{U};$$

• вал – жесткий (ввиду того, что  $h_{agag} \le h_1$ );

• запас по частоте оборотов:

$$v_{3an} = h_1 / h_{6ana} = 6.5.$$

4. Выбор базового варианта схемы и типов машинного и технологического оборудования АК-установки по результатам сопоставительного анализа показателей термодинамического совершенства и надежности конкурирующих вариантов АК-установок

Для сопоставительного анализа показателей термодинамического совершенства и надежности конкурирующих вариантов были выбраны следующие критерии:

- 1) эксергетический КПД;
- 2) время наработки на отказ.

Таблица 4

Приближенная оценка параметров установки

Параметры установки	Схема А*	Схема Б*	Схема В*
ТОА-1, кВт	1,61·10 <sup>2</sup>	2,07·10 <sup>2</sup>	2,02·10 <sup>2</sup>
ТОА-2, кВт	2,26·10 <sup>1</sup>	1,85·10 <sup>1</sup>	2,40·10 <sup>1</sup>
ТОА-3, кВт	1,12·10 <sup>1</sup>	8,0	9,0
$Q_{_{\partial em\_1}}$ , кВт	2,90·10 <sup>1</sup>	2,84·10¹	3,41·10 <sup>1</sup>
Q <sub>дет 2</sub> , кВт	2,65·10 <sup>1</sup>	-	-
Поправочные коэффициенты, учитывающие производительность по жидкому азоту К	1,39	5,83·10 <sup>-1</sup>	7,33·10 <sup>-1</sup>
Степень термодинамического совершенства $\eta_{\varsigma}$	3,65·10 <sup>-1</sup>	2,64·10 <sup>-1</sup>	3,32·10-1
Время наработки на от- каз $t_{omk}$ , час	3,33·10³	8,33·10³	8,33·10³

Примечание: \*) Здесь и далее использованы обозначения схем (А, Б, В), изображения и параметры которых приведены в [1]

Для оценки схем применяется смешанная обобщенная оценка. В качестве эталона приняты параметры схемы А [1].

Были выбраны следующие весовые коэффи-

- для степени термодинамического совершенства – 0,3;
  - для надежности 0,2.

Тогда оценка определяется следующим обра-30M:

Для схемы А [1]:

$$S = 0.5$$

Для схемы Б [1]:

 $S_{\rm CB}=0.3~(\eta_{\rm S~B}/\eta_{\rm S~A})+0.2~(t_{\rm om\kappa\_B}/~t_{\rm om\kappa\_A})=0.717.$  Для схемы В [1]:

 $S_{\it CB} = 0.3 \; (\eta_{\it S\_B}/\eta_{\it S\_A}) + 0.2 \; (t_{\it omk\_B}/t_{\it omk\_A}) = 0.773.$  С учетом обобщенных оценок предпочтительной является схема В [1].

#### Заключение

В настоящей статье для выбранной в [1] в качестве базового варианта схемы АК-установки обратной конденсации - расчетной схемы УОК,



построенной по рефрижераторному циклу низкого давления с ВП ТД, с пластинчато-ребристыми теплообменниками и адсорбционной воздухоразделительной установкой для обеспечения непрерывного функционирования УОК в программе ASPEN HYSYS (v.8.4), проведены расчеты ДКА, включая расчеты ТД и ТК.

По результатам сопоставительного анализа показателей термодинамического совершенства и надежности конкурирующих вариантов АКустановок произведен выбор базового варианта схемы и типов машинного и технологического оборудования АК-установки. С учетом обобщенных оценок, предпочтительной является схема В [1].

В дальнейшем для выявления возможного дополнительного повышения эффективности азотной АК-установки, целесообразно провести:

- исследования по определению влияния чистоты адсорбционного азота на эксергетический КПД УОК;
  - исследования и испытания ВПТД;
- расчетно-теоретические исследования влияния концентрации продукционного азота адсорбционного разделения на термодинамическую эффективность АК-установки.

#### Литература

1. Редькин В.В., Смородин А.И., Сергеев С.С., Кулик М.В., Коробков А.А. Конкурирующие варианты структурно-технологических схем азотных адсорбционно-криогенных установок криотермовакуумных камер для термовакуумных испытаний космических аппаратов // Известия Института инженерной физики, 2020. №1(55). С.24-31. 2. Разработка технического предложения по созданию азотных адсорбционно-криогенных установок повышенной надежности и эффективности для обеспечения проведения тепловакуумных ис-

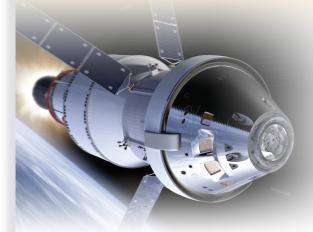
пытаний космических аппаратов в криогенных вакуумных камерах с азотными экранами: отчет о СЧ НИР шифр «Норма-ИИФ» (промежуточ.) / Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики»; рук. Редькин В.В.; отв. исполн. Смородин А.И.; исполн.: Коробков А.А. [и др.]. Серпухов, 2016. 109 с. Инв. № 67/И.

3. Розеноер Т.М. Расчет турбодетандера. Метод. указания по курсу «Турбомашины низкотемпературной техники». М.: Изд-во УНЦ МГТУ им. Н.Э. Баумана «Криоконсул», 2002. 80 с.

- 4. Архаров А.М. Криогенные системы: учебник для студентов ВТУЗов по специальностям «Техника и физика низких температур» и «Холодильная, криогенная техника и кондиционирование»: в 2 т. Т.2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем / А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.П. Беляков и др.; под общ. ред. А.М. Архарова и А.И. Смородина. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1999. 720 с.
- 5. Леонов В.П. Системы подвески ротора турбомашин. Метод. указания по курсу «Турбомашины низкотемпературной техники» / В.П. Леонов. М.: Изд-во УНЦ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 32 с..
- 6. Пешти Ю.В. Расчет критических частот вращения вала. Метод. указания / Ю.В. Пешти; под ред. И.Г. Суровцева. Изд. 2-е, доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 36 с.
- 7. Буткевич И.К. Качество и надежность криогенных систем. Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 52 с.
- 8. Редькин В.В., Смородин А.И., Сергеев С.С., Кулик М.В., Коробков А.А. Математическая модель и методика расчёта теплообменного оборудования базового варианта структурно-технологической схемы адсорбционно-криогенной установки // Известия Института инженерной физики, 2020. №2(56). С.25-32.







Дмитрий Вячеславович Смирнов

почетный работник науки и техники РФ доктор технических наук, доцент Первый Вице-президент Института – заместитель Председателя Правления Института МОУ «ИИФ» Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: +7 (4967) 35-31-93 E-mail: dv\_smr@iifmail.ru

#### Игорь Иванович Алаторцев

Вице-президент Института по общим вопросам и социальной политике МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: +7 (4967) 35-31-93

**УДК 531.55** 

ОСОБЕННОСТИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА КУСОЧНО-НЕПРЕРЫВНЫХ ПРОГРАММ УГЛА ТАНГАЖА КОСМИЧЕСКОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА АКТИВНОМ УЧАСТКЕ ТРАЕКТОРИИ С УЧЕТОМ ВРЕМЕННЫХ ПАУЗ МЕЖДУ РАБОТОЙ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ЕГО СТУПЕНЕЙ

FEATURES OF PARAMETRIC SYNTHESIS
OF PIECEWISE CONTINUOUS PROGRAMS
OF THE PITCH ANGLE OF THE
SPACECRAFT ON THE ACTIVE PART
OF THE TRAJECTORY TAKING INTO
ACCOUNT THE TIME PAUSES BETWEEN
THE OPERATION OF THE PROPULSION
SYSTEMS OF ITS STAGES

#### Алексей Игоревич Алаторцев

доктор технических наук начальник отдела МОУ «ИИФ» Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: +7 (4967) 35-31-93 E-mail: alexalat@yandex.ru

#### Аннотация

В статье рассмотрен подход к выбору оптимальной траектории угла тангажа для ступеней космического летательного аппарата, обеспечивающих построение опорной кусочно-непрерывной траектории полета. Приведена математическая модель движения ступени под действием сил в однородном гравитационном поле на участке временной паузы в земной системе координат.

Ключевые слова: космический летательный аппарат, двигательная установка, траектория.

#### Summary

The article considers an approach to choosing the optimal pitch angle trajectory for the stages of a space aircraft that provide the construction of a reference piecewise continuous flight path of the. A mathematical model of the stage movement under the action of forces in a uniform gravitational field at the time pause section in the earth's coordinate system is presented.

**Keywords:** spacecraft, propulsion system, trajectory.

Задача выбора угла тангажа первой ступени космического летательного аппарата (КЛА), учитывающая вертикальный старт, разворот первой ступени на цель, удержание продольной оси КЛА с углом атаки равным нулю при прохождении максимальных скоростных напоров, выбор конечного значения угла тангажа для полета второй ступени хорошо известна и может быть использована для построения опорной траектории движения КЛА [1]. Такой выбор программы угла тангажа первой ступени хорошо отработан и делится на три участка [2]:

- 1) участок дозвуковых скоростей;
- 2) участок транс- и сверхзвуковых скоростей и больших (q>800-1000 кГ/м²) скоростных напоров;
- 3) участок малых скоростных напоров или безатмосферный участок.

Рассмотрим подход к выбору оптимальной программы угла тангажа для второй и третьей ступеней КЛА, обеспечивающих построение опорной кусочно-непрерывной траектории полета ступеней КЛА. Эта задача состоит из следующих этапов:



1. Построение минимизирующей последовательности функций траекторий

 $y_i(t)$ :  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$ , ...  $y_n(t)$ ,

обладающих свойством:

 $\lim L(y(t)) = \min L(y(t)) = L(y(t)), \tag{1}$ 

где L(y(t)) – оптимизирующий функционал – дальность полета ступени КЛА с учетом величины временной паузы между работой двигательных установок (ДУ) последующей и предыдущей ступени.

Траектория полета ступени y(t) является предельной последовательностью  $\{y_n(t)\}$  и решением вариационной задачи.

2. Доказательство существования у последовательности  $\{y_n(t)\}$  предельной y(t) и законности предельного перехода.

Применительно к задаче выбора оптимальных программ угла тангажа для ступеней КЛА необходимо найти такую последовательность программы угла тангажа для каждой ступени  $\{\boldsymbol{\vartheta}_n(t)\}$ , которая обеспечивала бы экстремум функционала  $L(\boldsymbol{\vartheta}(t))$  дальности полета ступеней.

То есть, необходимо найти функцию изменения угла  $\boldsymbol{\theta}(t)$ , при которой скорость полета ступени будет наибольшей на момент включения двигательных установок последующей ступени, а дальность полета L была бы максимальной. Очевидно, основным критерием оптимизации будет скорость ступени в конце активного участка полета ступени  $V_{\kappa}$ . В работе [3] показано, что семейство программ угла тангажа ступеней на участке сверхзвукового полета является постоянной величиной  $tg \boldsymbol{\vartheta}_i = const.$  Следовательно, при построении кусочно-непрерывных траекторий полета КЛА программы угла тангажа ее второй и третьей ступеней на участке сверхзвукового полета будут характеризоваться программами с постоянным углом  $\theta = \theta_x$ .

Это семейство программ достаточно полно реализует максимум дальности при заданном рассеивании точки включения ДУ последующей ступени, характеризуется простотой приборной реализации при построении кусочно-непрерывных траекторий.

Выбор семейств программ  $\{\mathcal{G}_n\}$  является в известной степени произвольным, однако, накладываемые на форму траектории требования (например, высота полета) несколько сужают этот «произвол» выбора программы угла тангажа, поэтому исходное семейство программ угла тангажа на участках полета ступеней КЛА уже оказывается определенным. Выбор семейств программ угла тангажа ограничивается классом непрерывных функций, она должна быть непрерывной для каждой ступени полета КЛА, а вид семейства  $\{\mathcal{G}_n\}$  определяется условием малых

углов атаки на участках выключения двигателей ступеней К $\Lambda A$  и в конце активного участка траектории (A Y T).

При выборе последовательности программ  $\{\mathcal{P}_n\}$  нет необходимости проводить доказательства существования у этой последовательности предельной кривой  $\mathcal{P}(t)$ , так как, область возможных вариаций программ угла тангажа с учетом требований, весьма ограничена. Исходное семейство программ  $\mathcal{P}_i(t,\lambda_j,...,\lambda_n)$  и оптимальная программа тангажа  $\mathcal{P}(t)$  лежат в этой узкой области. Поэтому и без математического доказательства представляется очевидным, что с увеличением числа параметров программы угла тангажа  $\lambda_n$  и при выборе их оптимальных значений из допустимой области непрерывных функций программа  $\mathcal{P}_n(t,\lambda_p,...,\lambda_n)$  будет приближаться к

Для выполнения равенства необходимо, чтобы функционал  $L(\mathcal{P}_n(t))$  был непрерывен в классе непрерывных функций для каждой ступени полета  $\mathcal{P}_n(t,\lambda_p,\ldots,\lambda_n)$ . Когда оптимизирующим функционалом является дальность полета ступени, непрерывность функции  $L[\mathcal{P}_n(t,\lambda_p,\ldots,\lambda_n)]$  очевидна. Для практики нет необходимости в строгом выполнении равенства, а достаточно выполнение этого условия с некоторой погрешностью  $\Delta L_n$ , соответствующей допустимой потере максимальной дальности:

$$L[\boldsymbol{\mathcal{G}}(t)] - L[\boldsymbol{\mathcal{G}}_n(t, \lambda_p, \dots \lambda_n)] \leq \Delta L_n. \tag{2}$$

Дальность полета ступени КЛА определяется параметрами движения центра масс КЛА в момент выключения двигателей ступени КЛА:

$$L = L(q_i). (3)$$

Параметры движения центра масс КЛА в момент выключения двигателей ступени команды  $q_i(i=1...6)$ , в свою очередь, определяются программой угла тангажа  $\mathcal{G}(t)$ :

$$q_i = q_i [\mathcal{G}(t)] (i = 1...6). \tag{4}$$

Следовательно, дальность полета ступени КЛА определяется программой угла тангажа  $g_{(t)}$ :

$$L = L/9(t). \tag{5}$$

Необходимое условие экстремума функционала имеет вид:

$$\delta L \ (q_i) = \sum_{i=1}^6 \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad \delta q_i = 0. \eqno(6)$$
 где  $\frac{\partial L}{\partial q_i}$  — баллистические производные дальности по кинематическим параметрам движения в момент выключения двигателей ступени КЛА;  $\delta q_i (i=1...6)$  — отклонения кинематических параметров движения КЛА, обусловленные вариацией программы угла тангажа  $\delta \theta(t)$ .

Программа угла тангажа  $\theta(t)$ , удовлетворяющая условию, реализует максимум дальности полета ступеней КЛА [4]. Определение этой



программы на участках сверхзвукового полета второй и третьей ступеней КЛА проводится при следующих допущениях:

- 1) влияние вращения Земли на параметры движения ступени КЛА на активном участке мало и им можно пренебречь;
  - 2) аэродинамические силы равны нулю;
- 3) поле силы притяжения на активном участке плоскопараллельное.

Первое допущение, очевидно, оказывает незначительное влияние на программу  $\mathcal{G}(t)$ , поскольку параметры движения на активном участке слабо зависят от того, учтено или не учтено вращение Земли в уравнениях. К тому же влияние вращения Земли на вид программы  $\mathcal{G}(t)$  при изменении дальности стрельбы и географических условий пуска КЛА (широты точки старта и азимута стрельбы) учитывается посредством соответствующего изменения производных на конец работы двигательных установок ступеней КЛА.

Второе допущение не накладывает существенные ограничения. У КЛА полет второй и третьей ступеней на активном участке лежит в разреженных слоях атмосферы, и на этой части траектория полета ступени близка к оптимальной.

Третье допущение достаточно хорошо выполняется, когда перепад высот полета ступени составляет 20-40 км, что имеет место при построении пространственно-временных схем полета КЛА, а угловая дальность в момент включения ДУ ступеней КЛА не превышает нескольких градусов. Условие постоянства ускорения силы притяжения в этом случае выполняется с погрешностью в 2-3%, а условие плоскопараллельности поля силы притяжения – с погрешностью в 1-2%.

Ошибки в определении программы угла тангажа за счет этих погрешностей могут быть уменьшены, если ускорение силы притяжения при расчете активного участка полета ступени принять равным его среднему значению на этом участке, а уравнение движения записать в системе координат *O'x'y'*, начало которой *O'* расположено на поверхности Земли.

Следует отметить, что величина временной паузы  $t_{\mathit{мрi}}$  определяет оптимальный угол тангажа последующей ступени полета [5]. Изменение величины паузы приводит к изменению оптимального угла тангажа последующей ступени. Получим зависимость величины  $t_{\mathit{мpi}} = f(\mathcal{G}_i(t))$  временной паузы от оптимального значения угла тангажа.

Рассмотрим математическую модель движения ступени под действием силы тяги и силы

притяжения в однородном гравитационном поле на участке временной паузы в земной системе координат. Интегрируя их на момент  $t_{\rm k}$  получим полную дальность полета ступени.

Необходимое условие экстремума будет рав-

С использованием вариаций кинематических параметров полета ступени в момент выключения ступени  $t_x$ :

$$\delta L = -\left[\left(\frac{\partial L}{\partial x}\right)_{\hat{e}}(t_{\hat{e}} - t) + \left(\frac{\partial L}{\partial V_x}\right)_{\hat{e}}\right] \sin \vartheta(t) + \left[\left(\frac{\partial L}{\partial y}\right)_{\hat{e}}(t_{\hat{e}} - t) + \left(\frac{\partial L}{\partial V_y}\right)_{\hat{e}}\right] \cos \vartheta(t) = 0,$$

где t – текущее время полета ступени.

Тогда оптимальный угол тангажа для ступени на момент конца временной паузы  $\tau_{_{Mp}}$  момент включения последующих ступеней КЛА  $t_{_k}$  с учетом  $t=t_{_{\rm K}}+\tau_{_{Mp}}$  будет равен:

$$tg \, \vartheta^*(t) = \frac{-\left(\frac{\partial L}{\partial y}\right)_{\kappa} \tau_{Mp} + \left(\frac{\partial L}{\partial V_{y}}\right)_{\kappa}}{-\left(\frac{\partial L}{\partial x}\right)_{\kappa} \tau_{Mp} + \left(\frac{\partial L}{\partial V_{x}}\right)_{\kappa}}.$$
 (8)

Таким образом, последовательность выбора оптимальных программ угла тангажа ступеней КЛА с учетом временных пауз между работой их ДУ состоит в следующем:

- первая ступень использует программу угла тангажа траектории максимальной дальность стрельбы;
- на последующих ступенях полета КЛА оптимальное значение угла тангажа на момент включения последующей ступени определяется по зависимости (8).

#### Литература

- 1. Беневольский С.В. Решение краевых и оптимизационных задач баллистического проектирования на основе визуализации сеточных функций // Вестник МАИ, 2009. Т.16. № 3. С.90-100.
- 2. Аппазов Р.Ф. Сытин О.Г. Методы проектирования траекторий носителей и спутников Земли. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 440 с.
- 3. Сихарулидзе Ю.Г. Баллистика и наведение летательных аппаратов. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2011.326 с.
- 4. Патент RU105882 на полезную модель «Устройство для управления беспилотным летательным аппаратом», МПК B64C19/00, F42B10/00, приоритет 27.01.2011г., авторы: Алаторцев А.И., Алаторцев И.И., патентообладатель: МОУ «Институт инженерной физики».
- 5. Алаторцев А.И., Смирнов Д.В. Метод кусочно-непрерывного управления космическим летательным аппаратом с двигателем твердого топлива на активном участке траектории. // International Journal of Applied Engineering Research (ISSN09734562-India-Scopus №19 (2015). С. 13-26.



УДК 621.394

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ
НАДЕЖНОСТИ РАДИОКАНАЛОВ
ПО ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИ
НАЛИЧИИ ЗАМИРАНИЙ СИГНАЛА

STATISTICAL ANALYSIS AND METHODS
FOR EVALUATING THE RELIABILITY OF
RADIO CHANNELS FOR NOISE IMMUNITY
IN THE PRESENCE OF SIGNAL FADING

#### Владимир Владимирович Зеленевский

почетный работник науки и техники РФ доктор технических наук, профессор профессор кафедры филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов) Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17 Тел.: 8 (905) 548-48-54 E-mail: Zelenevsky.Vladimir@gmail.com

#### Анатолий Владимирович Зеленевский

кандидат технических наук заместитель начальника отдела ЗАО «Фирма НТЦ «КАМИ» Адрес: 119361, Москва, ул. Большая Очаковская, д. 47а, стр. 1 Тел.: 8 (926) 150-83-76

Аннотация

В статье проведен статистический анализ моделей, описывающих радиоканалы с замираниями сигнала – модель гамма распределения, модель распределения Накагами, модель распределения Релея и Райса, логарифмического нормального распределения с учетом интерференционных, неселективных и медленных замираний. Получены численные оценки показателей надежности по помехоустойчивости, установлено противоречие между требованиями по надежности и помехоустойчивости радиоканала с замираниями сигнала.

**Ключевые слова:** ионосферная волна, интерференция лучей, надежность радиоканала по помехоустойчивости, замирания, статистические модели, плотность распределения амплитуд, отношение сигнал/шум, быстрые и медленные замирания, вероятность битовой ошибки.

#### **Summary**

The article presents a statistical analysis of models describing a radio channel with signal fading – the gamma distribution model, the Nakagami distribution model, the Reley and Rice distribution model, and the logarithmic normal distribution with interference, non-selective, and slow fading. Numerical estimates of reliability indicators for noise immunity were obtained, and a contradiction was found between the requirements for reliability and noise immunity of a radio channel with signal fading.

**Keywords:** ionospheres wave, ray interference, radio channel reliability for noise immunity, fading, statistical models, amplitude distribution density, signal-to-noise ratio, fast and slow fading, bit error probability.

Известно [1, 2], что передающая антенна радиостанций декаметрового (ДКМ) диапазона излучает электромагнитные волны в пределах достаточно широкого луча, поэтому на ионосферу падает не один луч, а как бы пучок подлучей. Подлучи отражаются при различной глубине проникновения в ионизированные слои ионос-

феры и достигают поверхности земли в различных точках. Таким образом на приемную антенну попадает множество лучей электромагнитных волн, относящихся к различным пучкам. Интерференция этих лучей в условиях непрерывного изменениях фаз приводит к явлению замирания сигнала.



филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов) Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17 Тел.: +7 (915) 181-35-17

#### Максим Сергеевич Черноусов

адъюнкт филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов) Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17 Тел.: +7 (920) 093-65-12 E-mail: chernousovm@mail.ru

# Борис Михайлович Наконечный

кандидат технических наук директор Департамент формирования государственного оборонного заказа Правительство Российской Федерации



Согласно экспериментальным данным [2], на трассах протяженностью 1000-2000 км замирания определяются чаще всего интерференцией соизмеримых по мощности лучей, а на трассах протяженностью 2000-3000 км чаще всего преобладает один луч, а замирания вызываются неоднородностью отражающего слоя ионосферы и интерференцией магнитоионных компонентов электромагнитного поля. Таким образом, физические причины, вызывающие замирания на трассах разной протяженности, также различны. При этом, математические модели, описывающие флуктуации уровня сигнала (напряженность электрического поля) в точке приема, будут отличаться друг от друга.

Наиболее общей моделью радиосигнала  $U_{_{c}}\!(t)$  в ДКМ канале передачи данных является

$$U_c(t) = U_c \cos(\omega_c t - \theta_c) + \sum_{k=1}^{n} U_k \cos(\omega_k t - \theta_k), \quad (1)$$

где  $U_c$ ,  $\omega_c$  и  $\theta_c$  – амплитуда, частота и фаза составляющих сигнала с постоянными параметрами (стационарная составляющая);

 $U_k$ ,  $w_k$ ,  $\theta_k$  – амплитуда, частота и фаза составляющих со случайными параметрами (флуктуирующая составляющая);

n – число составляющих со случайными параметрами.

Исходя из этого, сигнал  $U_c(t)$  можно представить в виде квазигармонического колебания, амплитуда U(t) и фаза  $\theta(t)$  которого изменяются случайно

$$U_c(t) = U(t)\cos[\omega_0 t + \theta(t)]. \tag{2}$$

Для анализа статистических характеристик приема сигнала с замираниями нужно знать распределение вероятностей случайных величин U(t) и  $\theta(t)$ .

Стремление как можно точнее описать физические процессы, происходящие в сфере распространения радиоволн, привели к созданию различных статистических моделей [1,4].

#### Модель в виде гамма-распределения

Такая вероятностная модель обеспечивает наиболее точное описание функций напряжения полезного сигнала на входе радиоприемника на трассах протяженностью 2,5-3 тыс. км. Плотность распределения вероятностей амплитуды сигнала для такой модели описывается выражением [1]:

$$w(U) = \lambda^{\eta} U^{\eta - 1} \frac{e^{-\lambda U}}{\Gamma(\eta)},\tag{3}$$

где  $\lambda > 0$ ,  $\eta > 0$  – параметры распределения, равные:  $\eta = 2$  соответствует быстрым интерференционным замираниям (рэлеевским замираниям);  $\lambda = \frac{2\sigma_c^2}{U_c^2}$ ,  $\sigma_c^2$  – дисперсия флуктуирующей составляющей сигнала;

 $\Gamma(\eta) = (\eta - 1)! -$ гамма-функция.

Для гамма-модели вероятность существования ДКМ радиоканала (надежность радиоканала) будет равна

$$P(U_{min}) = \int_{U_{min}}^{\infty} \lambda^{\eta} U^{\eta - 1} \frac{e^{-\lambda U}}{(\eta - 1)!} dU \quad (4)$$

Численные расчеты  $P(U_{\min})$  в зависимости от параметров распределения  $\lambda,\eta$  представлены в maблице~1.

**Таблица 1** Зависимость  $P(U_{min}) = f(\lambda, \eta, U_{min})$ 

P(Umin)	0,8	0,85	0,9	0,95	0,99
$\lambda = 1; \eta = 1$	0,8189	0,6782	0,5307	0,3537	0,1472
λ =2; η =2	0,4068	0,3419	0,2652	0,1767	0,1472
$\lambda = 0.5; \eta = 2$	1,6458	1,363	1,056	0,71	0,2947
$\lambda = 0.5; \eta = 5$	6,186	5,57	4,862	3,94	2,565

Анализ таблицы показывает:

- при  $\eta = 2$  (рэлеевские замирания) значение  $U_{\min}$ , которые обеспечивают  $P(U_{\min}) \ge 0.9$ , находятся в диапазоне  $U_{\min} = 1,056$  (для  $\lambda = 0.5$ ) до  $U_{\min} = 0.1472$  (для  $\lambda = 2$ );
- ullet при  $P(U_{min})$  = const,  $\eta$  = 2 = const с уменьшением параметра  $\lambda$  значение  $U_{min}$  увеличивается;
- при увеличении параметра  $\eta(\eta=5)$  и  $\lambda=const$ , значения  $U_{\min}$ , обеспечивающие  $P(U_{\min})=const$ , увеличиваются.

Так как при малых значениях  $U_{\min}$  будет соответствующим и минимальное соотношение сигнал/шум  $h^2_{\min}$ , то вероятность битовой ошибки системы передачи будет высокой, а помехоустойчивость низкой.

#### Модель в виде распределения Накагами

В ряде случаев (на интервале локальной стационарности) распределение амплитуд сигналов при интерференционных замираниях описывает закон Накагами [1]:

сывает закон Накагами [1]: 
$$w(U) = \frac{2m^m U^{2m-1}}{\Gamma(m)\sigma^{2m}} \exp\left(-\frac{mU^2}{\sigma^2}\right), \tag{5}$$

где  $m = \frac{\sigma^4}{(\overline{U^2} - \sigma^2)^2} \ge 0,5, \, \sigma = \sqrt{\overline{U^2}}$  – среднее значение квадрата действующего (медианного) значения напряжения на входе приемника.

При m=0,5 получаем усеченное (правая сторона) нормальное распределение, при m=1 – рэлеевское, а при m>1 распределение Накагами хорошо аппроксимирует распределение Райса, для которого [1]

$$w(U) = \frac{U}{\sigma_c^2} e^{-\left(\frac{U_c^2}{2\sigma_c^2} + \frac{U^2}{2\sigma_c^2}\right)} I_0\left(\sqrt{\frac{U_c^2 \cdot U}{\sigma_c^2 \cdot \sigma_c}}\right), \quad (6)$$

где  $I_0(*)$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Для распределения Райса по выражению



$$P(U_{min}) = 2 \int_{U_{min}}^{\infty} U e^{-(U^2 + h_0^2)} I_0\left(\sqrt{4h_0^2 U}\right) dU,$$
 (7)

где  $U^2/2\sigma^2_{\ c} = h^2_{\ 0}$  – рассчитаны значения надежности  $P(U_{\min})$ , представленные в mаблице~2.

Таблица 2 Значения  $P(U) = f(h^2 \cdot U)$ 

L2 0.1	P(U <sub>min</sub> )	0,8	0,85	0,9	0,95
$h_0^2 = 0,1$	U <sub>min</sub>	0,47	0,3999	0,31623	0,20324
h2 2	P(U <sub>min</sub> )	0,4	0,45	0,5	0,5524
$h^2_0 = 2$	U <sub>min</sub>	0,824	0,69	0,5224	0,20137

Анализ таблицы 2 показывает, что при увеличении отношения

 $h_0^2 = \frac{U_{\rm c}^2}{2\sigma_{\rm c}^2}$  значение  $U_{\rm min}$  увеличивается, следовательно, увеличивается и достоверность принятия данных (уменьшается вероятность битовой ошибки).

Анализ выражений (3-7), а также полученных по ним расчетным данным показывает наличие неопределенности по параметрам распределения. Например, в выражении (4) невозможно однозначно указать какие значения выбрать для  $\lambda u \eta$  в реальном канале.

То же самое относится к выражениям (5) и (7), где изменив соответствующие параметры можно получить совершенно разные результаты. Другими словами, желание иметь общие выражения для w(U) приводит к размытости статистических характеристик ДКМ радиоканала и требуется декомпозиция характеристик ДКМ радиоканала для решения задачи по определению  $P(U_{min})$ и помехоустойчивости (вероятности  $P_{\scriptscriptstyle b}$ ).

#### Быстрые (интерференционные) замирания

Известно [2], что быстрые колебания уровня напряженности электрического поля (E) в точке приема радиосигналов декаметрового диапазона и тропосферных радиолиний, т.е. замирания сигнала в собственном смысле этого слова, подчиняются распределению Рэлея.

Теоретические исследования показывают, что такому распределению подчиняется результирующая амплитуда радиосигнала, являющаяся следствием интерференции п≥4 синусоидальных колебаний произвольных амплитуд и случайных фаз [2,3]. Плотность распределения действующих значений  $E_{_{I\!\!I}}$ в этом случае выражается формулой [2]  $w(E_{\rm d}) = \frac{2E_{\rm d}}{(E_{\rm d}^2)} e^{-\frac{E_{\rm d}^2}{(E_{\rm d}^2)}},$ 

(8)

где  $(E_{\pi}^{2})$  – среднее значение квадрата действующего значения напряженности электрического

поля за время наблюдений T, которое обычно выбирают 5-15 минут.

В терминах теории вероятностей  $(E_{\pi}^2)$  представляет собой момент второго порядка величины  $E_{\underline{J}}^{2}$  (дисперсия  $E_{\underline{J}}^{2}$ ).

В этом случае вероятность того, что уровень принимаемого сигнала будет превышать некоторое минимальное значение  $E_{\min}$ , определяет надежность радиоканала по помехоустойчивости (коэффициент исправного действия) и равна:

рэффициент исправного действия) и равна.
$$P(E_{min}) = \frac{2}{\overline{(E_{\mu}^2)}} \int_{E_{min}}^{\infty} E_{\mu} e^{-\frac{E_{\mu}^2}{(E_{\mu}^2)}} dE_{\mu} = e^{-\frac{E_{\mu}^2}{(E_{\mu}^2)}}. \tag{9}$$

Так как значение амплитуды  $E_{\mbox{\scriptsize min}}$  определяет минимальное напряжение сигнала на входе радиоприемника

 $U_{\it min} \! = \! E_{\it min} h_{\mathcal{A}},$ где  $h_{\mathcal{A}} \! - \!$  действующая высота приемной антенны, то справедлива запись для минимального отношения сигнал/шум в виде

 $h_{min}^2 = \frac{U_{min}^2}{2\sigma^2},$ 

где  $\sigma^2 = \overline{(E_{\pi}^2)}$ .

С учетом того, что  $h^2_{\scriptscriptstyle min}$  определяет вероятность битовой ошибки  $(P_b)$  на выходе радиоприемника (т.е. помехоустойчивость радиоприемника), надежность радиоканала с рэлеевскими замираниями по помехоустойчивости запишем в виде выражения

$$P(h_{min}^2) = e^{-\frac{U_{min}^2}{2\sigma^2}} = e^{-h_{min}^2}$$
 при  $P_b = f(h_{min}^2) = const.$  (10)

Если используется сигнал с двоичной относительной фазовой модуляцией, то вероятность  $P_{h}$ равна [3,4]

$$P_b = e^{-h_{min}^2} \left( 1 - \frac{1}{2} e^{-h_{min}^2} \right), \tag{11}$$

а зависимости  $P(h_{\scriptscriptstyle min}^2)$  от  $U_{\scriptscriptstyle min}$ ,  $P_{\scriptscriptstyle b}$  представлены в таблице 3.

Таблица 3

Зависимость  $P(h_{min}^2)$  от  $U_{min}$ ,  $P_{h}$ 

			111111 0	
P(h <sup>2</sup> <sub>min</sub> )	0,8	0,85	0,9	0,95
U <sub>min</sub>	0,667	0,57	0,457	0,322
h <sup>2</sup> <sub>min</sub>	0,445	0,325	0,209	0,104
P <sub>b</sub>	0,435	0,46	0,482	0,495

Анализ таблицы 3 показывает:

- для увеличения надежности рэлеевского канала по помехоустойчивости  $P(h^2_{\it min})$  необходимо уменьшить значение  $U_{\min}$  и соответсвенно  $h^2_{\min}$ ;
- $\bullet$  с увеличением надежности  $P(h_{min}^2)$  увеличивается вероятность  $P_{h}$  (т.е. снижается помехоустойчивость);
- ullet требования по выбору значений  $U_{\scriptscriptstyle min}$  и  $h^2_{\scriptscriptstyle min}$ противоречивы – с одной стороны, для увеличения  $\mathrm{P}(h^2_{_{min}})$  необходимо уменьшить  $U_{_{min}}$  (или  $h^2_{\scriptscriptstyle min}$ ), но в этом случае уменьшается помехоустойчивость радиоканала (увеличивается  $P_{\nu}$ ), с



другой стороны, увеличение  $U_{\min}$  (или  $h^2_{\min}$ ) увеличивает помехоустойчивость рэлеевского радиоканала (снижает  $P_b$ ), но снижает его надежность  $P(h_{min}^2)$ .

Таким образом, для разрешения указанного противоречия необходимо искать методы обработки радиосигналов в радиоприемниках, которые позволили бы обеспечивать заданную помехоустойчивость радиоканала  $P_h$  при  $h^2_{min} < 1$ , т.е. реализовать теоретический предел К.Шеннона по помехоустойчивости.

#### Неселективные замирания

Для неселективных замираний выражение для надежности радиоканала по помехоустойчивости будет иметь вид [4]

$$P(U_{min}) = \int\limits_{0}^{\infty} \frac{U}{2h_0^2} e^{-\frac{U^2}{4h_0^2}} dU$$
 при  $P_b = f(h_0^2, U_{min}) = const.$  (12)

При отношении сигнал/шум на бит на входе первой решающей схемы (демодулятора сигнала с ОФМ) радиоприемника  $h^2_0 = 10$  получены следующие результаты (таблица 4).

Таблица 4 Зависимость  $P = f(U_{min})$  при  $h^2_0 = 10$ 

- min · U					
P=(U <sub>min</sub> )	0,5	0,8	0,85	0,9	0,95
U <sub>min</sub>	5,27	2,97	2,55	2,046	1,44
$h_{min}^2 = \frac{U_{min}^2}{2\sigma^2}$	13,9	4,41	3,251	2,09	1,037
$P_{b}$	9,54	1,214	3,84	0,116	0,29

Анализ таблицы 4 показывает:

- неселективные замирания менее опасны по сравнению с рэлеевскими (при заданном значении надежности радиоканала P=( $U_{min}$ )=0,9 вероятность битовой ошибки  $P_b$ =0,116, что при использовании корректирующих кодов вполне приемлемо);
- существует квазиоптимальный вариант  $P_b$ =1,21·10<sup>-2</sup> при P=( $U_{min}$ )=0,8, что можно использовать на практике.

#### Медленные замирания

Известно [2, 3], что медленные замирания радиосигнала характеризуются логарифмическим нормальным законом распределения вероятностей амплитуд.

Для такого распределения вероятностей амплитуд в канале надежность радиоканала по помехоустойчивости определяется выражением [2]:

$$\begin{split} P(U_{min}) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta} \int\limits_{U_{min}}^{\infty} e^{-\frac{U-\alpha}{2\beta^2}} dU \text{ при } P_b = f(U_{min},\alpha,\beta) = const, \ (13) \end{split}$$
 где  $\alpha = U_{ME/l}, \Delta B;$ 

 $\beta$ =8 дБ для декаметровых радиоканалов;  $\beta$ =12 для тропосферных радиоканалов [2].

Для декаметровых радиоканалов значение

$$U_{\text{MEA}} = E_{\text{MEA}} h_{\text{A}}$$

$$U_{\text{мед}} = \frac{173\sqrt{P_{1}G_{1}}}{r_{\text{B}}} h_{\text{A}} F_{\text{мед}}, \frac{\text{MB}}{\text{M}}$$
 (14)

где  $P_{i}$  – мощность радиопередатчика, кВт;  $G_{\scriptscriptstyle I}$  – коэффициент усиления передающей антен-

 $r_{\scriptscriptstyle R}$  – путь, который проходит ионосферная волна, равный

 $r_{\rm g} = \left(\sqrt{r^2 + 4h_{\rm u}^2}\right)\!n_{\rm u}$ , км r – дальность радиосвязи по земной поверхности.

 $h_{\mu}$  – высота слоя ионосферы, от которого отражается ионосферная волна,

односкачковой волны  $n_{\mu} = 1$ ),

 $h_{\scriptscriptstyle J}$  – действующая высота антенны, для магнитных рамочных приемных антенн, используемых в декаметровых радиоканалах

$$h_{\rm g} = \frac{2\pi}{\lambda} n S \mu_{\rm sp},\tag{15}$$

 $\lambda$  – длина волны, м;

n – число рамок в антенне;

S – площадь рамки, м $^2$ ;

 $\mu_{\scriptscriptstyle \partial \phi}$  – эффективная магнитная проницаемость материала сердечника антенны;

 $F_{_{MEJ}}$  – медианное значение множителя ослабления напряженности электрического поля, равное  $F_{\text{мед}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1+R}{2} \right) R^{n_{\text{u}}-1} e^{-\sum_{i=1}^{n_{\text{u}}} \Gamma_i}, \tag{16}$ 

R – модуль коэффициента отражения ионосферной волны от поверхности Земли ( $R \approx 0.8$ );

 $\Gamma_{i}$  – коэффициент поглощения энергии волны в  $\emph{i}$ -й вершине слоя ионосферы, равный

$$\Gamma_i = \Gamma_D + \Gamma_E + \Gamma_{E_1} + \Gamma_{E_2}$$

 $\Gamma_i \! = \! \Gamma_{\!_D} \! + \! \Gamma_E \! + \! \Gamma_{FI} \! + \! \Gamma_{F2},$   $\Gamma_{\!_D}, \Gamma_{\!_E}, \Gamma_{\!_{FI}}, \Gamma_{\!_{F2}} \! -$ коэффициенты, которые учитывают двукратное поглощение (т.е. двукратное прохождение) волны в слоях D,E,F1,F2 ионосферы [2].

Результаты расчетов значений  $P(U_{\min})$ ,  $U_{\min}$ ,  $h_{min}^2$  и  $P_b$  представлены в таблице 5.

Таблица 5 Зависимости  $P(U_{-}), U_{-}, h^2_{-}, P_{-}$  при  $\beta$ =8 дБ

min' min' b. P. P. A.					
$U_{min}$	4,63	3,87	3,15	2,3	
$h^2_{min}$	10,718	7,49	4,96	2,65	
$P(U_{min})$	0,8	0,85	0,9	0,95	
$P_{b}$	2,17·10-5	5,54·10 <sup>-4</sup>	7,03·10-3	6,75·10 <sup>-2</sup>	

Анализ *таблицы 5* показывает:

• медленные замирания по сравнению с неселективными замираниями характеризуются возможностью обеспечить приемлемые значения как  $P(U_{min})$ , так и  $P_{b}$ , например, при  $P(U_{min}) = 0.85$  значение  $P_b = 5.54 \cdot 10^{-4}$ ;



• при медленных замираниях радиосигнала значения  $U_{\mathit{min}}$  больше, чем при неселективных, что позволяет уменьшить вероятность ложного приема сигнала.

Для оценки вероятности  $P(h_{min}^2)$  в трудах Л.М.Финка [3] радиоканал с логарифмически нормальным распределением описывается выражением

ражением
$$P(h_{min}^2) = 0.5(1 + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_{0}^{\frac{\ln h_0^2 + 2 \ln F_{Meq} - \ln h_{min}^2}{2b}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt) , \qquad (17)$$

где  $h_{\ 0}^2$  – отношение сигнал/шум, определяемое

Таблица 6 Зависимости  $P(h_{min}^2)$  от  $h_0^2 F_{MER}^2 b$ 

min' 0, MELT					
$h_{0}^{2}$	10³	10 <sup>4</sup>	10⁵		
D/h2	$F_{MEJ} = 10^{-2}; h_0^2 = 0.7; b = 1.0$				
P(h <sup>2</sup> <sub>min</sub> )	0,165	0,57	0,9		
D/h2 )	$F_{MEQ} = 0.1; h^2_{0} = 0.7; b = 2$				
P(h <sup>2</sup> <sub>min</sub> )	0,747	0,8927	0,98654		
D/h2	$F_{MEQ} = 0.05; h_0^2 = 3; b = 2$				
P(h <sup>2</sup> <sub>min</sub> )	0,48	0,702	0,8657		

Анализ таблицы 6 показывает, что увеличить надежность радиоканала  $P(h_{min}^2)$  можно двумя

- ullet увеличивать  $h^2_{\ \theta}$  за счет мощности радиопередатчика или уменьшения скорости передачи
- ullet уменьшения  $h^2_{\scriptscriptstyle min}$ , однако, в этом случае помехоустойчивость приема данных уменьшается (вероятность  $P_{b}$  увеличивается).

Таким образом, анализ приведённых выкладок и расчетов определяет актуальность научной задачи - требуется одновременно обеспечить достаточные значения вероятности  $P(h_{min}) \ge 0.8$  и помехоустойчивости  $P(h_{min}^2) \le 10^{-3}$ , которые противоречивы по отношению  $h_{min}^2$ .

Для тропосферных радиоканалов [2]

$$U_{\text{мед}} = \frac{173\sqrt{P_1G_1}}{r}e^{-\delta l}h_{\text{д}}, \frac{\text{MB}}{\text{M}}$$
 (18)

где  $P_{_{I}}$  – мощность радиопередатчика, кВт;  $G_{1}$  – коэффициент усиления передающей антенны; r – путь, который проходит волна в тропосфере,

 $\delta$  – коэффициент поглощения энергии волны на 1 км пути r;

l – пройденное волной расстояние в поглощающей области тропосферы, км;

 $h_{_{\it I}}$  – действующая высота антенны, м.

Если используется эффективная площадь приемной антенны  $S_{9\phi}$ , то выражение для  $U_{\text{\tiny MEA}}$ будет иметь вид

$$U_{ exttt{med}} = \sqrt{P_{ exttt{BX}} R_{ exttt{BX}}}$$
 ,

где  $P_{{\scriptscriptstyle BX}}$  – мощность входного сигнала на входном сопротивлении ( $R_{{\it BX}}$ ) радиоприемника

$$P_{\text{вх}} = \frac{(173)^2 P_1 G_1}{120\pi r^2} e^{-2\delta l} S_{3\phi}$$
, мкВт.

#### Выводы

- 1. Для рэлеевского радиоканала существующие средства декаметровой связи не могут обеспечить одновременное выполнение реальных требований по помехоустойчивости (вероятность Р₁≤10-3) и надежности (коэффициент исправного действия,  $P(h_{min}^2) \ge 0.8$ ), так как известные радиоприемники не могут обеспечить требуемое значение  $P_{b} \le 10^{-3}$  при  $h^{2}_{0} \le 1$ .
- 2. Требуется искать технические решения (новые принципы построения радиоприемников), которые способны обеспечивать  $P_b \le 10^{-3}$ при  $h_0^2 \le 1$ . Теоретические возможности такого радиоприема впервые определены в известных работах [5] и при этом не требуется дополнительное расширение полосы рабочих частот.
- 3. Для радиоканалов с неселективными замираниями задача обеспечения заданных требований  $P_{_b}$  и  $P(h^2_{_{min}})$  упрощается по сравнению с рэлеевским каналом ( $P(h_{\min}) \ge 0.85$  обеспечивается при  $h_{\min}^2 = 2...3$ , что соответствует  $P_b \le 0.116$ и при использовании известных помехоустойчивых кодов на выходе корректирующего декодера можно легко получить вероятность  $P_{b} \le 10^{-3}$ ).
- 4. В радиоканалах с медленными замираниями (логарифмически нормальное распределение) задача одновременного выполнения требований по  $P_b$  и  $P(h^2_{\min})$  решается наиболее просто, так как при  $P(h^2_{\min}){\ge}0.85$  вероятность  $P_b$  может лежать в пределах  $5,54\cdot10^{-4}-6,75\cdot10^{-2}$ .

#### Литература

- 1. Головин О.В. Декаметровая радиосвязь. М.: Радио и связь, 1990. 240 с.
- 2. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.: Связь, 1965. 400 с.
- 3. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. М.: Сов. радио, 1972. 720 с.
- 4. Кловский Д.Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. М.: Радио и связь. 1982. 304 с.
- 5. Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Зеленевский А.В., Дурнов А.С. Статистические характеристики систем передачи с кодовым ортогональным уплотнением данных при воздействии гауссова шума // Электросвязь, 2018. №7. C.42-45.



#### Владимир Владимирович Зеленевский

почетный работник науки и техники РФ доктор технических наук, профессор профессор кафедры филиал ВА РВСН им. Петра **В**еликого (г. Серпухов) Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17 Тел.: 8 (905) 548-48-54

# Анатолий Владимирович Зеленевский

E-mail: Zelenevsky.Vladimir@gmail.com

кандидат технических наук заместитель начальника отдела ЗАО «Фирма НТЦ «КАМИ» Адрес: 119361, Москва,

ул. Большая Очаковская, д. 47а, стр. 1

Тел.: 8 (926) 150-83-76

#### УДК 621.394

**ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТЬ** КОДИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С РАСШИРЕННЫМ СПЕКТРОМ **РАДИОСИГНАЛА** 

**NOISE IMMUNITY OF ENCODED DATA TRANSMISSION SYSTEMS** WITH AN EXTENDED RADIO SIGNAL SPECTRUM

#### Евгений Владимирович Шмырин

кандидат технических наук научный сотрудник МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: +7 (4967) 35-31-93

#### Максим Сергеевич Черноусов

адъюнкт

филиал ВА РВСН имени Петра Великого (г. Серпухов) Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17 Тел.: +7 (920) 093-65-12 E-mail: chernousovm@mail.ru

#### Аннотация

В статье решена задача обеспечения гарантированной помехозащищенности систем передачи данных с расширенным спектром радиосигнала. Показано, что существуют близкие к оптимальным параметры двоичного и недвоичного корректирующего кодирования данных, которые вносят наибольший вклад в повышение помехозащищенности.

**Ключевые слова:** база сигнала, основание кода, информационный и расширяющий модуляторы, битовая ошибка, отношение сигнал/шум, обобщенный показатель помехозащищенности.

#### Summary

The article solves the problem of ensuring guaranteed noise immunity of data transmission systems with an expanded spectrum of the radio signal. It is shown that there exist close to optimal parameters of binary and non-binary corrective data coding, which make the greatest contribution to increasing noise immunity.

Keywords: signal base, code base, information and spreading modulators, bit error, signal-to-noise ratio, generalized noise immunity indicator.

Решение задачи приема сигналов с расширенным спектром на фоне мощных сосредоточенных по спектру (узкополосных) помех и аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) имеет широкое практическое применение. Например, известные системы забрасываемых передатчиков помех, находясь на небольших расстояниях от радиоприемных устройств, создают превышение мощности помехи  $P_{\pi}$  на входе приемника над мощностью полезного сигнала  $P_s$  больше, чем база сигнала B с расширенным спектром [1,3]. В этом случае сигнал с расширенным спектром не может обеспечить гарантированную помехоустойчивость и требуются дополнительные способы помехозащиты. Одним из таких способов является помехоустойчивое (корректирующее) кодирование данных. Однако, применение корректирующего кодирования при фиксированном времени передачи сообщения (T=const) вызывает дополнительное расширение спектра передаваемого сигнала. Если полоса пропускания канала передачи данных  $\Delta F_{\Pi}$  фиксирована ( $\Delta F_{\Pi}$ =const), то при корректирующем кодировании приходиться уменьшать базу сигнала или уменьшать скорость передачи данных источником [5].



Очевидно научное противоречие – с одной стороны, корректирующее кодирование повышает помехоустойчивость канала передачи в условиях воздействия опасных преднамеренных помех, а с другой стороны уменьшается база сигнала с расширенным спектром и уменьшается помехозащищенность (помехоустойчивость и энергетическая скрытность) канала передачи.

Исследуем систему передачи данных (рисунок I), в которой, помимо расширения спектра сигнала, используется корректирующее кодирование данных. В этом случае будет обеспечиваться гарантированная помехозащищенность СПД не только в условиях в условиях преднамеренных (импульсных, узкополосных гармонических) помех, но и помех типа АБГШ.

На рисунке 1 обозначены:

- КК корректирующий (канальный) кодер, на вход которого поступают двоичные символы (данные);
- ИМ информационный модулятор, реализующий относительную фазовую манипуляцию несущей с частотой  $w_o$ ;
- $\bullet$  РМ расширяющий модулятор, реализующий псевдослучайное изменение фазы несущей на длительности входного сигнала  $T_{\varsigma}$ ;
- ГПСП генератор псевдослучайной последовательности, формирующий сигнал расширяющей функции с базой B, равной

$$B = \frac{T_s}{t_u} \gg 1 \,,$$

 $t_{H}$  где  $t_{H}$  – длительность импульса ПСП, период которой равен B;

- n(t) аддитивная помеха, которая совместно с полезным сигналом s(t) создает на входе сужающего демодулятора (СДМ) отношение сигнал/ помеха+шум  $h^2_0$ <<1;
- $\bullet\,h^2_{\ b}$  отношение спектральной плотности мощности полезного сигнала  $E_{_s}$  к суммарной спектральной плотности шума и усредненной помехи на длительности бита сигнала  $T_s;$
- $\bullet$  ИДМ информационный демодулятор, на выходе которого формируются двоичные символы с вероятностью  $P_{\scriptscriptstyle 0}$ ;

 $\bullet$  ДК — канальный декодер, на выходе которого формируются информационные биты сообщения (данные) с вероятностью  $P_b$ .

#### Постановка задачи

Задан тип преднамеренной помехи – стационарная помеха в виде заградительной (широкополосной), сосредоточенная по полосе (помеха в части полосы частот спектра полезного сигнала), псевдошумовая и гармоническая (узкополосная) помеха; импульсная помеха.

Для обработки сигнала выбран когерентный приемник, реализующий синхронизацию сигнала по фазе и синхронизацию (поиск) ПСП по времени.

Известен суммарный сигнал  $s^*(t)$  на выходе СДМ приемника в условиях воздействия помехи n(t):

$$s^*(t) = \sqrt{2P_s} \, d(t) P(t) \cos(\omega_0 t + \theta_1) + n(t)$$
, где  $P_s$  – мощность полезного сигнала;

 $n(t) \! = \! n_{_{I\!I\!I}}\!(t) \! + \! j(t),$ – собственные шумы приемні

где  $n_{{\rm III}}(t)$  – собственные шумы приемника, которые при фиксированной полосе пропускания приемника аппроксимируются гауссовским случайным процессом со средним значением, равным нулю, и дисперсией  $\sigma_o^2$ ;

P(t) — множитель, характеризующий распределение энергии преднамеренной помехи j(t) в пределах расширенной полосы полезного сигнала и степень снижения спектральной плотности мощности преднамеренной помехи на выходе СДМ;

d(t) – прямоугольная форма двоичной информационной последовательности;

 $\theta_{\scriptscriptstyle I}$  – фаза сигнала.

Известно выражение для определения вероятности  $P_{\theta}$  в условиях воздействия АБГШ [1]

$$P_0 = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{h_b^2}{\sqrt{2}} \right),$$

где  $erfc(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{x}^{\infty} \exp{(-t^2)} \, dt$  – дополнительный интеграл ошибок.

Известно выражение для вероятности  $P_{\theta}$  в условиях воздействия стационарной помехи [1]

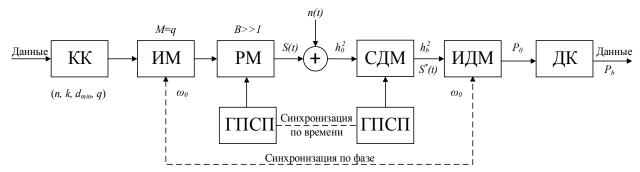


Рис. 1. Структурная схема кодированной СПД с расширенным спектром сигнала

$$P_0 = \frac{1}{2} erfc \left[ \left( \frac{1}{h_b^2} + \frac{\eta P_\pi}{B P_s} \right)^{-0.5} \right],$$

где  $\eta$  – параметр помехи, зависящий от расстройки по частоте между полезным сигналом и помехой и отношения ширины полосы частот спектра помехи и расширенной полосы частот сигнала (для заградительной помехи  $\eta$ =0,45, для псевдошумовой  $\eta = 0.66$ , для гармонической помехи  $\eta = 1,0$ ) [1].

Известно выражение для вероятности  $P_{o}$  в условиях воздействия импульсной помехи [1,4,5]

$$P_{0} = \frac{1}{2} \rho erfc \left[ \left( \sqrt{\frac{E_{s}}{N_{0} + N_{n}}} \right) \right] + \frac{1}{2} (1 - \rho) erfc \left( \sqrt{h_{b}^{2}} \right),$$

 $\Gamma A = \rho - C K B A K H O C T B H O C T B A C$ ризующая степень перекрытия частотным спектром помехи частотного спектра полезного сигнала, 0≤ $\rho$ ≤1;

 $N_{{\scriptscriptstyle \Pi}}$  – спектральная плотность мощности импульсной помехи равная

$$N_{\Pi} = P_{\Pi} \bullet T_{\Pi}$$

 $N_{_{\!\varPi}} = P_{_{\!\varPi}} \bullet T_{_{\!\varPi}},$  где  $P_{_{\!\varPi}}$  и  $T_{_{\!\varPi}}$  – мощность и длительность помехи

#### Требуется определить:

- оптимальные параметры корректирующего кода (n – длина кода, k – число информационных символов в кодовой комбинации,  $d_{\scriptscriptstyle min}$  – минимальное кодовое расстояние, q - основание кода), при которых обеспечивается наибольшая помехозащищенность как наименьшая вероятность битовой ошибки;
- степень влияния параметров канального (корректирующего) кода на помехозащищенность СПД с расширенным спектром;
- способы повышения помехозащищенности перспективных СПД с расширенным спектром сигнала.

#### Решение задачи

При использовании корректирующего кодирования данных при фиксированном времени передачи Т сообщения канальная скорость передачи символов  $R_{\scriptscriptstyle k}$  определяется выражением

$$R_{K}=R_{u}n/k$$
  
при  $T=const$ ,

где  $R_{_{\scriptscriptstyle H}}$  – производительность источника данных,

Тогда время передачи одного канального символа  $T_s$  уменьшится в n/k раз по сравнению с безызбыточной передачей (без кодирования) и при фиксированной полосе пропускания

$$\Delta F_{II} = const$$

канала передачи допустимая база сигнала B так

же уменьшится в n/k раз, что объясняется выражением

$$B_{ ext{\tiny KAH}} = rac{\Delta F_{\Pi}}{R_{\kappa}} = rac{\Delta F_{\Pi} \cdot k}{R_{\omega} \cdot n} < B = rac{\Delta F_{\Pi}}{R_{\omega}}.$$

Так как база сигнала и вероятность  $P_a$  полностью определяют помехозащищенность кодированной СПД, то оценку показателя помехозащищенности П будем вести по обобщенному показателю

$$\Pi = B \bullet P_o$$

при

$$P_{i} = f(B, P_{o}, h^{2}_{i}, P_{r}/P_{c}, d_{min}) = const.$$
 (1)

 $P_{_b}\!\!=\!\!f(B,\,P_{_O},\,h^2_{_{_D}},\,P_{_{\Pi}}\!/P_{_{C}},\,d_{_{min}}\!)\!\!=\!\!const. \eqno(1)$  Критерий оптимальности предполагает запись выражения (1) в виде

$$max \Pi = max \frac{k}{n} P_0 \quad \text{при}$$

$$\{n, k, q\} \quad \{n, k, q\}$$

$$\left\{P_b = f\left(\frac{k}{n}, h_b^2, \frac{P_{\Pi}}{P_c}, d_{min}, P_0\right) = const;\right\}$$

$$B = \frac{\Delta F_{\Pi}}{R_{\text{H}}} = const;$$

$$T = const.$$
(2)

который имеет ясный физический смысл - чем больше скорость k/n, тем выше помехозащищенность (большее значение  $B_{\mathit{KAH}}$ ); чем больше допустимое значение  $P_{\scriptscriptstyle 0}$  при  $P_{\scriptscriptstyle b}$ =const, тем выше помехозащищенность.

Такой критерий содержит противоречивые требования к параметрам  $\{n,k,q\}$  корректирующего (канального) кода:

- с одной стороны, увеличение скорости кодирования k/n приводит к увеличению показателя помехоустойчивости  $\Pi$ , так как повышаются энергия канального символа и значение  $B_{\kappa AH}$ ;
- $\bullet$  с другой стороны, увеличение k/n снижает корректирующие свойства канального кода (уменьшается  $d_{min}$ ) и увеличивается вероятность битовой ошибки  $P_{\scriptscriptstyle b}$ , что потребует уменьшение вероятности  $P_{\scriptscriptstyle{\theta}}$  для выполнения условия

$$P_b = f(P_0) = const,$$

значение  $\Pi$  будет уменьшаться.

Определим значение  $P_b$  по выражению [2]:

$$P_b = \frac{1}{n} \sum_{i=t_u+1}^{n} C_n^i i P_0^i (1 - P_0)^{n-i},$$

где  $t_{u} = \left[\frac{d_{min}-1}{2}\right]$  – корректирующая способность кода.

Зная выражения для вероятностей  $P_0$  и  $P_b$ , параметры кодирования, исследуем влияние параметров кодирования  $(n,k,d_{\min},q)$  на обобщенный показатель помехозащищенности  $\Pi$ .

Для этого выберем группу двоичных кодов (q=2) с различными значениями скорости кодирования k/n (таблица 1).



Анализ mаблицы 1 позволяет сделать важные выводы:

- $\bullet$  скорость кодирования k/n существенно влияет на помехозащищенность СПД с расширенным спектром. Например, при к/п≥0,5 [коды с параметрами (15,11,3,1), (31,26,3,1), (24,12,8,3)] для требований по  $P_b \le 10^{-5}$  наблюдается значительная просадка помехозащищенности;
- предпочтение следует отдать корректирующим кодам со скоростью k/n < 0,5 (код с параметрами n=127, k=36,  $d_{min}=31$  при  $P_b \le 10^{-5}$  позволяет получить наибольшую помехозащищенность), предпочтительная скорость  $k/n \approx 0.3$ ;
- при невысоких требованиях на  $P_{L}(P_{L} \le 10^{-3})$ наибольшую помехозащищенность СПД обеспечивает код с параметрами n=127, k=64,  $d_{min}=21$ (т.е. предпочтительная скорость кодирования k/

В заключение исследуем помехозащищенность недвоичного (q=256) кода Рида-Соломона с длиной N=256, K=112,  $D_{min}$ =144, который по-

Таблица 1 Помехозащищенность двоичных (q=2) кодов

Парамо			Помехозащи-
Параме-	Вероят-	Вероят-	щенность
тры кода (n,k,d <sub>mir</sub> ,t <sub>ı</sub> )	ность $P_b$	ность <i>Р</i> <sub>0</sub>	$\Pi = 10 lg \frac{k}{n} P_{0'}$
· · · min u			дБ <sup>n</sup>
	10 <sup>-3</sup>	1,31•10-2	-21,26
(7,4,3,1)	10 <sup>-5</sup>	1,31•10 <sup>-3</sup>	-31,26
	10 <sup>-7</sup>	1,31•10-4	-41,26
	10-3	8,81•10 <sup>-3</sup>	-21,947
(15,11,3,1)	10-5	8,5•10-4	-31,94
	10 <sup>-7</sup>	8,55•10⁻⁵	-41,94
	10 <sup>-3</sup>	6,2•10-3	-22,84
(31,26,3,1)	10 <sup>-5</sup>	5,83•10-4	-33,098
	10 <sup>-7</sup>	5,81•10 <sup>-5</sup>	-43,098
	10-3	4,47•10-2	-18,27
(15,5,7,3)	10 <sup>-5</sup>	1,324•10 <sup>-2</sup>	-23,55
	10 <sup>-7</sup>	4,15•10 <sup>-3</sup>	-28,59
	10-3	4,27•10-2	-19,716
(16,4,8,3)	10 <sup>-5</sup>	1,25•10 <sup>-2</sup>	-25,05
	10 <sup>-7</sup>	3,93•10 <sup>-3</sup>	-30,08
	10-3	3,12•10-2	-17,96
(24,12,8,3)	10 <sup>-5</sup>	9•10 <sup>-3</sup>	-23,468
	10 <sup>-7</sup>	2,78•10-3	-28,57
	10-3	3,945•10 <sup>-2</sup>	-16,99
(127,64,21,10)	10 <sup>-5</sup>	2,18•10-2	-19,586
	10 <sup>-7</sup>	1,32•10-2	-21,77
	10-3	6,5•10 <sup>-2</sup>	-17,447
(127,36,31,15)	10 <sup>-5</sup>	4,17•10 <sup>-2</sup>	-19,208
	10 <sup>-7</sup>	2,87•10-2	-20,896
	10-3	0,157	-20,08
(128,8,64,31)	10 <sup>-5</sup>	0,121	-21,213
	10 <sup>-7</sup>	0,09683	-22,18

зволяет исправлять  $T_{\mu}$ =72 недвоичные ошибки в кодовой комбинации (или

$$T_{_{H}} \times log_{_{2}}256 = 576$$

двоичные ошибки $\overset{``}{[2,3]}$ . Математическая модель декодера такого кода представлена на рисунке 2.

$$P_{q} = f(h_{0}^{2}, M)$$

$$P_{b(ex)} \cong P_{q}/2$$

$$P_{E} = f(N, P_{q}, T_{U})$$

$$P_{b(eblX)} \cong P_{E}/2$$

Рис. 2. Математическая модель декодера

Вероятность ошибочного приема  $P_{\alpha}$  входного символа декодера определяется основанием модуляции M=q=256, отношением сигнал/шум на входе демодулятора (первой решающей схемы приемника). Например, для равновероятных М-ных сигналов с фазовой модуляцией и когерентным детектированием вероятность  $P_{q}$  рав-

 $P_q(M) = 2Q\left(\sqrt{2h_0^2\log_2 M}\right)\sin\frac{\pi}{M}$ 

 $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{u^2}{2}} du.$ 

Тогда вероятность битовой ошибки на входе недвоичного декодера определяется известным соотношением [2]

$$P_{b(\mathtt{BX})} \cong \frac{P_q(M)}{2}.$$

Вероятность ошибочного декодирования недвоичного символа кода Рида-Соломона  $P_{\scriptscriptstyle E}$ определяется выражением [2]

$$P_{\it E}\cong rac{1}{N}\sum_{i=T_{\it u}+1}^{N}C_N^iiP_q^i(1-P_q)^{N-i},$$
а вероятность битовой ошибки на выходе недво-

ичного декодера равна

$$P_{b(\mathtt{BMX})} \cong \frac{P_E}{2}$$
.

В таблице 2 представлены оценки помехозащищенности  $\Pi$ , дБ, недвоичных (q=256) кодов Рида-Соломона (N=256, K=112) и (N=255,

Анализ таблицы 2 показывает:

• высокоскоростные коды Рида-Соломона

Таблица 2 Оценка помехозащищенности недвоичных кодов (q=256)

Параме-	Веро-	Вероят-	Помехозащи-
тры кода	ятность	ность $P_{b(sx)}$	щенность
$(N, K, D_{min})$	$P_{b(B \bowtie X)}$	2(21)	$\Pi = 10lg \frac{\kappa}{N} P_{b(EX)},$
q=256			дБ
(N=255,	10 <sup>-3</sup>	0,00463	-23,5
K=247)			
(N=256,	10-3	0,11	-13,9
<i>K</i> =112)	10-5	0,083	-14,44



(k/n)>0.5 не представляют интереса для СПД с расширенным спектром сигнала (разница в значениях  $\Pi$  двух исследуемых кодов больше 10 дБ);

- как и для случая двоичного кодирования (maблица~1), имеется скорость кодирования (k/n)<0,5, при которой помехозащищенность наибольшая (в данном случае код, имеющий длину N=256, K=112 недвоичных символов);
- недвоичные коды Рида-Соломона превосходят по помехозащищенности в СПД с расширенным спектром сигнала лучшие двоичные коды (таблица 1) при  $P_b=10^{-5}$  на 6 дБ, при  $P_b=10^{-7}$  на 6,45 дБ.

**Предложение.** Для гарантированной помехозащищенности систем радиосвязи специального назначения в условиях воздействия различных помех необходимо комплексное использование недвоичного кодирования данных с параметрами кодов, близких к оптимальным, и сигналов с расширенным спектром.

#### Выводы

- 1. При фиксированных времени передачи сообщения и полосе пропускания канала передачи данных введение корректирующего кодирования приводит к уменьшению базы сигнала в n/k раз. Это снижает энергетическую скрытность радиосигнала и вызывает частичное уменьшение помехоустойчивости канала передачи при воздействии стационарных и импульсных помех
- 2. Введение корректирующего кодирования данных обеспечивает гарантированную помехоустойчивость канала передачи при воздействии на вход приемника мощных узкополосных помех и АБГШ, что не может быть принципиально обеспечено только расширением спектра сигнала.
- 3. Предложен новый обобщенный показатель помехозащищенности, который, в отличие от известных, учитывает не только влияние базы и энергии сигнала, но и корректирующие свойства кодов, определяемые их параметрами, и позволяет оценить помехозащищенность кодированных систем передачи данных с расширенным спектром сигнала.

- 4. Установлено значение близких к оптимальным параметрам корректирующего кодирования данных, обеспечивающих наибольшую помехозащищенность канала передачи (скорость кодирования для двоичных кодов близка к 0,3).
- 5. Установлено, что недвоичные (q=256) коды Рида-Соломона позволяют повысить помехозащищенность систем передачи не менее чем на 6 дБ по сравнению с двоичными кодами. При этом скорость кодирования увеличилась до 112/256=0,4675, что способствует возможности увеличить базу сигнала с расширенным спектром.
- 6. Комплексное использование близкого к оптимальному кодирования данных и сигналов с расширенным спектром обеспечивает гарантированную помехозащищенность систем радиосвязи специального назначения в условиях воздействия различных помех, том числе и наиболее опасных.

Литература

- 1. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., Шестопалов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра прямой модуляцией псевдослучайной последовательностью / Под ред. В.И.Борисова. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: РадиоСофт, 2011. 550 с.
- 2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд., испр. Пер. с англ. М.: Издат. дом «Вильямс», 2007. 1104 с.
- 3. Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В. Оценка помехоустойчивости каскадных кодов // Вестник Воздушно-космической обороны, 2015. №4. С.56-58.
- 4. Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Наконечный Б.М., Шмырин Е.В. Статистический анализ воздействия импульсных помех на мягкое декодирование двоичных  $\Phi$ M-сигналов// Известия Института инженерной физики, 2013.  $\mathbb{N}$ 1(27). С.47-49.
- 5. Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Зеленевский А.В., Шмырин Е.В., Дурнов А.С. Методика оценки помехоустойчивости данных при воздействии гауссова шума и импульсных помех // Известия Института инженерной физики, 2019. №3(53). С.32-36.

and the state of the same of the state of the same of



**УДК 621.37** 

МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ
ИЗМЕНЕНИЙ РЕЖИМОВ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЭС
ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ
ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

METHODS FOR DETECTING
CHANGES IN THE OPERATION
MODES OF THE REM WHEN
PROCESSING THE RESULTS OF
REMOTE SENSING EARTH

#### Олег Игоревич Атакищев

доктор технических наук, профессор заместитель генерального директора по специальным проектам МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: +7 (4967) 35-31-93 E-mail: aoi007@mail.ru



#### Анатолий Иванович Мухин

кандидат технических наук преподаватель55 кафедры ВКА имени А.Ф. Можайского Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13

#### Антон Николаевич Смирнов

адъюнкт 55 кафедры ВКА имени А.Ф. Можайского

#### Даниил Николаевич Смирнов

старший инженер 551 лаборатории ВКА имени А.Ф. Можайского

#### Аннотация

В статье обоснована необходимость выявления изменений режимов функционирования РЭС. Рассмотрен применяемый в этих целях регрессионный анализ и показаны его недостатки, проявляющиеся в условиях космического мониторинга. Предложена усовершенствованная методика выявления изменений режимов функционирования РЭС, учитывающая специфику результатов космического мониторинга. Указанная методика может применяться совместно с такими системами, как AIS и ADS-В для обеспечения безопасного судоходства и мореплавания.

Ключевые слова: мониторинг, сигналы, методика, режим функционирования.

#### **Summary**

The article substantiates the need to identify changes in the modes of operation of REM. The regression analysis used for this purpose is considered and its disadvantages are shown, which are manifested in the conditions of space monitoring. An improved method for detecting changes in the operating modes of the REM is proposed, taking into account the specifics of the results of space monitoring. This technique can be used in conjunction with systems such as AIS and ADS-B to ensure safe navigation and navigation.

Keywords: monitoring, signals, methods, functioning mode.

#### Введение

За последнее десятилетие на всем земном шаре наблюдается резкое увеличение числа пассажиропотоков и грузоперевозок, что обусловлено достаточно развитой транспортной инфраструктурой: наземной, наводной, воздушной. Главное требование к любой перевозке заключается в обеспечении сохранности жизни и здоровья человека, а также в обеспечении целостности и сохранности груза.

Для осуществления указанного требования в настоящий момент реализуется проект тотального мониторинга земной поверхности с актуальным отображением всех видов транспорта на

общедоступной электронной цифровой карте.

С целью мониторинга наводного и воздушного пространства были созданы системы AIS и ADS-B [1]. Как известно, одним из видов мониторинга является космический радиоэлектронный контроль, заключающийся в, частности, в приеме сигналов AIS и ADS-B. Только с помощью космического мониторинга существует возможность тотального мониторинга всей земной поверхности.

В данный момент сигналы AIS и ADS-В принимаются различными береговыми диспетчерскими службами и космическими аппаратами типа Orbcomm-G2.



Однако, для получения наиболее полной информации о транспорте, необходимо осуществлять прием электромагнитных излучений и от других бортовых радиоэлектронных средств (РЭС), установленных как на самих транспортных средствах, так и на средствах, обеспечивающих безопасное перемещение данных объектов. Электромагнитные излучения заключают в себе параметры сигналов, изменение которых свидетельствует об изменении режимов функционирования РЭС.

Так, например, аэродромная радиолокационная станция ASR-10, используемая в США и Канаде, функционирует в двух режимах: обнаружение самолетов и их дальнейшее сопровождение [2]. Если, по каким-либо причинам, сигналы ADS-В небыли зафиксированы в районе определенного аэродрома, но ASR-10 внезапно перешла в режим сопровождения цели, то это означает, что с данного аэродрома взлетает или совершает посадку некий, не отображенный на электронной карте летательный аппарат, который может создавать реальную предпосылку к столкновению с другими воздушными судами.

Целью статьи является выявления изменений режимов функционирования РЭС при обработке результатов космического мониторинга. Следует отметить, что на выявление режимов функционирования РЭС могут оказывать негативное воздействие погрешности измерений, так как любое измерение всегда осуществляется с погрешностями. Погрешности могут быть случайными, систематическими и грубыми.

Существует возможность устранения представленных видов погрешностей известными методами [3,4]. Но устранить значимую часть погрешностей можно только лишь при наличии достаточной статистики измерений, что не всегда представляется возможным при космическом мониторинге. В разработанной методике существует возможность устранения грубых погрешностей измерений при наличии, как большого объема измерений, так и малого.

#### Выявление изменений режимов функционирования РЭС с использованием регрессионного анализа

При регрессионном анализе происходит исследование влияния одной или нескольких независимых переменных X на зависимую переменную Ү. Анализ взаимосвязи переменных осуществляется с помощью уравнений регрессии. Существует несколько уравнений регрессии: линейное, экспоненциальное, синусоидальное и т.д.

В силу наибольшей изученности, чаще всего применяется линейное уравнение регрессии, представленное в виде

$$y = ax + b, \tag{1}$$

где x – независимая переменная;

a и b – коэффициенты уравнения регрессии.

Выявление изменения режимов функционирования РЭС с использованием общеизвестного регрессионного анализа применим только в те моменты, когда проведено достаточно большое количество измерений. В таком случае выявление состоит из двух этапов и осуществляется следующим образом.

**Этап 1.** Оценивается изменение режима функционирования РЭС. В качестве независимой переменной используется шкала времени *t* проведения всех результатов измерений. В качестве зависимой переменной используется значение анализируемого параметра сигнала (например, длительность импульса  $\tau$ ). Рассчитанный коэффициент b эквивалентен начальному значению параметра сигнала. Коэффициент а – угловой коэффициент прямой, показывает изменение режима функционирования РЭС. В том случае, когда a = 0, режим функционирования РЭС не менялся. Если a > 0, то режим функционирования РЭС изменился в плане увеличения параметров сигналов. Если a < 0, то режим функционирования РЭС изменился в плане уменьшения параметров сигналов.

**Этап 2.** Оценивается временной интервал, на котором произошло изменение режима функционирования РЭС. В данном случае в качестве независимой переменной используется значение параметра сигнала, в качестве зависимой - шкала времени. Если a = 0, то режим функционирования РЭС не менялся. Если a>0 или a<0, то режим функционирования РЭС изменился, границы проекций сформированной линии на ось абсцисс означает интервал времени, на котором произошло изменение режима функционирования РЭС.

Для построения уравнения линейной регрессии вида (1) используется метод наименьших квадратов и составляется система нормальных уравнений

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^{n} x_{i}^{2} + b \sum_{i=1}^{n} x_{i} = \sum_{i=1}^{n} x_{i} y_{i} \\ a \sum_{i=1}^{n} x_{i} + b n = \sum_{i=1}^{n} y_{i} \end{cases}$$
 (2)

где n – число переменных X и Y.

Данная система уравнений решается методом Крамера следующим образом:

$$a = \frac{\Delta_1}{\Delta}, b = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \tag{3}$$

$$a = \frac{\Delta_{1}}{\Delta}, b = \frac{\Delta_{2}}{\Delta},$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n} x^{2} & \sum_{i=1}^{n} x \\ \sum_{i=1}^{n} x & n \end{vmatrix} = \sum_{i=1}^{n} x^{2} \cdot n - \sum_{i=1}^{n} x \cdot \sum_{i=1}^{n} x,$$
(3)



$$\Delta_{1} = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n} xy & \sum_{i=1}^{n} x \\ \sum_{i=1}^{n} y & n \end{vmatrix} = \sum_{i=1}^{n} xy \cdot n - \sum_{i=1}^{n} y \cdot \sum_{i=1}^{n} x , \qquad (5)$$

$$\Delta_{2} = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{n} x^{2} & \sum_{i=1}^{n} xy \\ \sum_{i=1}^{n} x & \sum_{i=1}^{n} y \end{vmatrix} = \sum_{i=1}^{n} x^{2} \cdot \sum_{i=1}^{n} y - \sum_{i=1}^{n} x \cdot \sum_{i=1}^{n} xy . \qquad (6)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n x^2 & \sum_{i=1}^n xy \\ \sum_{i=1}^n x & \sum_{i=1}^n y \end{vmatrix} = \sum_{i=1}^n x^2 \cdot \sum_{i=1}^n y - \sum_{i=1}^n x \cdot \sum_{i=1}^n xy.$$
 (6)

На рисунке 1 представлены линии регрессии, рассчитанные с помощью формул (1)-(6). В качестве исходных данных были смоделированы разные ситуации: с неизменным режим функционирования РЭС в течение определенного интервала времени и с изменяющимся режимом функционирования.

Однако такой подход к анализу результатов измерений (РИ) не позволяет определить конкретное время, в котором могло в действительности произойти изменение режима функционирования РЭС, что неприемлемо при нанесении оперативной информации объектов на электронную карту.

Использование метода регрессионного анализа при обработке малого числа измерений неприемлемо. Поэтому ниже представлена разработанная в рамках данной статьи методика выявления изменений режимов функционирования РЭС, позволяющая обрабатывать как малый, так и большой объем результатов измерений. Применение данной методики в системах обеспечения безопасного движения позволит повысить информативность о перемещении транспорта.

#### Методика выявления изменений режимов функционирования РЭС при обработке разного числа измерений

Методика подразделяется на несколько последовательно выполняемых представленных ниже этапов.

**Этап 1.** Исключение грубых погрешностей измерений с помощью критерия Граббса.

Согласно [3] погрешность измерения – это разность между результатом измерения величины и действительным (опорным) значением величины.

Известно множество подходов, позволяющих исключить грубые погрешности. К ним, в частности, относятся статистические методы выявления аномальных результатов по критериям Смирнова, Шарлье, Шовенэ, Диксона и др. Эти критерии основаны на знании статистических оценок параметров распределения, что не всегда достигается в условиях космического мониторинга.

Исключение грубых погрешностей измерений из результатов сигналов при обработке разного числа измерений осуществляется путем использования критерия Граббса [3]. Использование критерия Граббса оправдано тем, что он обеспечивает получение достоверных решений, как при малых, так и при больших объемах выборки. Статистический критерий Граббса основан на предположении о том, что группа результатов измерений параметров сигналов подчинена нормальному распределению. Согласно критерию Граббса оценивают полученные результаты, выстроенные в вариационный ряд. Максимальное  $x_{max}$  и минимальное  $x_{min}$  значения вариационного ряда оценивают на предмет наличия грубых погрешностей путем вычисления показателей  $G_1$  и  $G_2$  следующим образом:

 $G_1 = \frac{\left|x_{\text{max}} - \overline{x}\right|}{S}, \quad G_2 = \frac{\left|\overline{x} - x_{\text{min}}\right|}{S},$ (7)

где  $S = \sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2}{n-1}}$  — среднее квадратическое отклоизмерений параметров сигнала РЭС;

 $\bar{x}$  – среднее арифметическое значение параметра сигнала по n результатам измерений.

Рассчитанные значения  $G_1$  и  $G_2$  сравниваются с теоретическим значением  $G_T$  критерия Граббса при выбранном уровне значимости q. Значения

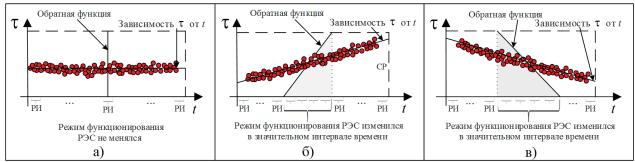


Рис. 1. Линии регрессии, построенные по нескольким РИ: а) режим функционирования РЭС не менялся; 6) и в) – режим функционирования РЭС изменился в определенном интервале времени

критерия Граббса при разных уровнях значимости представлены в таблице 1. Для получения более достоверных оценок, уровень значимости *q* должен быть наивысшим.

Таблица 1 Критические значения GT для критерия Граббса

	Одно наи	большее			Одно наибольшее							
n	или одно на	именьшее			или одно	наимень-						
	значение п	ри уровне			шее значение при							
"	значим	ости q		n	уровне значимости <i>q</i>							
	Свыше 1 %	Свыше			Свыше	Свыше						
		5 %			1 %	5 %						
3	1,155	1,155		19	2,968	2,681						
4	1,496	,496 1,481		20	3,001	2,709						
5	1,764	4 1,715		21	3,031	2,733						
6	1,973	1,887		22	3,060	2,758						
7	2,139	2,020		23	3,087	2,781						
8	2,274	2,126		24	3,112	2,802						
9	2,387	2,387 2,215		25	3,135	2,822						
10	2,482	2,290		26	3,157	2,841						
11	2,564	2,355		27	3,178	2,859						
12	2,636	2,412		28	3,199	2,876						
13	2,699	2,462		29	3,218	2,893						
14	2,755	2,507		30	3,236	2,908						
15	2,806	2,549		31	3,253	2,924						
16	2,852	2,585		32	3,270	2,938						
17	2,894	2,620		33	3,286	2,952						
18	2,932 2,651			34	3,301	2,965						

Если  $G_1 > G_T$ , то  $x_{max}$  исключают из РИ как маловероятное значение. Если  $G_2 > G_T$ , то  $x_{min}$  также исключают как маловероятное значение. Далее вновь вычисляют критерии Граббса и процедуру проверки наличия грубых погрешностей повторяют. Но если  $x_{\max}$  и  $x_{\min}$  являются первыми или последними РИ, то  $x_{max}$  и  $x_{min}$  не исключаются, а делается предположение о возможном изменении режима функционирования РЭС, которое получит подтверждение или опровержение при следующих РИ.

Если  $G_{_{I}} \leq G_{_{T}}$ , то  $x_{_{max}}$  не считают промахом и его сохраняют в ряду результатов измерений. Если  $G_2 \leq G_T$ , то  $x_{min}$  не считают промахом и его также сохраняют в ряду результатов измерений.

Для примера оценим результаты одного СР, в ходе которого получено девять РИ (n=9). Причем, два РИ из девяти содержат в себе грубые погрешности измерения какого-либо параметра сигнала РЭС. Например, длительность импульса наблюдаемой РЭС принимает следующие значения: 50, 51, 50, 1, 52, 150, 49, 48, 50.

Вычисляется критерий Граббса  $G_I$ 

$$G_1 = \frac{|150 - 55,666|}{38,926} = 2,423$$

Вычисленное значение  $G_I$  сравнивается с критическим (табличным)  $G_{r}$ :

2,423 > 2,215. Следовательно,  $x_{max} = 150$  исключается из последующего анализа как маловероятное значение. Повторно вычисляется критерий Граббса  $G_i$ 

 $G_1 = \frac{\left|52 - 43,875\right|}{17.365} = 0,468$ 

и сравнивается с табличным (при n = 8)  $G_T$ : 0,468 < 2,126. Следовательно,  $x_{max} = 52$  не считается промахом и не исключается из расчетов.

Вычисляется следующий критерий Граббса  $G_2$ для минимального значения

$$G_2 = \frac{|43,875 - 1|}{17,365} = 2,469$$

Сравнение табличным значением (2,469 > 2,126) требует исключить  $x_{min} = 1$  из дальнейшего анализа как маловероятное значение. В данном случае повторно критерий Граббса не вычисляется.

Таким образом, полученные значения «150» и «1» содержат грубые погрешности и не свидетельствуют об изменении в режимах функционирования РЭС, так как находятся не в первом и не в последнем формуляре.

**Этап 2**. Вычисление и сравнение средних арифметических значений параметров сигналов, полученных от первого и последующих РИ. Данный этап применяется в тех случаях, когда все режимы возможного функционирования РЭС неизвестны.

На данном этапе происходит вычисление и сравнение выборочного среднего параметра сигнала, полученного от первой череды измерений (случайная величина X) и последующих измерений (случайная величина У). Вычисление среднего арифметического на примере длительности импульса сигнала происходит по формуле

$$\overline{\tau} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \tau_i \tag{8}$$

 $\overline{ au} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} au_{i}$  (8) Использование для выявления изменения режимов функционирования РЭС коэффициента корреляции в данном случае неприемлемо по следующей причине: если в первой череде измерений будут записаны длительности импульса т, равные, например: 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 мкс, а в последующем формуляре длительности импульсов  $\tau_2$  равны: 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57 мкс, то коэффициент корреляции примет значение +1, что указывает на полную корреляцию между двумя величинами. Хотя на самом деле прослеживается явное изменение режима функционирования РЭС.

Второй этап методики необходим для выявления максимального  $\tau_{max}$  и минимального  $\tau_{min}$ значений выборочных средних параметров сигналов. В случае, если значения равны, то третий



этап методики пропускается.

**Этап 3.** Анализ результатов.

На данном этапе максимальное значение среднего арифметического значения параметров сигналов принимается за 100%, а минимальное значение вычисляется следующим образом \_\_\_\_\_\_

 $\tau_{\text{max}}$ : 100% =  $\tau_{\text{min}}$ : x% (9)

Затем производится оценивание превышения заданного уровня. Из 100% вычитается вычисленное минимальное значение, и результат сравнивается с неким выбранным пороговым уровнем. Например, пусть этот уровень соответствует максимально допустимой погрешности 15%.

Если результат вычислений меньше или равен величине выбранного порогового уровня, т.е.  $100\% - x\% \le 15\%$ , то принимается решение о том, что РЭС на протяжении всех СР функционировало в одном режиме, например в стандартном. Причем, среднее арифметическое параметров сигналов вычисляется по всем предыдущим СР.

Если результат превысил 15%, то делается вывод о том, что режим функционирования РЭС изменился (нестандартный №1). Считается, что в новом режиме функционирования РЭС работает до тех пор, пока вычисленное значение вновь не превысит 15%. В этом случае может быть два вывода: или РЭС обратно перешло в стандартный режим функционирования, или же РЭС перешло в нестандартный режим функционирования № 2.

Этапы с 1 по 3 предназначены для обработки оперативных РИ. Графическое пояснение выполнения указанных этапов методики представлено на рисунке 2.

**Этап 4**. Обработка статистических данных РИ.

Данный этап подлежит выполнению только при накоплении достаточной статистики РИ. На этом этапе происходит устранение возможных оставшихся погрешностей измерений известными методами. Затем производится регрессионный анализ РИ, как в указанной выше методике использования регрессионного анализа. Причем, если коэффициент уравнения регрессии a=0, то делается вывод о том, что режим функционирования РЭС на протяжении всего интервала наблюдения не менялся. Этот вывод сравнивается с выводом, который был сформирован по результатам этапа 3. Если два вывода совпали, то дальнейший анализ прекращается.

Если a>0 или a<0, то делается вывод о том, что режим функционирования РЭС на протяжении всего интервала наблюдения менялся. Этот вывод сравнивается с выводами, сформированными на этапе 3. Если выводы совпали, то дальнейший анализ прекращается. Если выводы не совпали, то требуется вмешательство опытного оператора.

В *таблице 2* и на *рисунке 3* представлены значения параметров сигналов, полученные в результате проведения РИ, а также оценки выборочных средних и СКО.

Анализ данных, представленных в таблице 2, отражает справедливость вывода о том, что для выявления режимов функционирования РЭС целесообразно использовать в анализе выборочные средние измеряемого параметра, полученные в результате одного (или нескольких ближайших по времени) РИ. Регрессионный анализ по всем полученным значениям оказывается менее чувствительным к изменениям измеряемого

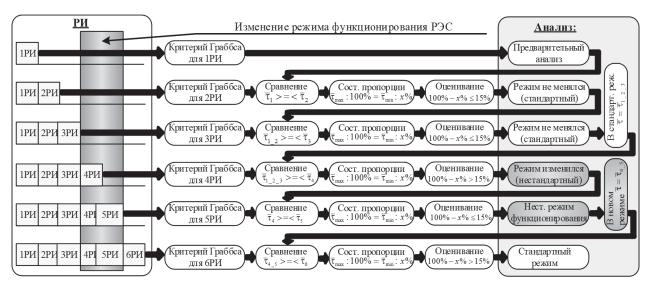


Рис. 2. Этапы методики выявления изменений режимов функционирования РЭС при обработке оперативных РИ



**Таблица 2** Значения параметра сигнала РЭС и числовые характеристики

Номер РИ	Полученные в формулярах значения параметра сигнала									Среднее значение		S		
										за РИ	по всем	за РИ	по всем	
1	50	51	49	1	52	100	53	47	51	50	50,4	50,4	1,8	1,8
2	49	48	50	55	46	49	51	-	-	-	49,7	50,1	2,8	2,3
3	45	47	48	49	50	51	50	53	50	-	49,2	49,7	2,3	2,3
4	100	98	105	100	101	102	95	-	-	-	100,1	61,1	3,1	21,6
5	95	100	104	98	102	101	103	100	99	98	100,0	70,6	2,7	25,2
6	49	50	51	50	48	50	50	51	-	-	49,9	67,2	0,9	24,3
7	50	51	50	49	50	49	50	50	49	-	49,7	64,7	0,7	23,3
8	48	49	50	50	51	52	53	-	-	-	50,4	63,2	1,7	22,4

Примечания:

– исключенные грубые погрешности измерения;

– изменение режима функционирования РЭС

параметра РЭС и обладает меньшей точностью при оценке момента времени произошедшего изменения.

Для более наглядного отображения зависимостей, представленных в таблице 2, на рисунке 3 представлено графическое отображение изменения числовых характеристик закона распределения параметра сигнала при изменении режима функционирования РЭС.

Анализ *рисунка 3* позволяет сделать вывод о том, что оценка СКО по всем полученным значениям не позволяет выявлять частые изменения измеряемых параметров РЭС, однако может служить хорошим индикатором изменений, если последние происходят сравнительно редко.

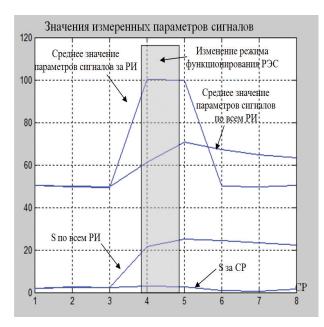


Рис. 3. Изменение числовых характеристик закона распределения параметра сигнала при изменении режима функционирования РЭС

#### Заключение

Таким образом, в статье предложена новая методика выявления изменений режимов функционирования РЭС при обработке результатов космического мониторинга. В основу методики легли методы статистического анализа. Внедрение методики в систему обеспечения безопасного движения морских и авиасудов позволит повысить информативность о перемещении транспорта, что может достигаться за счет:

- приема электромагнитных излучений не только от AIS и ADS-B, но и от других бортовых РЭС, установленных как на самих транспортных средствах, так и на средствах, обеспечивающих безопасное перемещение данных объектов;
- использования статистических адаптированных методов, позволяющих более оперативно и с лучшей точностью определять параметры сигналов РЭС, и как следствие, выявлять возможные изменения режимов функционирования указанных РЭС с повышенной временной точностью.

Своевременное и точное выявление изменений режимов функционирования РЭС позволит более достоверно оценивать оперативную обстановку и отображать актуальную информацию на цифровой карте движения транспорта.

#### Литература

- 1. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года СОЛАС 74 (редакция, действующая с 1 января 2017 года).
- 2. Ширман Я.Д. Радиоэлектронные системы, справочник. М.: Радиотехника, 2007. 515 с.
- 3. ГОСТ Р 8.736–2011. Измерения прямые многократные. М.: Стандартинформ, 2013. 19 с.
- 4. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Юнити, 2004. 573 с.



УДК 621.396: 621.391.8

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОРОГОВ КЛАССИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЯ ТРАНСИОНОСФЕРНЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ, ОПИСЫВАЕМЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НАКАГАМИ\*

OPTIMIZATION OF CLASSIFICATION
THRESHOLDS FOR THE STATE
OF TRANSIONOSPHERIC
COMMUNICATION CHANNELS
DESCRIBED BY THE NAKAGAMI
DISTRIBUTION

#### Геннадий Иванович Линец

доктор технических наук, доцент заведующий кафедрой инфокоммуникаций Северо-Кавказский федеральный университет Адрес: 355028, г. Ставрополь, проспект Кулакова, д. 2а (корпус №9)

Тел.: +7 (8652) 95-69-97 E-mail:kbytw@mail.ru



#### Сергей Владимирович Мельников

аспирант кафедры инфокоммуникаций Северо-Кавказский федеральный университет Адрес: 355028, г. Ставрополь, проспект Кулакова, д. 2а (корпус №9)

Тел.: +7 (8652) 95-69-97 E-mail:territoreer@yandex.ru

#### Аннотация

В статье решена задача определения оптимальных порогов классификации для обеспечения динамической работы адаптивных систем радиосвязи в случае, когда ионосферные флуктуации описываются распределением Накагами. В качестве решающего правила, обеспечивающего наивысшую точность определения оптимальных порогов, использован критерий Неймана-Пирсона. Обоснован и выбран метод Ньютона-Крылова для определения оптимальных порогов. Адекватность полученных результатов подтверждена близостью решений с точностью не менее 10<sup>-3</sup> при использовании методов Пауэлла, Ньютона-Крылова и Бройдена.

**Ключевые слова:** трансионосферные каналы связи; распределение Накагами; распознавание сигнала; оптимизация порогов классификации; ошибки первого рода; ошибки второго рода; критерий Неймана-Пирсона; адаптивные системы радиосвязи.

#### Summary

In the article solves the problem of determining the optimal classification thresholds for ensuring the operation of adaptive radio communication systems in the case when ionospheric fluctuations are described by the Nakagami distribution. The Neumann-Pearson criterion was used as the decisive rule providing the highest accuracy in determining the optimal thresholds. The Newton-Krylov method for determining the optimal thresholds is substantiated and selected. The adequacy of the results is confirmed by the proximity of obtained solutions with the required accuracy not less than 10<sup>-3</sup> by the methods of Powell, Newton-Krylov and Broyden.

**Keywords:** transionospheric communication channels; Nakagami distribution; signal recognition; optimization of classification thresholds; errors of the first kind; errors of the second kind; Neumann-Pearson test; adaptive radio communication systems.

#### Введение

Известно, что на состояние спутниковых радиоканалов большое влияние оказывает ионосфера [1]. Мерцания принимаемых сигналов в спутниковых (трансионосферных) каналах связи, как правило, описываются распределением Райса или m-распределением Накагами и

могут быть очень глубокими [2]. В работах [3,4] показано, что для описания состояния трансионосферных каналов связи широко используется закон Накагами, так как он хорошо аппроксимирует практические результаты исследований.

Для уменьшения влияния ионосферных мерцаний (т.е. замираний, или флуктуаций ам-

<sup>\*</sup> Исследования выполнены при поддержке научного проекта «Разработка роботизированного беспилотного летательного аппарата мультироторного типа с использованием бесплатформенной инерциальной навигационной системы» Федеральной Целевой Программы на 2014-2020 годы (уникальный идентификатор RFMEFI57818X0222) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России с использованием оборудования «Аппаратно-программный комплекс пассивного мониторинга ионосферы NovAtel GPStation-6».



плитуды принимаемых сигналов) используются различные способы адаптации, основанные на изменении вида модуляции, помехоустойчивого кодирования или уровня передачи сигналов по мощности. Для обеспечения требуемой достоверности приема сигналов в трансионосферных каналах связи обычно используется энергетическая избыточность, которая определяется в рекомендациях [5].

В настоящее время одним из перспективных методов решения данной проблемы является использование адаптивных систем радиосвязи, основанных на оценке параметров наблюдаемых процессов.

Известен ряд устройств и систем, реализующих адаптацию спутниковых каналов связи [6,7]. Однако имеющиеся практические решения не в полной мере обеспечивают требования, предъявляемые к качественным характеристикам спутниковых каналов.

Важным этапом работы адаптивных систем является выбор оптимальных порогов классификации при распознавании сигналов на фоне шума, которые существенно влияют на вероятность правильного приема сигналов. В работах [8,9,10] приведены зависимости вероятности правильного обнаружения сигнала от отношения сигнал/шум (S/N) для некоторых фиксированных значений вероятности ложной тревоги. Проведены достаточно полные аналитические исследования для когерентного приема и получены основные характеристики, позволяющие определять пороги классификации при некогерентном приеме. Однако оптимизация порогов классификации для трансионосферных каналов связи, учитывающая статистические характеристики помеховых воздействий при их описании распределением Накагами, в данных работах не представлена.

Таким образом, задача определения оптимальных порогов классификации для обеспечения работы адаптивных систем спутниковой радиосвязи с требуемым качеством в случае, когда ионосферные флуктуации описываются распределением Накагами, является актуальной.

#### Анализ состояния проблемы

Для анализа замираний в трансионосферных сигналах связи исследуется амплитуда квадратурных компонент, возникающая вследствие интерференции сигналов с одинаковой частотой, но с разными фазами, и его функция распределения.

Для замирающих амплитуд отдельных лучей и сигнала в целом принято и обосновано так называемое m-распределение (распределение Накагами) [11,12]:

$$W_1(\gamma) = \frac{2 \cdot m^m \cdot \gamma^{2m-1}}{\Gamma(m) \cdot \alpha^{2m}} \cdot \exp\left(-\frac{m}{\alpha^2} \cdot \gamma^2\right),$$

где  $\gamma \ge 0$ ,  $\alpha$  и  $m \ge 1/2$  – параметры распределения;

 $\Gamma(m)$  – гамма-функция.

Параметр  $\alpha = \sqrt{\gamma^2}$  выражает среднеквадратическое значение амплитуды  $\gamma$ , а

$$m = \frac{\alpha^4}{(\overline{\gamma^2} - \overline{\alpha}^2)^2} -$$

отношение квадрата средней мощности замирающего сигнала к дисперсии его мгновенной мощности, т.е. характеризует глубину замираний. Аналитическое выражение  $w_{_{I}}(\gamma)$  получено теоретически для распределения неотрицательной функции многих случайных аргументов и экспериментально подтверждено при испытаниях на различных радиотрассах [4].

В классических алгоритмах обнаружения сигнала используется априорная определенность параметров принимаемого сигнала и существующей помехи. При отсутствии информации используется оценка параметров наблюдаемых процессов, либо непараметрические алгоритмы обнаружения [13].

Непараметрические алгоритмы позволяют использовать более широкий круг алгоритмов, однако характеристики обнаружения сигналов остаются ниже, чем при использовании подхода оценки параметров наблюдаемых процессов [13].

При реализации оценки параметров сигналов и помехи используются адаптивные алгоритмы. Данные алгоритмы подстраиваются под изменение оцениваемых характеристик, что позволяет обеспечить близкие к оптимальным характеристики обнаружения.

Теоретические аспекты использования адаптивных алгоритмов обнаружения сигнала описаны в [14].

Известен способ многопараметрической адаптивной системы радиосвязи для передачи дискретной информации [6]. Однако он не учитывает статистические характеристики помеховых воздействий, что существенно влияет на определение состояния трансионосферных каналов.

Известен способ организации адаптивной спутниковой связи, представленный в работе [7], при котором проводится многопараметрическая последовательная адаптация вида разделения каналов, способа кодирования, вида модуляции, скорости передачи, значения несущей частоты, мощности передачи к состоянию радиоканала и параметрам передаваемой информации. Однако он не позволяет проводить адаптивную оценку состояния канала связи в период квазистационарности канала и прогнозирования на интервале адаптации.



Появление искажений в тракте приемника приводит к насыщению спектра гармоники помехами, что приводит к срыву слежения за спутниками и увеличению ошибки при декодировании сигналов, фазовых и кодовых измерений, что снижает точность определения характеристик глобальных навигационных спутниковых систем и увеличивает время передачи информации.

Известно, что определение порогов классификации обнаружения сигналов может решаться различными методами с использованием различных критериев [14]. Наиболее широкое распространение в подобных задачах получил критерий Неймана-Пирсона, т.к. его использование позволяет зафиксировать вероятность ложной тревоги и максимизировать вероятность правильного обнаружения сигналов [15].

#### Постановка задачи

При решении задачи оптимизации порогов классификации используем подход, описанный в [16].

В качестве решающего правила, обеспечивающего наивысшую точность системы идентификации, используем критерий Неймана-Пирсона. Зафиксируем вероятность ложной тревоги  $P_{\Lambda.T.}$  на постоянном уровне С и потребуем минимума ошибки пропуска нарушения режима работы системы. Тогда при ограничении

$$P_{\Lambda.T.} = \rho_{J} a(x_{o}) = C = const,$$
 где  $a(x_{o}) -$  ошибки первого рода;  $\beta(x_{o}) -$  ошибки второго рода.

В случае возникновения замираний, описываемых законом Накагами, окончательная система уравнений будет иметь вид:

где 
$$\begin{cases} H(x_0) \cdot H(y_0) = \frac{C}{p_1} \\ f(y_0) \cdot f(x_0 - a) \cdot H(x_0) \cdot H(y_0 - b) \\ -f(x_0) \cdot f(y_0 - b) \cdot H(y_0) \cdot H(x_0 - a) = 0 \end{cases} , \quad (1$$

$$f(x) = \frac{2 \cdot \mu^{\mu}}{\Gamma(\mu) \cdot \omega^{\mu}} \cdot x^{2 \cdot \mu - 1} \cdot e^{\frac{-\mu}{\omega} \cdot x^2}; \quad H(z) = \int_z^{\infty} f(x) dx ,$$
при ограничениях:  $\omega > 0, \ \mu \ge 1/2, \ x \ge 0.$ 

Требуется:

- ullet определить оптимальные пороги классификации  $x_o$  и  $y_o$ ;
- $\bullet$  выбрать метод, обеспечивающий решение системы уравнений (1) с точностью не хуже  $10^{-3}$ .

#### Решение задачи

Для решения системы уравнений (2) используем численные методы ввиду того, что получить точное решение не представляется возможным.

Основным методом для численного решения подобных систем уравнений является метод Ньютона [17].

Система уравнений (1) для решения с использованием метода Ньютона представлена ниже:

$$\begin{cases} H(x_{\mathbf{0}}) \cdot H(y_{\mathbf{0}}) - \frac{C}{p_{\mathbf{1}}} = F_{\mathbf{1}} = \mathbf{0} \\ f(y_{\mathbf{0}}) \cdot f(x_{\mathbf{0}} - a) \cdot H(x_{\mathbf{0}}) \cdot H(y_{\mathbf{0}} - b) \\ -f(x_{\mathbf{0}}) \cdot f(y_{\mathbf{0}} - b) \cdot H(y_{\mathbf{0}}) \cdot H(x_{\mathbf{0}} - a) = F_{\mathbf{2}} = 0 \end{cases}$$
Решение будем искать в виде [18]:

Темение будем искать в виде [то].
$$\overline{X}_{(n+1)} = \overline{X}_{(n)} - W^{-1}(\overline{X}_{(n)} \bullet \overline{F} X_{(n)}),$$

$$\overline{X}_{(n)} = \begin{pmatrix} x_{(n)}^0 \\ y_{(n)}^0 \end{pmatrix}, \quad \overline{F}(X_{(n)}) = \begin{pmatrix} F_1(x_{(n)}^0, y_{(n)}^0 \\ F_2(x_{(n)}^0, y_{(n)}^0 \end{pmatrix},$$

$$\mathbb{E}W(x)_{(n)}^0, y_{(n)}^0) = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_0} & \frac{\partial F_1}{\partial y_0} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_0} & \frac{\partial F_2}{\partial y_0} \end{pmatrix} \Big|_{\substack{x_0 = x_{(n)}^0 \\ y_0 = y_{(n)}^0 \\ y_0 = y_{(n)}^0 \end{pmatrix}} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$$

$$Tогда$$

$$W^{-1} \mathbb{E}(x)_{(n)}^0, y_{(n)}^0) = \frac{1}{\left|W\mathbb{E}(x)_{(n)}^0, y_{(n)}^0\right|} \cdot \begin{pmatrix} D & -B \\ -C & A \end{pmatrix}$$

$$\Gamma \mathcal{A}e$$

$$A = \frac{\partial F_1}{\partial x_0} \Big|_{x_0 = x_{(n)}^0}, \quad B = \frac{\partial F_1}{\partial y_0} \Big|_{x_0 = x_{(n)}^0}, \quad y_0 = y_{(n)}^0$$

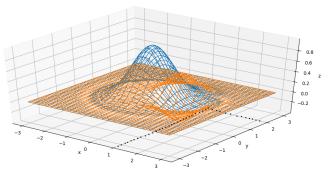
$$C = \frac{\partial F_2}{\partial x_0} \Big|_{x_0 = x_{(n)}^0}, \quad D = \frac{\partial F_2}{\partial y_0} \Big|_{x_0 = x_{(n)}^0}.$$

Таким образом, определение порогов классификации выполняется с использованием выражения (2).

Анализ показал, что для решения системы уравнений (2) целесообразно использовать квазиньютоновские методы (Ньютона-Крылова, Пауэлла и Бройдена), которые основаны на методе Ньютона и менее требовательны к вычислительным ресурсам. С целью выбора метода определения оптимальных порогов классификации используем язык программирования Python 3.

Зададим исходные данные, которые были получены с помощью оборудования «Аппаратнопрограммный комплекс пассивного мониторинга ионосферы NovAtel GPStation-6», для системы уравнений (2): a=1, b=1.5,  $\mu=1$ , w=2,  $C/\rho_1=0,1$ .

Определим начальные приближения искомых порогов с использованием графического метода решения системы уравнений (2) (рисунок 1),



**Рис. 1.** Определение начальных приближений для  $x_0$  и  $y_0$ 

**Таблица 1** Результаты решения оптимизационной задачи

Приближения	Время выполнения					
начальных значений	ſ					
<i>x</i> <sub>0</sub> и <i>y</i> <sub>0</sub>				1		
	Powell	Krylov	Broyden	Powell	Krylov	Broyden
(0.8, 1.9)	(1.22750, 2.27735)	(1.22831, 2.276628)	(1.22796, 2.27703)	0.303	0.142	0.763
(0.9, 1.9)	(1.22750, 2.27735)	(1.22753, 2.277334)	(1.22761, 2.27730)	0.159	0.145	1.224
(1.0, 1.9)	(1.22750, 2.27735)	(1.22825, 2.276986)	(1.22989, 2.275899)	0.139	0.128	1.340
(1.1, 1.9)	(1.22750, 2.27735)	(1.22695, 2.277725)	(1.23013, 2.275843)	0.162	0.153	0.946
(1.2, 1.9)	(1.22750, 2.27735)	(1.22750, 2.277343)	(1.23011, 2.275943)	0.204	0.168	0.872
(0.8, 2.0)	(1.22750, 2.27735)	(1.22750, 2.277354)	(1.22505, 2.27896)	0.134	0.136	1.778
(0.9, 2.0)	(1.22750, 2.27735)	(1.22750, 2.277353)	(1.22994, 2.27602)	0.146	0.149	0.527
(1.0, 2.0)	(1.22750, 2.27732)	(1.22767, 2.277125)	(1.22952, 2.27634)	0.155	0.130	0.450
(1.1, 2.0)	(1.22750, 2.27735)	(1.22749, 2.277355)	(1.22659, 2.27795)	0.117	0.121	0.700
(1.2, 2.0)	(1.22750, 2.27735)	(1.22746, 2.277367)	(1.22765, 2.27711)	0.105	0.080	0.180
(0.8, 2.1)	(1.22750, 2.27735)	(1.22767, 2.277253)	(1.22523, 2.27874)	0.148	0.131	0.241
(0.9, 2.1)	(1.22750, 2.27735)	(1.22692, 2.277527)	(1.22656, 2.27791)	0.125	0.097	0.192
(1.0, 2.1)	(1.22750, 2.27735)	(1.22740, 2.277482)	(1.22723, 2.27735)	0.133	0.097	0.176
(1.1, 2.1)	(1.22750, 2.27735)	(1.22627, 2.277963)	(1.22775, 2.27723)	0.129	0.077	0.109
(1.2, 2.1)	(1.22750, 2.27735)	(1.227699, 2.27715)	(1.22693, 2.27749)	0.106	0.083	0.103
(0.8, 2.2)	(1.22750, 2.27735)	(1.227362, 2.277414)	(1.22797, 2.27713)	0.115	0.093	0.382
(0.9, 2.2)	(1.22750, 2.27735)	(1.227502, 2.277351)	(1.22813, 2.27699)	0.111	0.103	0.161
(1.0, 2.2)	(1.22750, 2.27735)	(1.227503, 2.277351)	(1.22754, 2.27732)	0.082	0.087	0.076
(1.1, 2.2)	(1.22750, 2.27735)	(1.227510, 2.277345)	(1.22669, 2.27782)	0.087	0.065	0.058
(1.2, 2.2)	(1.22750, 2.27735)	(1.22746, 2.277725)	(1.22699, 2.27796)	0.125	0.087	0.156

 Среднее время выполнения

 0.1392
 0.1136
 0.5217

#### Таблица 2

#### Отклонение полученных значений корней $x_0$ и $y_0$

	Powell x	Powell <i>y</i>	Broyden <i>x</i>	Broyden <i>y</i>	Krylov <i>x</i>	Krylov <i>y</i>
СКО	9.711E-11	4.69728E-11	0.00154	0.00089	0.000562	0.00033
Среднее значение	1.22750	2.27735	1.22772	2.27722	1.22747	2.27733

которые находятся соответственно в окрестности значений 1 для  $x_o$  и 2 для  $y_o$ .

С целью выбора метода определения оптимальных порогов проведем исследования алгоритмов решения данной задачи по критериям времени определения оптимальных решений и требуемой точности.

Полученные значения решения оптимизационной задачи представлены в maблице 1.

Полученные решения системы уравнений (2) методами Пауэлла, Ньютона-Крылова и Бройдена являются достаточно близкими, что подтверждает адекватность полученных результатов. Обеспечена точность решения не менее 10-3.

Анализ показал, что лучшей точностью решений обладает метод Пауэлла. Наибольший разброс значений наблюдается в методе Бройдена. Однако метод Ньютона-Крылова является самым быстрым при точности вычислений не хуже  $10^4$ .

Худшим из исследуемых является метод Бройдена. При наибольшем среднем квадратическом отклонении (СКО) найденных корней, он обладает наибольшим временем выполнения (maблицы 1 и 2).

Таким образом, оптимальными порогами классификации являются  $x_o = 1.227$ ,  $y_o = 2.277$ .

Наиболее предпочтительным методом для решения задачи оптимизации порогов класси-фикации является метод Ньютона-Крылова.

#### Выводы

В статье решена задача определения оптимальных порогов классификации для обеспечения работы адаптивных систем радиосвязи, в случае, когда ионосферные флуктуации описываются распределением Накагами.

Наиболее предпочтительным методом определения оптимальных порогов классификации является метод Ньютона-Крылова.



Адекватность результатов подтверждена близостью полученных решений с требуемой точностью методами Пауэлла, Ньютона-Крылова и Бройдена.

В дальнейшем целесообразно провести оптимизацию порогов классификации в случае, когда ионосферные флуктуации описываются обобщенным четырехпараметрическим законом.

#### Литература

- 1. Рекомендация МСЭ-R Р. 531-12 (09/2013) Данные об ионосферном распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования спутниковых служб и систем [Электронный ресурс] // Международный союзх электросвязи. URL: https://www.itu.int/dms\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.531-12-201309-S!!PDF-R.pdf (дата обращения: 28.04.2020).
- 2. Чипига А.Ф., Шевченко В.А. Пашинцев В.П., Костюк Д.М. Оценка энергетической скрытности низкоорбитальной низкочастотной системы спутниковой связи при произвольной кратности пространственно-разнесенного приема // Известия института инженерной физики, 2018. N24(50). С.49-55.
- 3. Евстратов А. Г., Пустовойтов Е. Л. Расчет влияния мешающего радиосигнала на приемник цифровой системы радиосвязи при известных законах распределения быстрых и медленных замираний полезного и мешающего радиосигналов // Т-Comm, 2014. № 5. С.50-55.
- 4. M. Nakagami The m distribution a general formula of intensity of rapid fading // Statistical Methods in Radio Wave Propagation: Proceedings of a Symposium Held at the University of California, (Los Angeles, June 18–20, 1958). New York, 1960. P.3-36
- 5. Рекомендация МСЭ-R Р.618-10 (10/2009). Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем связи Земля-космос [Электронный ресурс] // Международный союз электросвязи. URL: https://www.itu.int/dms\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.618-10-200910-S!!PDF-R.pdf (дата обращения: 28.04.2020).
- 6. А.с. 1585902 СССР, МПК Н 04 В 7/00. Многопараметрическая адаптивная система радиосвязи для передачи дискретной информации / А.Г. Саликов, М.С. Сергеев, В.И. Злобин; заявители: ОАО «Степное», ФГОУ ВПО Ставропольский ГАУ. № 4446492/24-09; заявл. 11.05.88; опубл. 15.08.90. Бюл.30.
- 7. Пат. 2373647 Российская Федерация, МПК Н 04 В 7/185 (2006.01). Способ организации адап-

- тивной спутниковой связи /  $\Lambda$ .В. Когновицкий, Б.С. Мельников, Ш.И. Касымов; патентообладатели  $\Lambda$ .В. Когновицкий, Б.С. Мельников, Ш.И. Касымов. № 2007148875/09; заявл. 29.12.07; опубл. 20.11.09. Бюл. №32.
- 8. Каргашин В. Л. Проблемы обнаружения и идентификации радиосигналов средств негласного контроля информации // Специальная техника, 2000. № 3. С.5-13.
- 9. Кловский Д.Д., Сойфер В.А. Обработка пространственно-временных сигналов (в каналах передачи информации). М.: Связь, 1976. 208 с.
- 10. Теоретические основы радиолокации: учеб. пособие для радиотехн. спец. вузов / Под ред. В.Е. Дулевича. 2-е изд., перераб. и доп. М. :Советское радио, 1978. 607 с.
- 11. Проблемы спутниковой навигации и зондирования поверхности земли / Г.В. Голубков, М.И. Манжелий, А.А. Берлин, А.Н. Морозов, Л.В. Эппельбаум // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия естественные науки, 2018. №1. С.61-70.
- 12. Louis J. Ippolito Jr. Satellite Communications Systems Engineering: Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance. New York, Wiley, 2008. 394 p.
- 13. Новикова Н.М., Ляликова В.Г. Модели параметрических и непараметрических обнаружителей сигналов // Вестник ВГТУ, 2010. №8. С.122-126.
- 14. Непомнящий Г.А. Адаптивное обнаружение сигнала на фоне нестационарной помехи // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника, 2011. №23(240). С.120-123.
- 15. Болденков Е. Н. Лекции по курсу «Основы построения навигационной аппаратуры потребителей СРНС» [Электронный ресурс] // Docplayer.ru. 15.06.2013. URL: https://docplayer.ru/57672689-Lekcii-po-kursu-osnovy-postroeniyanavigacionnoy-apparatury-potrebiteley-srns.html (дата обращения: 28.04.2020).
- 16. Линец Г.И. Методы структурно-параметрического синтеза, идентификации и управления транспортными телекоммуникационными сетями для достижения максимальной производительности: монография. Ставрополь: Издательско-информационный центр «Фабула», 2014. 384 с.
- 17. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. 7-е изд. М.: Бином.  $\Lambda$ аборатория знаний, 2011. 640 с.
- 18. Лемешко Б.Ю. Методы оптимизации: Конспект лекций. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 126 с.





УДК 654.02

**МОДЕЛИРОВАНИЕ** ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ **ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ** УСТРОЙСТВ РЕКУРСИВНОЙ ДИСКРЕТНОЙ ЦЕПЬЮ НА ОСНОВЕ РАБОЧЕЙ ФУНКЦИИ

**MODELING THE TRANSFER FUNCTION OF TELECOMMUNICATION DEVICES** BY A RECURSIVE DISCRETE CIRCUIT **BASED ON THE WORKING FUNCTION** 

#### Юрий Васильевич Рясный

доктор технических наук, профессор профессор кафедры ТЭЦ ФГОБУ ВПО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» Адрес: 630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, д. 86 Тел.: +7 (383) 268-80-22

#### Сергей Леонидович Ремизов

кандидат технических наук начальник Военного учебного центра ФГОБУ ВПО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» Адрес: 630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, д. 86

Тел.: +7 (383) 269-82-96, E-mail: selere1@yandex.ru

Рассмотрен метод определения передаточной телекоммуникационных устройств на основе рабочей функции. В качестве модели рассмотрены рекурсивная цепь только с полюсами и рекурсивная цепь с полюсами и нулями.

Ключевые слова: телекоммуникационное устройство, передаточная функция, рабочая функция, модель, полюс, нуль, АЧХ, погрешность.

#### Summary

The method determination the transfer function of a communication devices on the basis of a working function is considered. As model are considered recursive a circuit only with poles and recursive a circuit with poles and zero. **Keywords:** telecommunications device, transfer function, working function, model, a pole, a zero, ARC, an error.

#### Введение

При моделировании передаточных функций устройств, используемых в телекоммуникационных системах, как правило, используются модели на основе разностных уравнений [1]. Поскольку передаточная функция априори не известна, то параметры модели определяются на основе экспериментальных данных, при этом используются либо регрессионные методы, либо методы адаптивного моделирования, целевой функцией которых является математическое ожидание квадратичного значения сигнала ошибки или рабочая функция [2]. Если входной и выходной сигналы адаптивной системы стационарны, то для системы с адаптивным линейным сумматором рабочая функция, является квадратичной функцией и легко определяется. Для системы с рекурсивной цепью, например цифровой фильтр с бесконечной импульсной характеристикой, БИХ-фильтр, задача определения рабочей функции значительно

усложняется, поскольку в цепи имеются обратные связи. Анализ рабочей функции позволяет установить устойчивость (неустойчивость) адаптивного алгоритма обработки сигналов (цифровой фильтрации) и позволяет определить вид и параметры модели передаточной функции цепи определенной точностью. Целью данной работы является определение рабочих функций моделей телекоммуникационных устройств на основе рекурсивных цепей с полюсами и нулями и только с полюсами, определение по рабочим функциям параметров моделей и погрешностей моделирования.

#### Теория

Рабочая функция для линейного сумматора имеет вид [2]  $\xi = \bar{E}[\bar{\varepsilon}_k^2] = E[d_k^2] + \mathbf{W}^T \mathbf{R} \mathbf{W} - 2\mathbf{P}^T \mathbf{W}$ где  $E[d^2] = E[d,d] -$ корреляционная матрица по-



лезного сигнала;

$$\mathbf{R} = E[X_k X_k^T] = E\begin{bmatrix} x_{0k}^2 & x_{0k} x_{1k} \dots x_{0k} x_{Lk} \\ x_{1k} x_{0k} & x_{1k}^2 \dots x_{1k} x_{Lk} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{Lk} x_{0k} & x_{Lk} x_{1k} \dots & x_{Lk}^2 \end{bmatrix} - (2)$$

 $\mathbf{P} = \mathbf{E}[d_k \mathbf{X}_k^T] = E[d_k \mathbf{x}_{0k} \ d_k \mathbf{x}_{1k} ... \ d_k \mathbf{x}_{1k}] -$ взаимная корреляционная матрица полезного и входного сиг-

 $W = [w_0 w_1 ... w_n]$  – вектор весовых коэффициентов линейного сумматора.

Запишем корреляционную матрицу входного сигнала  $\mathbf{R} = E[\mathbf{X}_{_K} \mathbf{X}^T_{_{_K}}]$ , взаимную корреляционную матрицу  $P = E[\mathbf{d}_{_K} \mathbf{X}^T_{_{_K}}]$  и матрицу полезного сигнала, используя соответственно корреляционные  $r_{cl}(i)$ , и взаимные корреляционные  $r_{cl}(i)$ , функции

$$\mathbf{P} = [r_{gx}(0)...r_{gx}(-L)]^T$$

$$E[d_k^2] = E[d_k d_k] = r_d(0)$$
(3)

$$E[d_k^2] = E[d_k d_k] = r_d \tag{0}$$

Подставим (2), (3), и (4) в (1), сделаем преобразования, получим

$$\begin{split} \xi &= E[\varepsilon_k^2] = E[d_k^2] + \mathbf{W}^T \mathbf{R} \mathbf{W} - 2 \mathbf{P}^T \mathbf{W} = \\ &= r_{dd}(0) + \sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^L w_l w_m r_{xx} (l-m) - 2 \sum_{m=0}^L w_m r_{dx} (-m) \\ \Pi \text{редставим корреляционные } r_{cc}(i), \text{ и взаим-} \end{split}$$

ные корреляционные  $r_{cd}(i)$ , функции через спектральные плотности мощности (энергетические спектры)

ектры) 
$$r_{xx}(l-m) = \frac{1}{2\pi j} \oint_{c} W_{xx}(z) z^{l-m-1} dz$$
 (6) 
$$r_{dx}(-m) = \frac{1}{2\pi j} \oint_{c} W_{dx}(z) z^{-m-1} dz$$
 (7) Тогда уравнение (5) можно записать следую-

$$r_{dx}(-m) = \frac{1}{2\pi j} \oint_{c} W_{dx}(z) z^{-m-1} dz \tag{7}$$

щим образом

$$\xi = E[\varepsilon_k^2] = r_{dd}(0) + \sum_{l=0}^{L} \sum_{m=0}^{L} w_l w_m \frac{1}{2\pi j} \oint_c W_{xx}(z) z^{l-m-1} dz - 2 \sum_{m=0}^{L} w_l \frac{1}{2\pi j} \oint_c W_{dx}(z) z^{-m-1} dz = 1$$

$$\begin{split} &=\frac{1}{2\pi j}\oint_{c}W_{dd}(z)\frac{dz}{z}+\frac{1}{2\pi j}\oint_{c}\left[\sum_{m=0}^{L}w_{i}z'W_{xx}(z)-2W_{dx}(z)\right]\sum_{m=0}^{L}w_{m}z^{-m}\frac{dz}{z}=\\ &=r_{dd}(0)+\frac{1}{2\pi j}\oint_{c}\left[H(z^{-1})W_{xx}(z)-2W_{dx}(z)\right]H(z)\frac{dz}{z} \end{split} \tag{8}$$

Выражение (8) позволяет определить рабочую функцию адаптивной системы с одним входом как для не рекурсивной, так и для рекурсивной цепи.

#### Моделирование

Представим неизвестную систему в виде фильтра нижних частот с передаточной функцией H1(z)

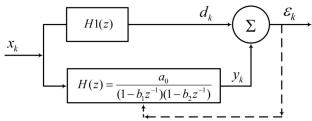


Рис. 1. Адаптивная система идентификации передаточной функции

$$H1(z) = 0.142 + 0.34z^{-1} + 0.34z^{-2} + 0.142z^{-3}$$
 (9)

Идентифицируем передаточную функцию  $H_{\iota}(z)$  неизвестной системы адаптивной рекурсивной цепью второго порядка с передаточной функцией H(z), имеющей только полюсы (рисунок 1)

 $H(z) = \frac{a_0}{(1-b_1z^{-1})(1-b_2z^{-1})}$ . (10) Пусть на вход адаптивной системы подается

произвольный дискретный стационарный случайный сигнал  $x_{\iota}$  (белый шум), на выходе идентифицируемой дискретной цепи при этом имеем сигнал  $d_{\iota}$ , на выходе рекурсивной цепи имеем сигнал  $y_{\iota}$ .

Определим корреляционную функцию входного сигнала

$$r_{kk}(k) = E[x_{xx}^2] = E[x_k x_k] = r_{xx}(0) = \sigma_{xx}^2 \delta(0)$$
 (11)

Определим энергетический спектр входного сигнала

$$W_{xx}(z) = \sum_{k=-\infty 0} r_{xx}(k) z^{-k} = \sigma_{xxk}^2$$
 (12)  
Определим взаимный энергетический спектр

входного сигнала  $x_{\iota}$  и сигнала  $d_{\iota}$ 

$$W_{dx}(z) = H1(z^{-1})W_{xx}(z) = (0.142 + 0.34z + 0.34z^{2} + 0.142z^{3})\sigma_{xx}^{2}$$
 (13)

Определим энергетический спектр выходного сигнала  $d_{\iota}$ 

$$W_{dd}(z) = |H1(z)|^2 W_{xx}(z)$$
.

Зная энергетический спектр выходного сигнала  $d_{i}$ , определяем корреляционную функцию выходного сигнала

$$r_{dd}(0) = \frac{1}{2\pi} \oint W_{dd}(z) \frac{dz}{z} = \left| 0.142 + 0.34z^{-1} + 0.34z^{-2} + 0.142z^{-3} \right|^2 \frac{dz}{z} = 0.272$$
 (14) Приведем выражение рабочей функции с

учетом (13) и (14) 
$$\xi = r_{dd}(0) + \frac{1}{2\pi j} \oint_{c} \left[ H(z^{-1}) W_{xx}(z) - 2W_{dx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z^{-1}) W_{xx}(z) - 2W_{dx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z^{-1}) W_{xx}(z) - 2W_{dx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z^{-1}) W_{xx}(z) - 2W_{dx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z^{-1}) W_{xx}(z) - 2W_{dx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z^{-1}) W_{xx}(z) - 2W_{dx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z^{-1}) W_{xx}(z) - 2W_{dx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z^{-1}) W_{xx}(z) - 2W_{dx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z^{-1}) W_{xx}(z) - 2W_{dx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z^{-1}) W_{xx}(z) - 2W_{dx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z^{-1}) W_{xx}(z) - 2W_{dx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z^{-1}) W_{xx}(z) - 2W_{dx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z^{-1}) W_{xx}(z) - 2W_{dx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z) - W_{xx}(z) - 2W_{xx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z) - W_{xx}(z) - 2W_{xx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z) - W_{xx}(z) - 2W_{xx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z) - W_{xx}(z) - 2W_{xx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z) - W_{xx}(z) - 2W_{xx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z) - W_{xx}(z) - 2W_{xx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z) - W_{xx}(z) - 2W_{xx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z) - W_{xx}(z) - 2W_{xx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z) - W_{xx}(z) - 2W_{xx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z) - W_{xx}(z) - 2W_{xx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z) - W_{xx}(z) - 2W_{xx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \int_{c}^{\infty} \left[ H(z)$$

$$+\frac{1}{2\pi j} \oint_{c} \left[ \frac{{}_{1}a_{0}}{(1-b_{1}z)(1-b_{2}z)} \sigma_{xx}^{2} - 2(0.142+0.34z+0.34z^{2} + (15) + 0.142z^{3}) \sigma_{xx}^{2} \right] \frac{a_{0}}{(1-b_{2}z^{-1})(1-b_{2}z^{-1})} \frac{dz}{z}$$

Находим полюсы рабочей функции 
$$\xi_k$$

 $z_1 = 0, \ z_2 = b_1, \ z_3 = b_2, \ z_4 = \frac{1}{b_1}, \ z_5 = \frac{1}{b_2}$  (16) Полагая, что рекурсивная устойчивая, тог  $b_1 = 1, \ z_4 = \frac{1}{b_1} + 1, \ z_5 = \frac{1}{b_2} + 1$ 

Поскольку полюсы  $z_4 = \frac{1}{b_{11}}$  и  $z_5 = \frac{1}{b_{21}}$  находится вне единичной окружности, то вычеты для них не определяются.

Определим вычеты рабочей функции в полюсах  $z_1 = 0$ ,  $z_2 = b_1$ ,  $z_3 = b_2$  принимая  $a_0 = 1$ ,  $\sigma_{xx}^2 = 1$ 

$$\operatorname{Re} s(\xi) = 0$$

$$z_1 = 0 \tag{17}$$

$$\operatorname{Re}s(\xi) = \frac{b_1}{z_2 = b_1} - \frac{0.284b_1 + 0.64b_1^2 + 0.64b_1^3 + 0.284b_1^4}{b_1 - b_2} (18)$$

$$\operatorname{Re}s(\xi) = \frac{b_2}{(b_2 - b_1)(1 - b_2^2)(1 - b_1b_2)} - \frac{0.284b_2 + 0.64b_1^2 + 0.64b_2^3 + 0.284b_1^4}{b_2 - b_1} (19)$$

$$\operatorname{Re}_{S}(\xi) = \frac{b_2}{(b_2 - b_1)(1 - b_2^2)(1 - b_1 b_2)} - \frac{b_2 - b_1}{b_2 - b_1}$$

Запишем выражение рабочей функции  $\xi_{\mu}$ 



$$\xi = 0.272 + \sum_{i=1}^{3} \operatorname{Re} s_{i}(\xi) = 0 = 272 + \frac{b_{1} + b_{2}}{(b_{1} - b_{2})(1 - b_{2}^{2})(1 - b_{1}^{2})} + \frac{0.284(b_{1} - b_{2}) + 0.64(b_{1}^{2} - b_{2}^{2}) + 0.64(b_{1}^{3} - b_{2}^{3}) + 0.284(b_{1}^{4} - b_{2}^{4})}{b_{2} - b_{1}}$$

$$(20)$$

Из (20) видно, что рабочая функция не квадратичная по отношению к коэффициентам, поэтому имеет несколько локальных минимумов. При  $b_1 = b_2 \rightarrow 1$  и  $b_1 b_2 \rightarrow 1$  алгоритм адаптации становится не устойчивым.

Численными методами были определены минимумы рабочей функции и определены коэффициенты  $b_1$ =0,1056 и  $b_2$ =1,8744.

Зная коэффициенты, найдем выражение

передаточной функции модели 
$$H1(z) = \frac{a_0}{(1 - b_1 z^{-1})(1 - b_2 z^{-1})} = \frac{0.8}{1 - 1.98 z^{-1} + 0.198 z^{-2}}$$
(21)

На рисунках 2а, 26 приведены зависимости АЧХ модели и неизвестной системы и приведены абсолютные погрешности моделирования АЧХ.

Из приведенных результатов видно, что модель на основе рекурсивной цепи второго порядка с полюсами имеет неприемлемо большие погрешности при определении АЧХ цепи.

Идентифицируем передаточную функцию неизвестной системы рекурсивной цепью перво-

го порядка с одним полюсом и одним нулем 
$$H1(z) = \frac{1+a_1z^{-1}}{1-b_1z^{-1}} \tag{22}$$

Найдем выражение рабочей функции, используя предложенный алгоритм

$$\xi = r_{dd}(0) + \frac{1}{2\pi j} \oint_{c} \left[ H(z^{-1}) W_{xx}(z) - 2W_{dx}(z) \right] H(z) \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{1}{2\pi j} \oint_{c} \left[ \frac{1 + a_{1}z}{(1 - b_{1}z)} \sigma_{xx}^{2} - 2(0.142 + 0.34z + 0.34z^{2} + 0.142z^{3}) \sigma_{xx}^{2} \right] \frac{z + a_{1}}{(z - b_{1})} \frac{dz}{z} = 0.272 + \frac{a_{1}}{b_{1}} + \frac{(b_{1} + a_{1})(1 + a_{1}b_{1})}{(1 - b_{1}^{2})b_{1}} - 0.248 \frac{b_{1} + a_{1}}{b_{1}} - \frac{(23)}{b_{1}} + \frac{(23)}{b_{$$

В результате исследования рабочей функции были получены коэффициенты a1 = 0.864 и b2 = 0,452. Передаточная функция имеет вид

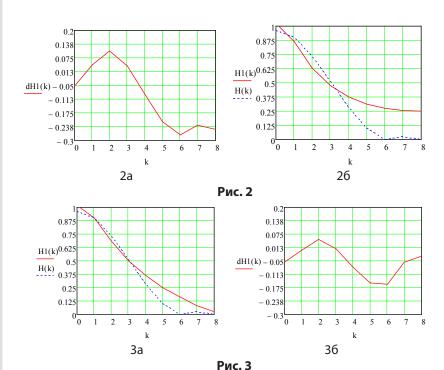
$$H1(z) = 0.3 \frac{1 + 0.864z^{-1}}{1 - 0.452z^{-1}}$$
 (24)  
На *рисунках 3а, 36* приведены зависимости

АЧХ модели и неизвестной системы и приведены абсолютные погрешности АЧХ

Из рисунков видно, что абсолютная погрешность АЧХ модели в виде рекурсивной цепи с одним нулем и одним полюсом в 1,5 раза меньше погрешности АЧХ модели в виде рекурсивной цепи с двумя полюсами.

## Выводы

Поскольку рабочая функция рекурсивной цепи имеет несколько минимумов, то для поиска действительных коэффициентов необходимо исследовать все минимумы, определять коэффициенты для каждого минимума, а полученные для каждых коэффициентов передаточные функции проверять на адекватность. В качестве основной модели априори следует выбирать рекурсивную цепь с нулями и полюсами.



#### Литература

- 1. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Пер. с англ А.С. Манделя и А.В. Назина. Под редакцией Я.З. Цыпкина. М.: Наука, 1991. 432 c.
- 2. Уидроу Б., Стринз С. Адаптивная обработка сигналов / Пер. с англ. Ю.К. Сальникова. Под редакцией В.В. Шахгильдяна. М.: Радио и связь, 1988. 440 c.





**УДК 621.391** 

ВЕРХНЯЯ АДДИТИВНАЯ
ГРАНИЦА ВЕРОЯТНОСТИ
ОШИБКИ В КАНАЛЕ СВЯЗИ
В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ
СЛУЧАЙНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ
ПОМЕХИ И БЛОКОВЫХ
ЗАМИРАНИЙ

A UNION BOUND ON ERROR
PROBABILITY IN THE
COMMUNICATION CHANNEL
UNDER THE INFLUENCE OF
RANDOM IMPULSE NOISE AND
BLOCK FADING



Вячеслав Анатольевич Шевченко кандидат технических наук

каноиоат технических нау начальник отдела –

заместитель начальника управления Департамент информационных систем Министерство обороны Российской Федерации Адрес. 119160, Москва, ул. Знаменка, д. 19

Тел. +7 (916) 138-87-96 E-mail: shevv67@mail.ru

#### Аннотация

Рассмотрены каналы связи с двоичным кодированием, функционирующие в условиях наличия блочных замираний принимаемых сигналов и воздействия случайной импульсной помехи. Получена верхняя аддитивная граница вероятности ошибки на бит в таких каналах.

**Ключевые слова:** вероятность ошибки, верхняя аддитивная граница, пакет ошибок, канал связи, метрика, кодирование, замирания, импульсная помеха.

#### Summary

Coded channels, performing in presence of block fading of received signals while being affected by random pulse interference have been analyzed. An additive upper bound on the bit error probability has been found for such channels.

Keywords: error probability, union bound, package errors, channel, metric, coding, fading, pulsed noise.

Известен метод вычисления асимптотически точных верхних границ вероятности ошибки на бит в каналах связи с группированием ошибок в пакеты переменной длины [1]. Под пакетом понимается совокупность символов одной кодовой комбинации, при передаче которых статистическое состояние канала не изменяется. Данный метод является общим и требует конкретизации для случая, когда группирование ошибок вызвано комплексным воздействием случайной импульсной помехи и блочных замираний.

Рассмотрим канал связи, в котором для передачи информации используется блочный (n,k) код, имеющий скорость r=k/n и минимальное расстояние  $d_{\min}$ . Дистанционные свойства кода характеризуются коэффициентами  $A_d=dC_d/n$ , где  $G_d$ - количество кодовых комбинаций весом d.

"Кодовая комбинация состоит из символов кода  $x_i$ , где  $i = \overline{1,n}$ , и образует последовательность  $\mathbf{x} = (x_i, x_2, \dots, x_n)$ . Символы кода могут прини-

мать одно из целых чисел от 0 до M-1, где M – объем алфавита символов кода.

Прошедшему перемежение символу  $x_i$  модулятор ставит в соответствие сигнал  $S_{x_i}(t)$  — одному из набора ортогональных сигналов  $\{S_0(t), S_I(t), ..., S_{M-I}(t)\}$ .

На вход приемника поступает смесь полезного сигнала с замираниями, импульсной помехи и теплового шума.

Энергия сигнала, приходящаяся на бит информации, на входе демодулятора определяется величиной  $E_{\scriptscriptstyle h}$ .

Тепловой шум n(t) представляет собой аддитивный белый гауссовский шум с односторонней спектральной плотностью  $N_{\varrho}$ .

Замирания являются мультипликативной помехой, в результате воздействия которой интенсивность сигнала  $\varepsilon$  становится случайной.

Отношение энергии сигнала, приходящейся на символ кода, к спектральной плотности шума



при замираниях имеет среднее значение

$$\overline{\gamma}_{sn}^2/2 = r \log_2 M \Omega E_b/N_0 , \qquad (1)$$

где  $\Omega$  – среднеквадратическое значение амплитуды сигнала. При расчете энергетического бюджета радиолинии величину  $\Omega$  следует учитывать в качестве дополнительных потерь.

Время когерентности канала связи определяет количество кодовых символов  $B_{\rho}$ , в течение передачи которых интенсивность сигнала остается постоянной.

Излучение помехи осуществляется импульсами со спектральной плотностью  $N/\rho$  в течение части времени  $\rho$ . Во время оставшейся части 1- $\rho$ времени импульсная помеха не излучается.

Учитывая, что импульсная помеха является случайной, канал связи находится в одном из двух состояний z: в «плохом» (z=1 с вероятностью  $\rho$ ), когда на вход приемника поступает случайная импульсная помеха в сочетании с тепловым шумом, или в «хорошем» (z=0 с вероятностью  $1-\rho$ ), когда на входе приемника присутствует только тепловой шум.

В качестве преднамеренных помех принято рассматривать многочастотную и шумовую.

Шумовая импульсная помеха во время излучения представляет собой аддитивный белый гауссовский шум.

Отношение энергии сигнала, приходящейся на символ кода, к суммарной спектральной плотности теплового шума и шумовой помехи в

(2)

состоянии канала z имеет среднее значение  $\overline{\gamma}^2(z) = 1/(1/\overline{\gamma}_{sn}^2 + z/\gamma_{sJ}^2)^{-1}$ , где  $\frac{\overline{\gamma}_{sJ}^2}{2} = \frac{\Omega E_b}{N_J/\rho} r \log_2 M \; .$ (3)

Многочастотная помеха формируется из множества узкополосных помех, которые перекрывают все частотные позиции, отведенные для перестройки рабочей частоты полезного сигнала, и в каждой позиции совпадает по форме с одним из сигналов, отличаясь от них начальной фазой.

Отношение энергии многочастотной помехи к спектральной плотности шума определяется величиной

$$\gamma_{Jn}^2/2 = M \,\overline{\gamma}_{sn}^2/\overline{\gamma}_{sJ}^2 \tag{4}$$

и не зависит от глубины замираний.

Примем, что одиночный импульс помехи перекрывает  $B_{I}$  символов кода.

Статистику второго порядка для комплексного воздействия на канал связи импульсных помех и замираний охарактеризуем величинами

$$\hat{B} = \max(B_f, \hat{B}_J), \ \hat{B}_p = \min(B_f, B_J).$$
 (5)

При псевдослучайном перемежении с глубиной m ≤ B, как показано в [1], возникают сдвоенные пакеты (блоки) либо одинаковой длины b=B/m, либо с длинами b-1 и b+1. На интервале передачи одной кодовой комбинации возможно возникновение  $P=\mid n/2b\mid$  таких блоков. Кроме того, в случае, когда длина кода не делится на величину 2b без остатка, существует блок длины n-2bP. Пакеты в составе таких блоков назовем внешними.

В пределах внешнего пакета происходит группирование ошибок во внутренние пакеты со средней длиной  $b_{\scriptscriptstyle h} = B_{\scriptscriptstyle m}/m$ .

Поскольку статистические характеристики состояния канала являются стационарными и одинаковы для всех пакетов, то в дальнейшем будем пользоваться обозначениями z и c без указания индексов принадлежности к определенному пакету.

В демодуляторе принятая канальная последовательность, состоящая из смеси сигнала с замираниями, теплового шума и импульсной помехи, обрабатывается в детекторах, соответствующих набору сигналов  $\{S_0(t), S_1(t), ..., S_{M-1}(t)\}.$ 

На выходе этих детекторов сигналов по окончанию приема i-го символа кода формируется вектор  $Y = (Y_{0i}, Y_{1i}, ..., Y_{M-1i}).$ 

Декодирование производится на основе решений демодулятора с использованием метрики  $m(\mathbf{Y},x,c,z)$ .

Под воздействием помехи, замираний и (или) теплового шума возможна трансформация кодовой последовательности  $\boldsymbol{x}$  в последовательность  $\hat{\mathbf{x}} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, ..., \hat{x}_n)$ , отличающуюся от переданной dсимволами кода.

Верхняя аддитивная граница вероятности

$$P_b \le \sum_{d=d}^{n} A_d P_d \left( E_{\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{x}} \right), \tag{6}$$

ошибки на бит имеет вид  $P_b \leq \sum_{d=d_{\min}}^{n} A_d P_d \left( E_{\hat{\mathbf{x}},\mathbf{x}} \right), \tag{6}$  где  $P_d \left( E_{\hat{\mathbf{x}},\mathbf{x}} \right)$  – вероятность ошибочного приема кодовой комбинации  $\hat{\mathbf{x}}$  с расстоянием Хэмминга d вместо переданной x.

Пусть d-i ошибочных символов содержится в P блоках длиной 2b, а остальные i – в блоке длиной n-2bP (в P+1 блоке). Производящую функцию моментов разности метрик для принятых ошибочно и переданных символов кода в P+1блоке обозначим как  $D_1(s,i,n-2bP)$ , производящая функцию разности метрик для d ошибочных символов при их распределении по Р блокам длиной 2b – как  $\tilde{D}_{p}(s,d,2b)$ . Производящие функции моментов разности метрик ошибок для блоков и пакетов назовем весовыми функциями.

В этом случае вероятность ошибочного приема кодовой комбинации в выражении (6) опре-

деляется выражением [1] 
$$P_d\left(E_{\hat{\mathbf{x}},\mathbf{x}}\right) \leq \frac{1}{C_n^d} \min_{i=\max(0,d-2bP)}^{\min(d,n-2bP)} C_{2bP}^{d-i} C_{n-2bP}^i \tilde{D}_1\left(s,i,n-2bP\right) \tilde{D}_P\left(s,d-i,2b\right), \tag{7}$$

где



$$\tilde{D}_{P}(s,d,2b) = \frac{(2bF-d)!F!}{(2bF)!} \sum_{l=[d/(2b)]}^{F} \frac{A(d,l;\tilde{\mathbf{g}} = (\tilde{g}_{1},\tilde{g}_{2},...,\tilde{g}_{d-l+1}))}{(F-l)!},$$

$$F = min(d, P). \tag{8}$$

Формула для расчета v-го элемента последовательности  $\tilde{\mathbf{g}}$  в выражении (8) имеет вид

$$\tilde{g}_{v} = \tilde{D}_{1}(s, v, 2b)(2b)!/(2b-v)!.$$
 (9)

где весовой функцией блока длиной 2b является  $\tilde{D}_{1}(s,v,2b) = \frac{1}{C_{2b}^{v}} \left( \Delta \tilde{D}_{1}(s,v,2b) + \sum_{i=\max(0,k=v-b)}^{\min(v,b-1)} \left( p_{b,b} C_{b}^{i} C_{b}^{v-i} D_{1}(s,i;b) D_{1}(s,v-i;b) + + \left( 1 - p_{b,b} \right) C_{b-1}^{i} C_{b+1}^{v-i} D_{1}(s,i;b-1) D_{1}(s,v-i;b+1) \right) \right), \qquad (10)$   $\Gamma \mathcal{A}e$   $\Delta \tilde{D}_{1}(s,v,2b) = \begin{cases}
0, & v < b, \\
p_{b,b} D_{1}(s,b;b), & v = b, \\
p_{b,b} D_{1}(s,1;b) D_{1}(s,b;b) + \left( 1 - p_{b,b} \right) D_{1}(s,b+1;b+1), & v = b+1, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v = b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, & v < b, \\
0, & v < b, \\$  $p_{b,b}C_b^{v-b}D_1\left(s,v-b;b\right)D_1\left(s,b;b\right)+$  $\Big| + \Big(1 - p_{b,b}\Big) C_{b-1}^{v-b-1} D_1 \Big(s, v-b-1; b-1\Big) D_1 \Big(s, b+1; b+1\Big), \quad v > b+1.$ 

В выражениях (10), (11)  $p_{b,b} = (2P+1)/(4P)$  – вероятность появления блока из пакетов одинаковой длины,  $D_{t}(s,v,b), D_{t}(s,v,b-1), D_{t}(s,v,b+1)$  – весовые функции внешних пакетов весом v и длиной b, b-1, b+1 соответственно.

Весовая функция P+1 блока длиной n-2bP и весом i имеет вид [1]

$$\tilde{D}_1(s,i,n-2bP) =$$

$$D_{1}(s,i,n-2DT) = \begin{cases} D_{1}(s,i;n-bL), & L-\text{четное}, \\ \frac{1}{C_{b+n-bL}^{i}} \sum_{k=\max(0,i-b)}^{\min(i,n-bL)} C_{n-2bL}^{k} C_{b}^{i-k} D_{1}(s,k;n-bL) D_{1}(s,i-k;b), & L-\text{нечетное}. \end{cases}$$
(12)

В выражении (12) L = |n/b| – количество пакетов длиной b в пределах кодовой комбинации длиной  $n, D_{t}(s,v,n-bL)$  – весовая функция внешнего пакета весом v и длиной n-bL.

Конкретизируем выражение для весовых функций внешних пакетов различной длины для случая, когда состояние канала связи определяется параметрами  $e_{i,l}$ ,  $\boldsymbol{e}_{i,2}$ .

Состоянию  $e_{j,l}$  соответствуют j-й внешний пакет со средней длиной b. Внутренние пакеты ошибок, соответствующие состоянию  $\boldsymbol{e}_{i,2}$ , имеют меньшую среднюю длину  $b_{p}$ . Примем, что

$$b = pb_{b}, (13)$$

где p – некоторое целое число. Совокупность состояний  $e_{i,2}^{(k)}$ , где  $k = \overline{1,p}$ , в которых канал связи находится при передаче k-го внутреннего пакета в пределах j-го внешнего пакета, образует последовательность состояний  $e_{ij}$ .

Поскольку статистические характеристики состояния канала являются стационарными и одинаковы для всех пакетов, то в дальнейшем в обозначениях  $e_{j,1}$  и  $e_{j,2}^{(k)}$  опустим индексы принадлежности к определенному пакету и будем пользоваться обозначениями  $\boldsymbol{e}_{\scriptscriptstyle 1}$  и  $\boldsymbol{e}_{\scriptscriptstyle 2}$ .

Весовая функция внутреннего пакета весом v при скалярном значении  $e_{\scriptscriptstyle 2}$  определяется выражением

$$D_{1}^{(i)}(s, v; e_{1}) = E_{e_{2}}(\Phi_{\Omega_{1}}^{v}(s; e_{1}, e_{2})),$$
(14)

где  $\Phi_{\Omega_{l}}(s;c,z)$  – производящая функция моментов разности метрик принятого ошибочно  $\hat{x}_i$  и переданного х, символов, кода

$$\Omega_1 = m(\mathbf{Y}_i, \hat{\mathbf{x}}_i; e_1, e_2) - m(\mathbf{Y}_i, \mathbf{x}_i; e_1, e_2). \tag{15}$$

Производящая функция моментов и плотность распределения  $p_{\Omega_1}(\omega_1;e_1,e_2)$  случайной величины  $\Omega_{I}$ , которая изменяется в пределах от  $w_l^{min}$  до  $w_l^{max}$ , связаны соотношением

$$\Phi_{\Omega_{l}}(s;e_{1},e_{2}) = \int_{\omega_{l}^{\min}}^{\omega_{l}^{\max}} \exp(s\omega_{l}) p_{\Omega_{l}}(\omega_{l};e_{1},e_{2}) d\omega_{l} . (16)$$

Рассмотрим внешний пакет весом v, длиной xи содержащий у внутренних пакетов длиной  $b_{b}$ .

Для нахождения весовой функции такого внешнего пакета воспользуемся выражением (7), которое определяет производящую функцию моментов разности метрик для d ошибок при их разбиении по P блокам длиной 2b, путем замены d на v, 2b – на  $b_b$ , P – на y.

Тогда
$$D_{1}(s,v,x) = E_{e_{1}}(W(s,v,y,b_{p},x;e_{1})), x \ge yb_{p}, \quad (17)$$

$$W(s, v, y, b_p, x; e_1) = \frac{1}{C_x^v} \sum_{k=\max(0, v-y b_p)}^{\min(v, x-y b_p)} C_{x-y b_p}^k C_{y b_p}^{v-k} D_1^{(i)}(s, k; x-y b_p; e_1) D_y^{(i)}(s, v-k; b_p; e_1)$$
(18)

В выражении (18)

$$D_{y}^{(l)}(s, v-k=q, b_{p}; e_{1}) = \frac{\left(b_{p}F_{p}-q\right)!F_{p}!}{\left(b_{p}F_{p}\right)!} \sum_{l=\left[q/b_{p}\right]}^{F_{p}} \frac{A\left(q, l, \mathbf{g}^{(l)} = \left(\mathbf{g}_{1}^{(l)}, \mathbf{g}_{1}^{(l)}, \dots, \mathbf{g}_{q-l+1}^{(l)}\right)\right)}{\left(F_{p}-l\right)!},$$

$$F_{p}=min(q, y), \tag{19}$$

где r-й элемент последовательности  $\mathbf{g}^{(i)}$  с учетом

формулы (14) определяется выражением
$$g_r^{(i)} = \frac{b_p!}{\left(b_p - r\right)!} D_1^{(i)}(s, r; e_1) = \frac{b_p!}{\left(b_p - r\right)!} E_{e_2}\left(\Phi_{\Omega_1}^r\left(s; e_1, e_2\right)\right) \cdot (20)$$

Определим количество внутренних пакетов у для внешних пакетов с длинами b, b-1, b+1, n-bL.

Когда блок состоит из внешних пакетов одинаковой длины b, каждый такой пакет, как следует из выражения (13), содержит р внутренних длиной  $b_i$ 

Когда блок состоит из внешних пакетов с длинами b+1 и b-1, в каждом из внешних пакетов имеется p-1 внутренний пакет длиной  $b_{_{b}}$ . Кроме того, во внешнем пакете меньшей длины имеется внутренний пакет длиной  $b_{b}$ -1=b-1- $b_{b}$ (p-1), во внешнем пакете большей длины – внутренний пакет длиной  $b_{b}+1=b+1-b_{b}(p-1)$ .

Когда внешний пакет имеет длину n-bL, число внутренних пакетов длиной  $b_{_{p}}$  определяется величиной  $q = |(n-bL)/b_p|$ . (21)

Таким образом, при использовании выражения (17) следует учитывать следующее соответствие между длиной внешнего пакета x и количеством внутренних пакетов у:



$$y = \begin{cases} p, & x = b, \\ p - 1, & x = b - 1, \\ p - 1, & x = b + 1, \\ q = \lfloor (n - bL)/b_p \rfloor, & x = n - bL. \end{cases}$$
(22)

Рассмотрим некоторые частные случаи. При v=1 с учетом тождества [2]

$$A(v,1;\mathbf{g}^{(i)}) = g_v^{(i)} \tag{23}$$

примет вид 
$$D_{y}^{(i)}\left(s,1-k=q,b_{p};e_{1}\right)=\frac{\left(b_{p}-q\right)!}{\left(b_{p}\right)!}A\left(q,1,\mathbf{g}^{(i)}\right)=D_{1}^{(i)}\left(s,1-k=q,b_{p};e_{1}\right),$$
 
$$F_{b}=1. \tag{24}$$

 $F_{p} = I$ . (24) Подставив выражение (24) в выражение (18), при v=1 получим

$$W(s, v = 1, y, b_p, x; e_1) = \frac{yb_p D_1^{(i)}(s, 1, b_p; e_1) + (x - yb_p) D_1^{(i)}(s, k; x - yb_p; e_1)}{x} = \frac{yb_p D_1^{(i)}(s, 1, b_p; e_1) + (x - yb_p) D_1^{(i)}(s, k; x - yb_p; e_1)}{x} = \frac{yb_p D_1^{(i)}(s, 1, b_p; e_1) + (x - yb_p) D_1^{(i)}(s, k; x - yb_p; e_1)}{x} = \frac{yb_p D_1^{(i)}(s, 1, b_p; e_1) + (x - yb_p) D_1^{(i)}(s, k; x - yb_p; e_1)}{x} = \frac{yb_p D_1^{(i)}(s, 1, b_p; e_1) + (x - yb_p) D_1^{(i)}(s, k; x - yb_p; e_1)}{x} = \frac{yb_p D_1^{(i)}(s, 1, b_p; e_1) + (x - yb_p) D_1^{(i)}(s, k; x - yb_p; e_1)}{x} = \frac{yb_p D_1^{(i)}(s, 1, b_p; e_1) + (x - yb_p) D_1^{(i)}(s, k; x - yb_p; e_1)}{x} = \frac{yb_p D_1^{(i)}(s, 1, b_p; e_1) + (x - yb_p) D_1^{(i)}(s, k; x - yb_p; e_1)}{x} = \frac{yb_p D_1^{(i)}(s, k; x - yb_$$

$$=E_{e_2}\left(\Phi_{\Omega_1}\left(s;e_1,e_2\right)\right). \tag{25}$$

С учетом (25) весовая функция (17) при v=1примет вид

$$D_{1}(s, v = 1, x) = E_{e_{1}}(E_{e_{2}}(\Phi_{\Omega_{1}}(s; e_{1}, e_{2}))).$$
(26)

Рассмотрим случай, когда ошибки во внутреннем пакете являются независимыми ( $b_{i}=1$ ).

В выражении (18) при  $b_b = 1$  количество внутренних пакетов во внешнем определяется величиной y = x, так что

$$W(s, v, y = x, b_p = 1, x; e_1) = D_x(s, v, 1; e_1),$$
  $F_p = v,$  (27) Используя тождества [2] 
$$A(v, v; \mathbf{g}^{(i)}) = (g_1^{(i)})^v,$$
 (28)

$$A(\mathbf{v}, \mathbf{v}; \mathbf{g}^{(i)}) = (\mathbf{g}_1^{(i)})^{\mathbf{v}}, \tag{28}$$

где согласно (20) при 
$$b_{p}=I$$
 
$$g_{1}^{(i)}=E_{e_{2}}\left(\Phi_{\Omega_{1}}\left(s;e_{1},e_{2}\right)\right), \tag{29}$$

из выражения (14) для правой части выражения (27) получим

$$D_{x}(s, v, 1; e_{1}) = E_{e_{2}}^{v}(\Phi_{\Omega_{1}}(s; e_{1}, e_{2})). \tag{30}$$

Подставив выражение (30) в выражение (18), последнее – в выражение (17), будем иметь

$$D_{\rm l}\left(s,v,x\right) = E_{\rm e_l}\left(\left(E_{\rm e_2}\left(\Phi_{\Omega_{\rm l}}\left(s;e_{\rm l},e_{\rm 2}\right)\right)\right)^{\nu}\right). \tag{31}$$
 Как следует из выражения (31), весовая функ-

ция пакета при  $b_b = 1$  не зависит от длины и определяется только его весом v.

Рассмотрим случай, когда внутренние и внешние пакеты имеют одинаковую длину x.

Выражение (18) в сочетании с выражением (19) при  $pb_{_{p}}$ =x, когда p=1, сводится к следующе-

 $W(s, v, p = 1, b_p = x, x; e_1) = D_1^{(i)}(s, v; b_p = x; e_1), (32)$ где с учетом тождества (23) и формулы (20).

$$D_{1}^{(i)}(s,v;b_{p}=x;e_{1}) = \frac{(x-v)!}{x!}A(v,1,\mathbf{g}^{(i)}) = E_{e_{2}}(\Phi_{\Omega_{1}}^{v}(s;e_{1},e_{2})). \tag{33}$$
 Подставив выражение (33) в выражение (18),

а последнее – в выражение (17), получим

$$D_1(s,v,x) = E_{e_1} \left( E_{e_2} \left( \Phi^v_{\Omega_1}(s;e_1,e_2) \right) \right)$$
. (34)  
Как следует из выражения (34), весовая функ-

ция пакета при  $b_b = x$  также не зависит от длины и определяется только его весом v.

Применим полученные выражения к случаю комплексного воздействия на канал связи импульсной помехи и замираний.

Рассмотрим следующие варианты воздействия на канал связи:

- внешние пакеты вызваны замираниями  $(e_t = c)$ , внутренние – воздействием импульсной помехи  $(e_2=z)$ ;
- внешние пакеты вызваны воздействием импульсной помехи ( $e_1$ =z), внутренние – замираниями  $(e_2 = c)$ .

В первом случае весовая функция внутреннего пакета (14) примет следующий вид:

$$D_{i}^{(i)}(s, \nu; c) = E_{z}(\Phi_{\Omega_{i}}^{\nu}(s; c, z)) = (1 - \rho)\Phi_{\Omega_{i}}^{\nu}(s; c, z = 0) + \rho\Phi_{\Omega_{i}}^{\nu}(s; c, z = 1),$$
(3.5)

весовая функция внешнего пакета (17) - следующий:

 $D_{1}(s,v,x) = \int_{0}^{\infty} W(s,v,y,b_{p},x;c) p_{c}(c) dc, \quad (36)$  где  $p_{c}(c)$  – плотность распределения интенсивно-

 $W(s,v,p,b_p,x;c)$  – функция, которая определяется выражением (18) совместно с (19).

Во втором случае весовой функцией внутреннего пакета (14) является

$$D_{\rm l}^{(i)}(s,v;z) = \int_0^\infty \Phi_{\Omega_{\rm l}}^v(s;c,z) p_c(c) dc \cdot$$
 весовой функцией внешнего пакета (17)

$$D_1(s,v,x) = (1-\rho)W(s,v,y,b_p,x;z=0) + \rho W(s,v,y,b_p,x;z=1).(38)$$

Когда получить замкнутое выражение для интегралов (37) и (38) затруднительно, применимы численные методы.

Квадратурные формулы Гаусса-Кристоффеля являются формулами наивысшего алгебраического порядка точности [3]. Когда одна граница интегрирования является бесконечной, разновидностью указанных формул является квадратурная формула Лаггера [3]

$$\int_{0}^{\infty} \exp(-x) f(x) dx \approx \sum_{i=1}^{n} A_{i} f(x_{i}).$$
 (39)

За узлы в выражении (39) принимаются корни многочлена Лаггера  $L_n(x)$ , а весовые коэффициенты подсчитываются по формуле [3]

$$A_{i} = \left(\frac{(n-1)!}{nL_{i-1}(x_{i})}\right)^{2} x_{i}$$
 (40)

$$R_{n} = \frac{\left(n!\right)^{2}}{(2n)!} f^{(2n)}\left(\zeta\right), \quad \zeta \in \left(0, \infty\right). \tag{41}$$

 $A_{i} = \left(\frac{(n-1)!}{nL_{i-1}(x_{i})}\right)^{2} x_{i} \tag{40}$  Остаточный член формулы имеет вид [3]:  $R_{n} = \frac{(n!)^{2}}{(2n)!} f^{(2n)}(\zeta), \ \zeta \in (0,\infty) \cdot \tag{41}$  Как показали исследования [4], плотность распределения амплитуды и, соответственно, интенсивности сигнала в трансионосферном канале связи наиболее хорошо описывается Накагами-т распределением



$$p_c(c) = \frac{m^m c^{m-1}}{\Gamma(m)} \exp(-mc), c \ge 0, \tag{42}$$

где m – параметр. При m>1, которое выполняется в подавляющем числе случаев для трансионосферного канала связи, Накагами-m распределение достаточно близко аппроксимируется распределением Райса [5]

$$p_c(c) = (1+K)\exp[-K-(1+K)c]I_0(2\sqrt{K(1+K)c}), \quad c \ge 0$$
, (43)

где K – параметр, варьирующийся от 0 до  $\infty$  и преставляющий отношение регулярной и флуктуацционой составляющих сигнала.

Распределение Релея соответствует глубоким замираниям и является частным случаем распределений Райса (43) при K=0 и Накагами- m (42) при m=1.

Для конкретных метрик в выражения (35), (37) подставляются соответствующие выраже-

ния для производящих функций моментов разности метрик из таблицы 1 (случай воздействия шумовой помехи для  $z_j$ =0 и  $z_j$ =1, многочастотной помехи для  $z_j$ =0) и 2 (случай воздействия многочастотной помехи) [6-10].

На рисунках 1-6 приведены зависимости вероятности ошибки на бит  $P_b$  от отношения энергии  $E_b$  сигнала, приходящейся на бит информации, к спектральной плотности  $N_J$  наихудшей случайной импульсной шумовой помехи, для релеевских (K=0) и райсовских (K=5) замираний при использовании для декодирования по максимуму правдоподобия двоичного расширенного кода БЧХ  $(n=128,\ k=22)$  различных метрик (с оптимальным взвешиванием, обобщенной самонормализующейся и с логарифмическим ограничением). Предполагается, что мягкие решения на выходе некогерентного демодулятора формируются детекторами огибающей. Макси-

**Таблица 1**Производящие функции моментов разности метрик для условий воздействия на канал связи шумовой помехи

производищие функции мом	оментов разности метрик для условии воздеиствия на канал связи шумовои помехи			
Метрика	$\Phi_{\Omega_{ m l}}\left(s;c,z ight)$			
с адаптивным взвешиванием мягких решений				
квадратичного детектора	$z\frac{1}{1-4s^2}\exp\left(-c\frac{\overline{\gamma}^2(1)}{2}\frac{2s}{1+2s}\right)$			
детектора «огибающей»	$z \exp\left(-\frac{\overline{\gamma}^{2}(1)}{2}\right) FS(s) FS_{-}E\left(\sqrt{\gamma^{2}(1)}, s\right)$ $FS(s) = 1 + s\sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp\left(\frac{s^{2}}{2}\right) \left(1 + erf\left(\frac{s}{\sqrt{2}}\right)\right)$ $FS_{-}E\left(p = \sqrt{2t}, s\right) = \exp\left(\frac{s^{2}}{4}\right) \sum_{i=0}^{\infty} t^{i} B_{i}U\left(2i + 3/2, s\right).$ $B_{i} = \frac{(2i+1)}{i} B_{i-1}, B_{0} = 1, U(n+1/2, s) = \frac{U(n-3/2, s) - sU(n-1/2, s)}{n},$ $U\left(-1/2, s\right) = \exp\left(-s^{2}/4\right), U\left(1/2, s\right) = \sqrt{\pi/2} \exp\left(s^{2}/4\right) erfc\left(s/\sqrt{2}\right)$ $FS_{-}E\left(p, s\right) = \sqrt{\frac{\pi}{2p}} \exp\left(\frac{(s-p)^{2}}{4}\right) \left(V\left(1, p - s\right) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\prod_{k=1}^{i} (2i-1)!}{i!(8p)^{i}} V\left(1 - i, p - s\right)\right),$ $V(a, x) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi x}} x^{a} \exp\left(x^{2}/4\right) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{c_{k}}{x^{2k}}, c_{k} = \frac{(a-2k+3/2)(a-2k+1/2)}{2k} c_{k-1}, c_{0} = 1$			
с объединением статистических величин отношения $f(u) = \begin{cases} \sqrt[n]{(1-u)/u} - 1, & 0 \le u \le 0,5 \\ 1 - \sqrt[n]{u}/(1-u), & 0,5 \le u \le 1 \end{cases}$	$\int_{0}^{1} \left(1+c\frac{\overline{\gamma}^{2}(z)}{2}u\right) \exp\left(sf\left(c^{-1}(u)\right)-c\frac{\overline{\gamma}^{2}(z)}{2}(1-u)\right) du$			
обобщенная «самонормализующаяся»				
$f(u) = 1 - 2(1 + \sqrt[m]{1/u - 1})^{-1}$				
с «логарифмическим ограничением»	$\exp\left(-c\frac{\overline{\gamma}^2(z)}{2}\right)2^{-s}\Gamma(1-s){}_1F_1\left(1-s,1;c\frac{\overline{\gamma}^2(z)}{2}\right)$			
с жесткими решениями	$(1 - p_s(z)) \exp(-s) + \frac{p_s(z)}{M - 1} (M - 2 + \exp(s)),$ $p_s(z) = \frac{1}{M} \sum_{i=2}^{M} (-1)^i C_M^i \exp\left(-c \frac{\overline{\gamma}^2(z)}{2} \left(1 - \frac{1}{i}\right)\right).$			

Таблица 2

Производящие функции моментов разности метрик для условий воздействия на канал связи многочастотной помехи

Метрика	$\Phi_{\Omega_{\rm l}}\left(s;c,z=1\right)$
с адаптивн	ым взвешиванием мягких решений
квадратичного детектора	$\frac{1}{M} \frac{\exp\left(-\tilde{n}\frac{\overline{y}_{sm}^{2}}{2}\frac{2s}{1+2s}\right)}{\left(1-4s^{2}\right)} \times \left(\exp\left(-\frac{y_{Jm}^{2}}{2}\frac{2s}{1+2s}\right)I_{0}\left(2\sqrt{c}\frac{\overline{y}_{sm}^{2}}{2}\frac{y_{Jm}^{2}}{2}\frac{2s}{1+2s}\right) + \exp\left(\frac{y_{Jm}^{2}}{2}\frac{2s}{1-2s}\right) + M - 2\right)$
детектора «огибающей»	$\frac{1}{M} \left( FS(s) \int_{0}^{\pi} \exp\left(-\frac{\gamma^{2}(\cos\varphi)}{2}\right) FS_{-}E\left(\sqrt{\gamma^{2}(\cos\varphi)}, s\right) d\varphi + \exp\left(-\frac{\overline{\gamma}_{sn}^{2}}{2}\right) FS_{-}E\left(\sqrt{\overline{\gamma}_{sn}^{2}}, s\right) \left( FS_{-}E\left(\sqrt{\gamma_{Jn}^{2}}, -s\right) + (M-2)FS(s)\right) \right).$ $\gamma^{2}(\cos\varphi) = c\overline{\gamma}_{sn}^{2} + \gamma_{Jn}^{2} + 2\sqrt{c\gamma_{sn}^{2}\gamma_{Jn}^{2}}\cos\varphi$
с объединением статистических	$\frac{1}{2} \left( \int_{-\infty}^{1} \exp \left( sf\left(c^{-1}(u)\right) - \frac{c\overline{\gamma}_{sn}^{2} + \gamma_{sn}^{2}}{sn} (1-u) \right) \times \right)$
величин отношения $f(u) = \begin{cases} \sqrt[m]{(1-u)/u} - 1, & 0 \le u \le 0,5 \\ 1 - \sqrt[m]{u/(1-u)}, & 0,5 \le u \le 1 \end{cases}$	$\times \left[ \left( 1 + \frac{c\overline{\gamma_{sn}^2} + \gamma_{Jn}^2}{2} u \right) I_0 \left( 2\sqrt{\frac{c\overline{y_{sn}^2} + \gamma_{Jn}^2}{2}} (1 - u) \right) - 2\sqrt{\frac{c\overline{\gamma_{sn}^2} + \gamma_{Jn}^2}{2}} u I_1 \left( 2\sqrt{\frac{c\overline{y_{sn}^2} + \gamma_{Jn}^2}{2}} (1 - u) \right) \right] du + $ $+ \int \exp \left( sf \left( c^{-1}(u) \right) - \frac{c\overline{\gamma_{sn}^2} + \gamma_{Jn}^2}{2} u \right) \times$
обобщенная «самонормализующаяся» $f(u) = 1 - 2\left(1 + \sqrt[m]{\frac{1}{u} - 1}\right)^{-1}$	$\times \left[ \left( 1 + \frac{c\overline{\gamma}_{sn}^{2}}{2} u + \frac{\gamma_{sn}^{2}}{2} (1 - u) \right) I_{0} \left( 2\sqrt{\frac{c\overline{\gamma}_{sn}^{2}}{2}} \frac{\gamma_{sn}^{2}}{2} u (1 - u) \right) + 2\sqrt{\frac{c\overline{\gamma}_{sn}^{2}}{2}} \frac{\gamma_{sn}^{2}}{2} u (1 - u) I_{1} \left( 2\sqrt{\frac{c\overline{\gamma}_{sn}^{2}}{2}} \frac{\gamma_{sn}^{2}}{2} u (1 - u) \right) \right] du \right]$
с «логарифмическим ограничением»	$\frac{1}{M} \frac{\pi s}{\sin(\pi s)} \exp\left(-c\frac{\overline{\gamma}_{sn}^2}{2}\right) \left((M-1)_1 F_1\left(1-s,1;c\frac{\overline{\gamma}_{sn}^2}{2}\right) + \exp\left(-\frac{\gamma_{Jn}^2}{2}\right)_1 F_1\left(1-s,1;c\frac{\overline{\gamma}_{sn}^2}{2}\right)_1 F_1\left(1+s,1;\frac{\gamma_{Jn}^2}{2}\right) + \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{\gamma_{Jn}^2}{2}\right)_0^{2\pi} \exp\left(-\sqrt{c\overline{\gamma}_{sn}^2\gamma_{Jn}^2}\cos\varphi\right)_1 F_1\left(1-s,1;\frac{\gamma^2(\cos\varphi)}{2}\right) d\varphi\right).$
с жесткими решениями	$ (1 - p_s(z)) \exp(-s) + \frac{p_s(z)}{M - 1} (M - 2 + \exp(s)), $ $ p_s(z = 1) = \frac{1}{M} p_s(z = 1, J = S_0) + \frac{M - 1}{M} p_s(z = 1, J \neq S_0), $ $ p_s(z = 1, J = S_0) = \frac{1}{M} \sum_{i=2}^{M} (-1)^i C_M^i \exp\left(-\frac{c\overline{\gamma}_{sn}^2 + \gamma_{Jn}^2}{2} \left(1 - \frac{1}{i}\right)\right) I_0\left(\sqrt{c\overline{\gamma}_{sn}^2 \gamma_{Jn}^2} \left(1 - \frac{1}{i}\right)\right) $ $ p_s(z = 1, J \neq S_0) = 1 - \sum_{i=0}^{M - 2} (-1)^i C_{M - 2}^i \frac{1}{(1 + i)} \left(\exp\left(-\frac{c\overline{\gamma}_{sn}^2}{2} \frac{i}{(1 + i)}\right)\right) $ $ \times \left(1 - Q\left(\sqrt{\frac{\gamma_{Jn}^2(1 + i)}{(2 + i)}}, \sqrt{\frac{c\overline{\gamma}_{sn}^2}{(1 + i)(2 + i)}}\right)\right) + $ $ + \frac{1}{(2 + i)} \exp\left(-\frac{c\overline{\gamma}_{sn}^2 + \gamma_{Jn}^2}{2} \frac{(1 + i)}{(2 + i)}\right) I_0\left(\frac{\sqrt{c\overline{\gamma}_{sn}^2 \gamma_{Jn}^2}}{(2 + i)}\right) \right). $

мальная длина внешнего пакета определяется длительностью импульса помехи (b=8), внутреннего  $b_p$  – временем когерентности замираний и варьируется в пределах от 1 до 8.

Анализ графиков, представленных на pисун- kax 1,3,5, показывает, что с ростом максимальной длины внутреннего пакета  $b_p$  помехоустойчивость канала связи существенно ухудшается (тре-

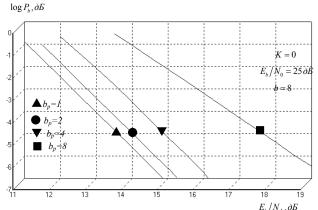
буется все большее значение отношения  $E_{_{g}}N_{_{J}}$  для достижения заданной вероятности  $P_{_{b}}$ ). Так, значение  $P_{_{b}}=10^{-5}$  при изменении  $b_{_{p}}$  с 1 до 8 обеспечивается увеличением отношения  $E_{_{g}}/N_{_{J}}$  на 4,5 дБ. Это объясняется тем, что при релеевских замираниях наихудшей является непрерывная помеха, в связи с чем понятие «максимальная длина внешнего пакета» теряет смысл и опре-



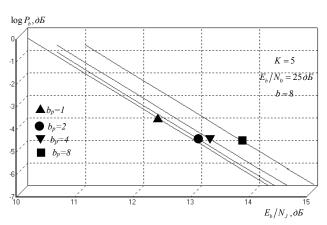
деляющей становится величина максимальной длины внутреннего пакета.

Для случая, когда релеевскими замираниями вызваны внешние пакеты, а внутренние – импульсной помехой, наихудшей также явля-

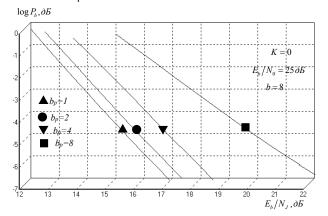
ется непрерывная помеха и уже понятие «максимальная длина внутреннего пакета» не имеет смысла. При этом увеличения отношения  $E_{_{I}}\!N_{_{J}}$  для достижения заданной вероятности  $P_{_{b}}$  при изменении  $b_{_{p}}$  с 1 до 8 не требуется. В этом случае



**Рис. 1.** Зависимости вероятности ошибки на бит  $\stackrel{\circ}{P}_b$  от отношения сигнал/помеха  $E_b/N_J$  для релеевских замираний при использовании для декодирования метрики с оптимальным взвешиванием

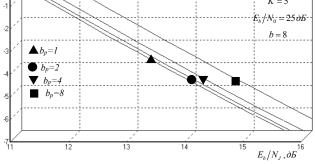


**Рис. 2.** Зависимости вероятности ошибки на бит  $P_b$  от отношения сигнал/помеха  $E_b/N_J$  для райсовских (K=5) замираний при использовании для декодирования метрики с оптимальным взвешиванием

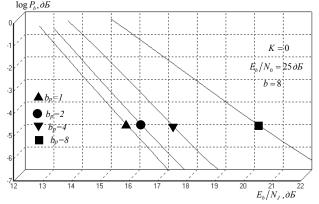


**Рис. 3.** Зависимости вероятности ошибки на бит  $P_b$  от отношения сигнал/помеха  $E_b/N_J$  для релеевских замираний при использовании для декодирования обобщенной самонормализующейся метрики (m=2)

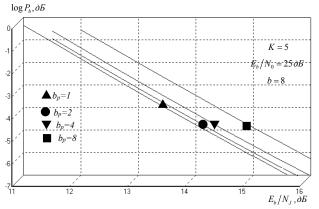




**Рис. 4.** Зависимости вероятности ошибки на бит  $P_b$  от отношения сигнал/помеха  $E_b/N_J$  для райсовских (K=5) замираний при использовании для декодирования обобщенной самонормализующейся метрики (m=2)



**Рис. 5.** Зависимости вероятности ошибки на бит  $P_b$  от отношения сигнал/помеха  $E_b/N_J$  для релеевских замираний при использовании для декодирования метрики с логарифмическим ограничением



**Рис. 6.** Зависимости вероятности ошибки на бит  $P_b$  от отношения сигнал/помеха  $E_b/N_J$  для райсовских (K=5) замираний при использовании для декодирования метрики с логарифмическим ограничением



# No3(57)202

# РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

зависимости вероятности ошибки  $P_b$  от отношения  $E_b/N_f$  соответствуют представленным на pu-сунках 1,3,5 для  $b_b$ =b=8.

При райсовских замираниях (K=5), как следует из анализа графиков на pисунках 2,4,6, вероятность появления наихудшей помехи  $\rho^*$  становится меньше единицы и максимальная длина внешнего пакета начинает определять помехоустойчивость канала связи. В этом случае для обеспечения  $P_b=10^{-5}$  при изменении  $b_p$  с 1 до 8 требуется увеличение отношения  $E_y/N_J$  порядка 1 дБ.

Для случая, когда райсовскими замираниями вызваны внешние пакеты, а внутренние – импульсной помехой, для  $b_p \leq 4$  оптимальной является непрерывная помеха и только при  $b_p = b = 8$  вероятность появления наихудшей помехи  $\rho^*$  становится меньше единицы и для обеспечения  $P_b = 10^{-5}$  при изменении  $b_p$  с 4 до 8 требуется увеличение отношения  $E_p/N_f$  меньше, чем на 0,5 дБ. Зависимость вероятности ошибки  $P_b$  от отношения  $E_p/N_f$  при  $b_p = b = 8$  соответствует представленным на bucynkax 2,4,6.

Таким образом, для оценки вероятности ошибочного приема кодовой комбинации в канале связи в условиях комплексного воздействия наихудшей случайной импульсной помехи и замираний получена верхняя граница в виде комбинации весовых функций внешних и внутренних пакетов ошибок. Рассмотрен как случай, когда внешние пакеты вызваны воздействием импульсной помехи, внутренние – замираниями, так и случай, когда внешние пакеты вызваны замираниями, а внутренние – воздействием импульсной помехи. Показано, что в обоих случаях при глубоких замираниях наихудшей является непрерывная шумовая помеха.

### Литература

1. Шевченко В.А. Верхняя аддитивная граница вероятности ошибки в канале связи с памятью при использовании кодирования и псевдослучайного перемежения// Известия Института инженерной физики, 2019. № 2 (52). С. 68-71.

- 2. Cvijović D. New identities for the partial Bell polynomials//Applied Mathematics Letters. 2011. Noton 24. Pp. 1544–1547.
- 3. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. М.: Высшая школа, 2002. 840 с.
- 4. Fremouw E.J., Livingston R.C., Miller D.A. On the statistics of scintillating signals// Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. 1980, vol. 42. P.P. 717–731.
- 5. Moraes A.O., Perrella W.J. Performance evaluation of GPS receiver under equatorial scintillation// Journal of Aerospace technology and Management, 2009. Vol.1. №2. Pp.193-200.
- 6. Шевченко В.А. Верхняя граница вероятности ошибки для двоичных кодов в некогерентных каналах связи с обобщенной метрикой с «объединением статистических величин отношений» в присутствии импульсной помехи и теплового шума// Двойные технологии, 2015. № 1 (70). С. 13-21.
- 7. Шевченко В.А. Верхняя граница вероятности ошибки для двоичных кодов в некогерентных каналах связи с обобщенной «самонормализующейся» метрикой в присутствии импульсной помехи и теплового шума// Двойные технологии, 2016. № 1 (74). С.34-41.
- 8. Шевченко В.А. Верхняя аддитивная граница вероятности ошибки на бит для двоичных кодов в некогерентных каналах связи с метрикой с «объединением произведением» в присутствии случайной импульсной помехи и теплового шума// Известия Института инженерной физики, 2016. № 1(39). С.48-54.
- 9. Шевченко В.А., Снедков Д.М. Критическая скорость кодирования для некогерентных каналов связи с группированием ошибок, вызванным замираниями и воздействием импульсной помехи// Известия Института инженерной физики, 2018. № 1 (47). С.39-46.
- 10. Бойченко И.А., Шевченко В.А., Снедков Д.М. О метрике с адаптивным взвешиванием мягких решений детектора огибающей в условиях воздействия на канал связи импульсной помехи// Двойные технологии, 2019. № 3 (88). С.71-77.



**УДК 629.783** 

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ

CURRENT STATUS AND
DEVELOPMENT PROSPECTS
OF DOMESTIC SPACE
COMMUNICATION SYSTEMS

## Владимир Леонидович Захаров

доктор военных наук, профессор действительный член АВН профессор кафедры ФГБОУ ВО МАЙ (НИУ) Адрес: 125993, Москва,

Волоколамское шоссе, д. 4 Тел.: +7 (905) 566-17-94 E-mail: varahas@yandex.ru

## Антонина Робертовна Денискина

кандидат технических наук, доцент

доцент

ФГБОУ ВО МАИ (НИУ) Адрес: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4 E-mail: dar@mai.ru

## Дмитрий Вячеславович Смирнов

почетный работник науки и техники РФ доктор технических наук, доцент действительный член АИН профессор кафедры ФГБОУ ВО МАИ (НИУ) Первый Вице-президент Института – заместитель Председателя Правления Института МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: +7 (4967) 35-31-93 E-mail: dv\_smr@iifmail.ru

## Павел Владимирович Мирошниченко

кандидат технических наук, доцент

доцент

ФГБОУ ВО МАИ (НИУ) Адрес: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4 E-mail: dar@mai.ru

## Аннотация

Статья посвящена рассмотрению вопросов, связанных с современным состоянием и перспективами развития отечественных и зарубежных космических аппаратов. Представлены основные свойства, структура, особенности применения и направлениях развития орбитальных средств и средств выведения. Рассмотрены принципы построения и функционирования системы средств связи. Авторами в основу приведенного анализа положена методология системного подхода, согласно которому каждый объект исследования рассматривается во всей совокупности присущих ему взаимодействий с внутренними элементами и внешними объектами (средой функционирования).

Ключевые слова: космический аппарат, космические системы связи.

#### Summary

Article is devoted to the consideration of issues related to the current state and development prospects of domestic and foreign spacecraft. Presents the main properties, structure, features of application and directions of development of orbital means and means of removal. Discusses the principles of construction and operation of a communications system. This analysis is based on the methodology of a systematic approach, according to which each object of study is considered in the totality of its inherent interactions with internal elements and external objects (environment of functioning).

**Keywords:** spacecraft, space communication systems.

#### Введение

В космической связи используется способность космического аппарата (КА) либо находиться в поле зрения двух и более географически удаленных пользователей одновременно, либо способность последовательно пролетать над ними. Хотя вполне реализуем способ пас-

сивного переотражения полезного сигнала (требующий большой мощности наземной передающей станции), в современных космических системах связи (КСС) используется способ активной ретрансляции, при котором слабый полезный сигнал принимается, обрабатывается, усиливается и переизлучается либо немедленно,

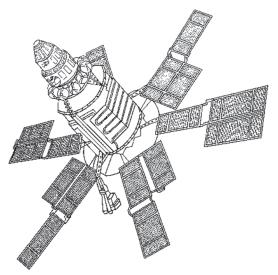


либо с задержкой после запоминания бортовой аппаратурой КА. КСС становятся безусловно выгодны экономически при большом числе удаленных пользователей, большой их пространственной рассредоточенностью по территории со слаборазвитой инфраструктурой и сложным рельефом. В космической связи используются специально выделенные диапазоны частот, которые выбраны в соответствии с международными договоренностями с учетом влияния на связь верхних слоев атмосферы, космических шумов, а также эксплуатационно-технических возможностей радиоприемных и передающих устройств [1].

Производительность КА связи характеризуется числом бортовых ретрансляторов (транспондеров, иногда называемых стволами связи) определенной частоты. Типичный современный зарубежный коммерческий КА связи несет на борту 20-60 транспондеров, в чем наши отечественные КА проигрывают во много раз, имея на борту 3-8 транспондеров. Кроме повышения численности стволов на борту КА намечается тенденция повышения производительности (пропускной способности связи) путем использования более высоких частот (что ужесточает требования к приемной аппаратуре и требует повышения мощности бортового передатчика) [2].

В России существуют КСС военного назначения трех основных типов (по характеру используемых орбит):

- КСС на высокоэллиптических орбитах (КА «Молния 1», «Молния 3» (рисунок 1));
- КСС на геостационарной орбите (КА «Грань», «Глобус 1»), в том числе КС ретрансляции данных (КА «Гейзер»);



**Рис. 1.** КА «Молния 3» (КАУР-2)

• КСС на низких околоземных орбитах (КА «Стрела 3»).

Для решения задач связи используются КАУР 1-4.

## КС связи на высокоэллиптических орбитах

В настоящее время на высокоэллиптической орбите (ВЭО) эксплуатируются две отечественные КС связи: на базе КА «Молния 1Т» и на базе КА «Молния 3». Обе в штатном составе состоят из 8 КА. Различия систем «Молния 1Т» и «Молния 3» состоят в их функциональном предназначении, которое вызвало различие в орбитальном построении. Система «Молния 1Т» предназначена для обеспечения засекреченной непрерывной круглосуточной телефонной и телеграфной связи, передачи данных в интересах ГШ ВС, Главного штаба РВСН, включая обмен информацией в позиционных районах мобильных ракетных комплексов, передачи приказов боевого управления и сбор донесений с ПУ боевых ракетных комплексов, а также организации каналов правительственной связи. Поэтому орбитальное построение этой системы сконфигурировано таким образом, чтобы одна из двух вершин суточной трассы располагалась над Центральной Сибирью, при этом из любой точки нашей страны обеспечивается видимость не менее двух КА одновременно. Система «Молния 3» предназначена для обеспечения связи в стратегическом и оперативно-тактическом звеньях управления ВС РФ, а также организации каналов правительственной и межправительственной связи. С учетом специфики второй задачи орбитальное построение этой системы сконфигурировано таким образом, чтобы одна из двух вершин суточной трассы располагалась над Западной Европой, а другая - над Тихим океаном, что позволяет одновременно находиться в зоне радиовидимости КА как пунктам связи в нашей стране, так и пунктам связи в зарубежных государствах северного полушария [3].

Системы имеют исключительное значение для обеспечения связи в нашей северной стране, так как использование ВЭО обеспечивает «Молниям» возможность обслуживать полярный район, недоступный для КА связи на геостационарной орбите (ГСО). Кроме того, использование ВЭО позволило в нашей стране создать систему непрерывной региональной связи без применения РН тяжелого класса, без которых с отечественных космодромов выход на ГСО невозможен. Правда, с точки зрения управления и организации связи подобная система имеет ряд органических недостатков:

• необходимо компенсировать допплеров-



ский эффект, возникающий из-за постоянного изменения дальности радиосвязи;

• необходимо использовать поворотные остронаправленные антенны, снабженные аппаратурой слежения за КА.

Однако главным недостатком всех «Молний» является недопустимо низкое, по современным меркам, число транспондеров на борту – по 3, а также низкий срок активного функционирования – до 1 года (хоть и перекрываемый в ходе реальной эксплуатации, но все равно несопоставимый с 12-15 годами эксплуатации зарубежных КА связи). Данные недостатки предполагается исправить в КА следующего поколения – «Меридиан».

## КСС на геостационарной орбите

КА на геостационарной орбите неподвижен относительно поверхности Земли, что существенно упрощает конструкцию наземной аппаратуры связи. Единственным недостатком такого размещения КА является большая удаленность от поверхности Земли, что, в свою очередь, влечет за собой повышенные требования к энергетике средства выведения и к мощности наземной аппаратуры. Привлекательность ГСО вызвала необходимость установления «государственных границ» на орбите в виде 3°-зон (в перспективе – 1,5°-зон), выход за пределы которой требует выключения бортовой аппаратуры связи, даже если она еще работоспособна. Это требование породило специфику устройства КА связи на ГСО, связанную с наличием на борту двигательной установки, способной очень точно корректировать положение КА по долготе. Кроме того, желательно иметь на борту аналогичную ДУ, выполняющую коррекции положения по широте.

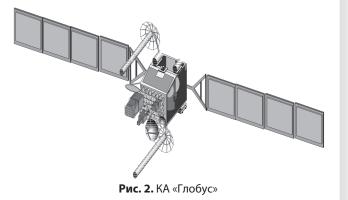
На ГСО эксплуатируются две КСС военного назначения [4]:

- КСС на базе КА «Глобус 1» («Грань»), предназначенная для обеспечения круглосуточной засекреченной телеграфно-телефонной связи в интересах высших звеньев управления ВС РФ, передачи сигналов боевого управления, обеспечения правительственной и представительской связи;
- КСС на базе КА «Гейзер», предназначенная для: ретрансляции специальной информации от КА разведки на наземные пункты приема специнформации; ретрансляции командно-программной и телеметрической информации между КА и центром ретрансляции; ретрансляции документальных данных и двухсторонней ретрансляции между пунктами приема специнформации.

КА «Глобус 1» («Грань») также носят наименование «Радуга 1» («Радуга»). В разное время они использовали и используют точки стояния 170° и 25° з.д., 12°, 35°, 45°, 49°, 70°, 85° и 128° в.д. В пике развертывания системы в 1980-х годах на орбите одновременно работало 8 КА этой системы. КА «Грань» представляет собой более ранний вариант платформы КАУР-3 массой 2300 кг, имеющий 6 транспондеров диапазона С (6/4 ГГц) и гарантийный срок функционирования 3 года. К настоящему времени этот КА устарел и морально и физически. КА «Глобус 1» отличается от «Грани» способностью работать не только со стационарными, но и с мобильными пунктами связи за счет применения расширенного частотного диапазона (диапазонов С, Х и L), что позволяет использовать эту КСС в интересах оперативно-тактического звена управления. Соответственно, эти устаревшие КА предполагается заменить КА на новой орбитальной платформе «Глобус» (рисунок 2).

За КСС на базе КА «Гейзер» зарезервированы точки стояния системы «Поток», что позволяет организовать глобальный охват при наличии полной группировки. КА «Гейзер» использует платформу КАУР-4, на которой установлена БЦВМ и которая отличается очень высокой (0,2°) точностью удержания своего положения по долготе. На КА используется активная фазированная антенная решетка (АФАР). АФАР позволяет проводить электронное сканирование, т.е. изменять направление диаграммы путем электронного управления элементами без механического перенацеливания антенны и тем самым сопровождать движущийся объект.

Угол и профиль диаграммы направленности при этом не изменяется. Антенна обеспечивает 16 приемных и 16 передающих лучей. Диаграмма направленности каждого из них может перенацеливаться в пределах ±8,5°. Таким образом, АФАР обеспечивает работу с подвижными объектами, т.е. с низкоорбитальными КА. После развертывания группировки отечествен-



ных КА оптико-электронной и радиоэлектронной разведки ее потребности предполагается удовлетворять созданием КА-ретранслятора нового поколения «Гарпун» (рисунок 3).

Необходимо отметить, что во времена самостоятельной советской пилотируемой программы на базе КАУР-4 были также созданы КА «Альтаир», обеспечивающие двустороннюю связь и передачу данных для подвижного космического объекта – орбитальной станции «Мир».

Важно учитывать, что современные «гражданские» КСС представляют собой как бы второй эшелон военных систем связи. Ведь в сети органов военного управления циркулирует немалый объем информации, которая не нуждается в том уровне помехозащищенности, который требуется обеспечить в чисто военных каналах связи. Поэтому необходимо иметь в виду, что на ГСО также используется система отечественных КА 11Ф662 «Горизонт», (6-8 КА платформы КАУР-3 в точках стояния  $14^{\circ}$  и  $11^{\circ}$  з.д.,  $40^{\circ}$ ,  $53^{\circ}$ , 80°, 96,5°, 99°, 103°, 140° и 145° в.д.) обеспечивающая гражданских (в том числе подвижных) пользователей. Система в настоящее время эксплуатируется Федеральным государственным унитарным предприятием «Космическая связь», за которым и закреплены все перечисленные точки стояния на ГСО. Бортовой ретранслятор (БР) КА «Горизонт» включает в себя восемь стволов (транспондеров). Для большей их части (шести стволов) рабочим является диапазон 6/4 ГГц (С-диапазон); по одному стволу работают в диапазонах 14/11 ГГц (Ки-диапазон, распределительное телевещание по сети «Москва») и 1,5/1,6 ГГц (L-диапазон, система связи с подвижными пользователями - судами морского торгового флота и правительственными делегациями - «Океан»). Если предположить, что отечественный торговый флот будет уничтожен окончательно еще в мирное время, возможность связаться с подвижным пользователем на «Горизонтах» приобретет сугубо военный харак-



Рис. 3. КА «Гарпун»

тер. «Горизонты» в последнее время заменяются на КА серии «Экспресс» (рисунок 4) различных модификаций («Экспресс А», «Экспресс АМ»), которые представляют собой комбинацию модуля 767М (глубоко модифицированной платформы КАУР-4, получившей способность корректировать положение КА не только по долготе, но и по широте) и конструктивно обособленного модуля специальной связной аппаратуры иностранного производства (рисунок 5).

Данные КА уже соответствуют современному уровню по сроку активного функционирования (до 12 лет), точности удержания положения в рабочей точке (0,05°) и количеству транспондеров (для КА «Экспресс АМ» – 24 С-диапазона и



**Рис. 4.** KA 767M «Экспресс AM»

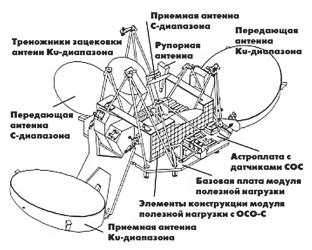


Рис. 5. Модуль полезной нагрузки КА «Экспресс АМ»



4 Ки-диапазона, при массе КА 2543 кг). Кроме этих КА ФГУП «Космическая связь» эксплуатирует сеть непосредственного телевещания «Экран» с помощью КА 11Ф647М «Экран М» (99° в.д.) и сети «Москва» и «Орбита» через каналы КА «Горизонт». Услуги связи и непосредственного телевещания иностранным потребителям предоставляются международной организацией космической связи (МОКС) «Интерспутник», использующей, вместе с КА «Горизонт» КА 17Ф71 «Галс» (23°, 44° в.д.).

Все отечественные КА на ГСО запущены с помощью РН серии «Протон», хотя подобную способность для КА небольшой массы приобретет РН «Союз 2».

## КСС на низких орбитах

Система «Стрела 3» предназначена для обеспечения связи методом переноса информации и прямой ретрансляции сигналов в общей зоне радиовидимости. Система состоит из 12-18 КА «Стрела 3» (созданы на базе платформы КАУР-1), выводимых на орбиту  $i=82,6^{\circ}$ , 1500 км SYMBOL 180\f«Symbol»\s 14 1500 км, в одну плоскость группами (по 6 КА РН 11К68 «Циклон 3»). Спутники поочередно отделяются от последней ступени носителя еще до полной отсечки тяги ДУ, оказываясь, благодаря этому, на несколько различающихся орбитах. КА не имеют на борту ДУ, поэтому свое взаимное положение не корректируют (так называемый стохастический способ формирования орбитальной группировки). Уже два таких запуска обеспечивают довольно густое и случайное распределение ретрансляторов по орбите, так что в пределах ограниченного района возможно поддержание прямой связи. Сравнительно низкая орбита предоставляет возможность пользоваться маломощными передатчиками, что позволяет использовать такую систему связи в тактическом звене управления. Недостатком данной КСС является случайный характер появления спутника в зоне радиовидимости пользователя (что требует либо перехода к детерминированному способу создания орбитальной группировки, при котором КА будут строго поддерживать положение один относительно другого, либо использовать в качестве основного вида связи «электронную почту»), кроме того из-за быстрого перемещения КА относительно пользователя существенные помехи создает эффект допплеровского смещения частоты. Все эти трудности на современном уровне развития технологий довольно просто преодолеваются и развертыванию низкоорбитальной группировки непрерывной глобальной тактической связи препятствуют только финансовые ограничения.

Была предпринята попытка создать гражданский вариант такой системы «Гонец Д», ориентированный на факсимильную связь.

Аналогичные задачи обеспечения связью типа «электронная почта» с низких орбит решает, помимо своей основной задачи, система навигационных КА первого поколения «Парус», «Цикада», «Надежда».

Таким образом, создаваемые в последнее время отечественные КА (хоть и с иностранной спецаппаратурой) способны достичь существенного продвижения на пути реализации основных направлений совершенствования КСС:

- существенного увеличения пропускной способности;
- увеличения сроков активного существования:
- увеличения сроков автономного функционирования;
- повышения помехозащищенности аппаратуры;
  - повышения живучести КА;
- совершенствования способов обработки информации, в том числе и на борту КА.

## Литература

- 1. От простейшего спутника ПС-1 до «Бурана». Из истории разработки и создания космических аппаратов / Под ред. А.Т.Стрельникова. М.: PBCH, 2001.
- 2. Космические аппараты / Под ред. К.П.Феоктистова. М.: Воениздат, 1983. 319 с.
- 3. Ракеты и космические аппараты конструкторского бюро «Южное» / Под ред. С.Н. Конюхова. Днепропетровск: ГКБ «Южное» им. М.К.Янгеля, 2000. 240 с.
- 4. Лебедев А.А., Нестеренко О.П. Космические системы наблюдения. Синтез и моделирование. М.: Машиностроение, 1991. 221 с.





МЕТОДИКА ВЫДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПОРТРЕТОВ ИЗЛУЧАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ В ИНТЕРЕСАХ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ

THE TECHNIQUE OF IDENTIFYING INFORMATIVE REGIONS OF SPECTRAL PORTRAITS OF EMITTING OBJECTS AND DETERMINING WEIGHTING COEFFICIENTS IN THE INTERESTS OF SOLVING THE RECOGNITION PROBLEM

### Анатолий Иванович Мухин

кандидат технических наук преподаватель 55 кафедры ВКА имени А.Ф. Можайского Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13

## Александр Васильевич Кузин

начальник группы отдела стратегических вооружений, космических и специальных средств, элементной базы РЭА Управление военных представительств МО РФ Адрес. 119160, Москва, Комсомольский пр-т, д. 18, стр. 3

## Олег Игоревич Атакищев

доктор технических наук, профессор заместитель генерального директора по специальным проектам МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: +7 (4967) 35-31-93 E-mail: aoi007@mail.ru

## Роман Александрович Гудаев

кандидат технических наук начальник лаборатории ВКА имени А.Ф. Можайского Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13

Тел.: +7 (911) 956-15-04 E-mail: mrgudaev@mail.ru

#### Аннотация

Одним из проблемных вопросов применения радиотехнической информации в системе мониторинга и контроля воздушно-космического пространства остается несовершенство научно-методического аппарата ее обработки для решения задачи распознавания типа объекта. На данный момент оператором системы производится распознавание типа объекта на основе визуального анализа спектральных портретов, получаемых с помощью комплексов радиотехнических измерений. В таком случае вероятность правильного распознавание типа объекта зависит от опытности и подготовленности оператора системы мониторинга и контроля воздушно-космического пространства и совершенства программно-алгоритмического обеспечения. Авторы в статье предложили методику, применение которой позволит упростить процесс распознавания типа объекта и увеличит вероятность принятия правильного решения.

Ключевые слова: распознавание, признаки, спектральный портрет, информативность.

#### **Summary**

One of the problematic issues of using radio-technical information in the monitoring system for aerospace space remains the imperfection of the scientific and methodological apparatus for its processing to solve the problem of recognizing the type of object. At the moment, the system operator is recognizing the type of object based on a visual analysis of spectral portraits obtained with the help of complexes of radio engineering measurements. In this case, the probability of correct recognition of the type of object depends on the experience and preparedness of the operator of the monitoring system for aerospace space and the perfection of software and algorithmic support. The authors in the article proposed a technique, the use of which will simplify the process of recognizing the type of object and increase the likelihood of making the right decision.

Keywords: recognition, signs, spectral portrait, informativeness.

## Введение

В настоящее время сообществом радиолюбителей, метеорологов и уфологов создано несколько сервисов слежения за спутниками (Satellite Tracking System). Такие сервисы еще называются системами мониторинга (СМ) объектов в воздушно-космическом пространстве (ВКП).

Рассматриваемые сервисы находятся в сети

интернет и общедоступны. Например, на таких сайтах как <a href="http://www.stoff.pl">https://www.n2yo.com</a> предусмотрена возможность просматривания в режиме онлайн траектории движения практически любого космического аппарата.

В задачи СМ объектов в ВКП входит распознавание типа объекта. Как показал анализ, несмотря на количество и широкую географию



расположения средств измерений данной системы, показатели качества, в частности, вероятность правильного распознавания не всегда достигает требуемого значения.

В СМ ВКП используются радиолокационные, оптико-электронные и радиотехнические комплексы, которые получают различную некоординатную информацию. Для решения задачи распознавания используются различные программные комплексы, которые учитывают особенности получения той или иной некоординатной информации и преобразуют ее в признаки. Если говорить о распознавании на основе анализа радиотехнической некоординатной информации, то принятие решения производится оператором СМ ВКП на основе применения программно-реализованного комплекса программ анализа параметров радиосигнала и визуального сравнения спектральных портретов (СП) излучения объектов распознавания. Таким образом, вероятность правильного распознавания типа объекта напрямую зависит от опыта и степени подготовленности оператора СМ ВКП. Учитывая тот факт, что анализ некоординатной информации может оказать существенное влияние на решение задачи распознавания и оценку обстановки в ВКП в целом, то задачи совершенствования научно-методического аппарата ее обработки и создания соответствующих программно-реализованных комплексов приобретают особую актуальность [1-5].

Не смотря на опыт применения комплексов радиотехнических измерений (КРТИ) их потенциал до сих пор не раскрыт в полной мере, а большой объем предоставляемой ими информации остается не в полной мере востребованным.

Как указано в работах [2, 5], обеспечение наилучших показателей качества распознавания достигается за счет использования специальных алгоритмов, которые учитывают особенности того или иного признака. Исходя из этого, необходимо исследовать каждый признак с точки зрения его разделяющих качеств.

В работах [4, 5] в качестве признака распознавания рассматривался СП излучения объекта распознавания, а также был предложен вариант методики, позволяющей определять его тип. Анализ работ показал, что авторы применили оконно-комбинированный метод для сравнения СП различных объектов. С этой целью были созданы системы доверительных интервалов-окон, а отнесение объекта к какому-либо типу производилось по максимуму числа значений, попавших в соответствующие данному типу окна. При этом величина окна зависела от того насколько сильно отличались соответствующе значения в

выборке СП отнесенных к одному из типов распознаваемых объектов. Дальнейшие исследования разделяющих качеств СП, как признака распознавания, показали, что одним из способов увеличения вероятности правильного распознавания и облегчения работы оператора СМ является использование формы СП, которая меняется для каждого типа распознаваемого объекта.

## Постановка задачи

Рассмотрим СП объекта первого типа, представленный на рисунке 1.

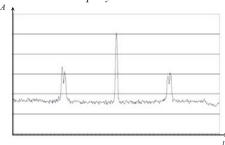
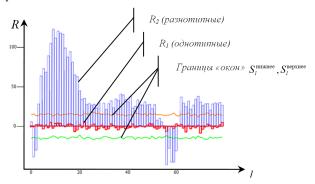


Рис. 1. Спектральные портреты объекта первого типа

На указанном рисунке представлена совокупность амплитуд  $A_l$ , значения которых располагаются друг от друга на некоторой величине  $\Delta f$  (дискретность проведения измерений). Общее число отсчетов, которым описывается СП составляет L. В соответствии с оконнокомбинированным методом каждому отсчету l будет соответствовать некое «окно», которое сверху ограничено значением  $S_l^{\textit{верхнее}}$  и снизу —  $S_l^{\textit{нижнее}}$ . Суть подхода, предложенного в [2-5], заключается в том, чтобы СП наблюдаемого объекта  $A_l^{\textit{наба}}$  сравнить с  $A_l^{\textit{этвалон}}$  и проверить выполнение следующего требования

$$S_l^{\text{ верхнее}} < R_l < S_l^{\text{ нижнее}}$$
.

При этом  $R_t$  не что иное как результат их взаимовычитания (рисунок 2). Таким образом, решение в пользу того или иного типа производится на основе сравнения числа отсчетов попавших в «окна» ( $l > l_o$ , где  $l_o$  это пороговое значение) с пороговым значением.



**Рис. 2.** Взаимное расположение разностных портретов и пороговых значений «окон»

Предлагается: каждому из отсчетов l присвоить свой весовой коэффициент  $V_r$ , который говорит, своего рода, о важности того или иного «окна».

Зададим весовые коэффициенты как функцию двух переменных

$$V_l = f(A_l^{\text{набл}}, A_l^{\text{эталон}})$$

В этом случае математическая постановка задачи примет следующий вид  $f: \quad \max P(S_l^{\text{нижнее}}, S_l^{\text{верхнее}}, V_l^-, l_0, L) \,,$ 

$$f: \max P(S_l^{\text{нижнее}}, S_l^{\text{верхнее}}, V_l, l_0, L)$$

Heoбxoдимо: получить такую функцию  $V_{p}$ , которая бы позволила максимизировать вероятность правильного распознавания типа объекта оператором СМ на основе использования СП в качестве признака.

Целью настоящей статьи является увеличение вероятности правильного распознавания типа объекта оператором СМ на основе анализа особенностей СП.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ особенностей СП;
- разработать методику выделения информативных областей СП;
- провести апробацию методики распознавания типа объекта на основе сравнения спектральных портретов с учетом весовых коэффициентов их информативных областей.

## Результаты анализа особенностей спектральных портретов излучения в интересах выявления информативных областей

Анализ СП, полученных КРТИ для объектов идентичных типов, показал некоторую степень расхождения, которую авторы в работах [4-5] связывают с особенностями функционирования, как самого объекта распознавания, так и КРТИ. Несмотря на это, СП, полученные от объектов одного типа, обладают свойством кластеризации (исходя из большого значения меры сходства), что, как указано в работах [2-5], позволяет реализовать распознавание посредствам применения функции расстояния. В случае применения метода Робинсона-Монро из набора СП, представленных на рисунке 3, можно получить эталонную зависимость для случая единственности эталона.

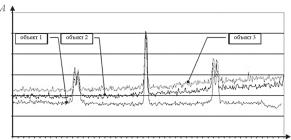


Рис. 3. Спектральные портреты излучающих объектов одного типа

В свою очередь, сравнивание СП, полученных с помощью КРТИ, от объектов различных типов показывает (рисунок 4), что они обладают достаточно большими отличиями (малой мерой сходства) и не могут быть объединены в один кластер.

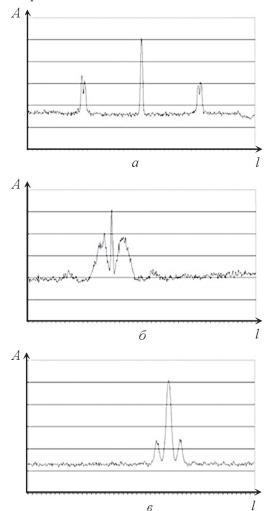


Рис. 4. Спектральные портреты объектов различных типов (а – тип 1, б – тип 2, в – тип 3)

Таким образом, каждый СП может быть отнесен в свой кластер в соответствии с типом объекта.

## Методика выделения информативных областей спектральных портретов

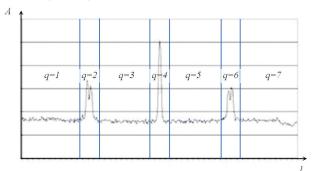
Рассмотрим СП объекта, представленный на рисунке 5. Условно, СП объекта тип 1, можно поделить на 7 областей (q=7), которые отделяют друг от друга одним глобальным и двумя локальными максимумами.

Например, на рисунке 2 показан случай сравнения СП от объектов типа 1 и 2, представленных на рисунке 4 (а и б соответственно). На рисунке 2 видно, что благодаря различиям в форме,



малой мерой близости и взаимном расположении  $A_l$  значения разостного портрета  $R_l$  выходят за границы пороговых значений, что в конечном счете позволяет провести распознавание.

Что касается СП объекта типа 3, то величина локальных максимумов у него существенно меньше в то время как их расположение достаточно схоже с СП типа 2, но нельзя не отметить того факта, что ширина как главного, так и локальных максимумов существенно сильно отличается.



**Рис. 5.** Спектральные портреты объектов различных типов (а – тип 1, 6 – тип 2, в – тип 3)

Авторы в работе [5] предложили методику, основанную на вычислении расстояния, отделяющего измеренный СП от каталогизированного, предлагается усовершенствовать данную методику за счет блока определения весовых коэффициентов, в котором учитываются результаты анализа информативных областей СП (в данном случае семи).

# Методика распознавания типа объекта на основе сравнения спектральных портретов с учетом весовых коэффициентов их информативных областей

Исходные данные:

- $\bullet$  количество дискрет L;
- наблюдаемый СП  $A_{I}^{\text{набл}}$ ;
- $\bullet$  каталогизированный СП  $A_I^{\text{эталон}}$ .

**Блок 1.** На вход методики подаются два СП  $A_{t}^{\text{наба}}$  и  $A_{t}^{\text{эталон}}$ .

**Блок 2.** В массиве значений, которыми описывается СП, оператором СМК ВКП производится поиск глобального максимума

$$A_l^{\Gamma_{\Pi}} = \max_{l} A_l$$
.

**Блок 3.** В массиве значений, которыми описывается СП, относительно глобального максимума производится поиск локальных максимумов (поиск осуществляется с помощью оператора СМ ВКП с выполнением условия

$$A_l^{\Gamma_l} > A_l^{\Lambda_{OK}} > A_l^{Cp},$$

 $\underline{\underline{\Gamma}}_{\underline{A}} e A_l^{\mathrm{Cp}} = \underline{A}_l + a \cdot \sigma_l;$ 

 $\overline{\mathbf{A}}_{l}$  – среднее арифметическое отчетов измерений СП;

 $\sigma_l$  – среднеквадратичное отклонение отсчетов измерений СП).

**Блок 4.** Относительно глобального и локальных максимумов производится разбиение значений СП на группы с выделением областей (q=), как показано на *рисунке* 5 (для данного случая q=7). С участием оператора СМ ВКП определяется количество  $l_q$  для каждой из областей q

$$L = \sum_{i=1}^{q} l_q$$

**Блок 5.** Производится расчет среднего арифметического 1, 3, 5 и 7 областей (неинформативных)

 $\overline{a}_q = \sum_{l=1}^L A_l / l_q$ .

**Блок 6.** Производится расчет среднего арифметического 2, 4 и 6 областей (информативных) на основе применения следующих формул:

$$\overline{a}_2 = \frac{\overline{a}_1 + \overline{a}_3}{2}, \ \overline{a}_4 = \frac{\overline{a}_3 + \overline{a}_5}{2}, \ \overline{a}_2 = \frac{\overline{a}_5 + \overline{a}_7}{2}.$$

**Блок 7.** Производится расчет информативности каждого отсчета СП в зависимости от области его расположения  $\cdot$ 

 $A_l' = \frac{A_l - \overline{a}_q}{\overline{a}_a} \cdot$ 



Рис. 6. Блок-схема методики определения весовых коэффициентов в интересах решения задачи распознавания на основе сравнения спектральных портретов излучения

Затем определяется значение весового коэффициента каждого из отчетов СП

$$V_{l} = \frac{A_{l}'}{\sum_{l=1}^{L} A_{l}'}.$$

Блок-схема рассматриваемой методики представлена на рисунке 6.

Выходные данные:

 $\bullet$  весовые коэффициенты  $V_{I}$  для СП.

Экспериментальная апробация методики распознавания типа объекта на основе сравнения спектральных портретов с учетом весовых коэффициентов их информативных областей

Методика была частично реализована в патенте на изобретение [6] и в программе, функционирующей в соответствии с предложенной блок-схемой (рисунок 5), а также в среде программирования NI LabView. Для эксперимента были выбраны три СП двух видов. Два СП относились к типу 1 и третий – 3.

Пороговое значение ( $l_0$ =149) для решения задачи распознавания типа объекта (количество отсчетов, которые должны попасть в «окна») было рассчитано заблаговременно в соответствии с формулой, представленной в работах [2-5]:

$$l_0 = \frac{(\sigma_2)^2 m_1 - (\sigma_1)^2 m_2 \pm \sigma_1 \sigma_2 \sqrt{(m_2 - m_1)^2 + ((\sigma_2)^2 - (\sigma_1)^2) \ln((\lambda_0 \frac{(\sigma_2)^2}{(\sigma_1)^2})^2)}}{(\sigma_2)^2 - (\sigma_1)^2}$$

где  $l_0$  – пороговое значение;

 $m_{_{v}}$  – математическое ожидание количества отсчетов СП, которые попали в «окна»;

 $\sigma_{_{_{\rm Y}}}$  – среднеквадратичное отклонение отсчетов СП, которые попали в окна;

x – индекс, который показывает к какому типу объекта относятся отсчеты СП (для случая сравнения «свой со своим» – 1 и «свой с чужим» – 2); λ – отношение правдоподобия.

Эксперимент проводился на основе сравнения трех СП в двух случаях (сравнение эталонного СП с наблюдаемым, которые относятся к одному типу объектов [«свой с своим»] и эталонного с наблюдаемым, принадлежащих к разным типам [«свой с чужим»]). При этом были получены два разностных портрета и применен вариант оконно-комбинированного метода. Распознавание проводилось на основе сравнения

$$_{\rm pacn} = \sum_{l}^{L} \delta_{l}$$

 $\sum_{\rm pach} = \sum_{l=1}^{} \delta_l \; ,$  с  $l_{\scriptscriptstyle 0}$ . При этом использовалась следующая дискретная функция

$$\delta_l = egin{cases} 1, & npu & S_l^{ ext{huxhee}} \leq R_l \leq S_l^{ ext{верхнеe}} \ 0, & uhaчe \end{cases}, \; l = \overline{1,L} \;,$$

где  $\delta_{\iota}$  – дискретная функция, для определения количества отсчетов СП, попавших в «окна»;  $S_{\iota}^{\,\,{\mbox{\scriptsize нижнее}}}$  – нижнее пороговое значение «окна»;  $S_{i}^{\text{верхнее}}$  – верхнее пороговое значение «окна»;  $R_{i}$  – разностный портрет.

Для удобства и простоты расчетов были выбраны симметричные пороговые значения «окон», при этом значения  $S_I^{\text{верхнее}}$  и  $S_I^{\text{нижнее}}$  были зафиксированы на уровне 4,48 [2], которые изображены на рисунке 7 (а и б) в правых верхних углах соответственно.

На рисунке 6 представлены СП объектов двух типов и две ситуации распознавания («свой со своим» – a и «свой с чужим» – b) и разностные портреты для каждого из случаев (правый верхний угол, отдельное поле).

После сравнения разностных портретов с пороговыми значениями были получены две дискретные функции  $\delta_i$  и взвешенная  $\delta_i^V = \delta_i \cdot V_p$ , которые сравнивались с пороговыми значениями  $l_{\scriptscriptstyle 0}$ и  $l_0 = l_0^V (1/L)$ .

Применение предлагаемых методик позволило провести распознавание типа объекта на основе сравнения СП:

• при сравнении СП объектов одного типа (рисунок 7 a) величина  $\delta$ , составила 179 при пороге равным 149 (то есть примерно 0,7), а значение  $\delta_{l}^{V}$  составило 0,84 (без применения весовых ко-

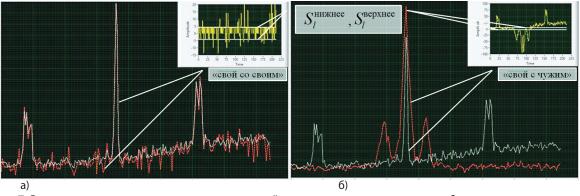


Рис. 7. Выходные данные программно-реализованной методики распознавания типа объекта на основе сравнения спектральных портретов с учетом весовых коэффициентов их информативных областей



эффициентов) и 0,94 (в случае реализации предлагаемой в настоящей статье методики).

• при сравнении СП объектов различных типов (рисунок 7 б) величина  $\delta_l$  составила 49, а значение  $\delta_l^V$  составило 0,23 (без применения весовых коэффициентов) и 0,05 (в случае реализации предлагаемой в настоящей статье методики).

Если сравнивать  $\delta_l^{\ \nu}$  то расчеты показали, что применение предложенной методики, приводит к повышению качества распознавания объектов при сравнении СП объектов одного типа примерно на 0.1 и на 0.18 – при сравнении СП объектов различных типов.

#### Заключение

Для реализации представленной методики необходимо дополнить базу данных СП весовыми коэффициентами, которые можно рассчитать на основе применения методики, представленной блок-схемой на рисунке 6. Ее применение в совокупности с подходом, представленным в работах, позволит использовать СП в качестве признака распознания.

Учитывая возможности оптико-электронных и радиолокационных комплексов, можно заключить, что в некоторых условиях (малый размер объекта, сильное влияние внешних факторов и так далее) радиотехническая информация будет нести решающее значение. В этой ситуации оператор СМК обязан быстро обрабатывать информацию и проводить распознавание типа объекта.

В ходе проведения расчетов по оцениванию эффективности предлагаемой методики было установлено, что вероятность правильного распознавания увеличится примерно на 3-5% за счет использования весовых коэффициентов.

### Литература

- 1. Васин В.В. Справочник-задачник по радиолокации / В.В. Васин, Б. М. Степанов. М.: Советское радио, 1977. 320 с.
- 2. Горелик А.Л. Современное состояние проблемы распознавания / А.Л. Горелик, И.Б. Гуревич, В.А. Скрипкин. М.: Радио и связь, 1985. 160 с.
- 3. Ту  $\bar{\mathcal{A}}$ ж. Принципы распознавания образов /  $\bar{\mathcal{A}}$ ж. Ту, Р. Гонсалес; перевод с англ. И.Б. Гуревича / под общ. ред. Ю.И. Журавлева. М.: Мир, 1978. 414 с.
- 4. Гудаев Р.А., Катюха Р.В., Логунов С.В., Рогов Д.А. Применение информации, получаемой от средств радиотехнического контроля, для решения задач распознавания космических аппаратов // Труды ВКА имени А.Ф.Можайского. Под ред. Ю.В. Кулешова. СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2015. Вып.647. С.137-141.
- 5. Бабишкин А.А., Гудаев Р.А., Рогов Д.А., Чистяков С.В. Алгоритм распознавания типа излучающего объекта в воздушно-космическом пространстве на основании использования его спектрального портрета // Труды ВКА имени А.Ф.Можайского. Под ред. Ю.В. Кулешова. СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2016. Вып.654. С.49-56.
- 6. Пат. 2641482 Рос. Федерация, МПК G06К 9\66, СПК G06К 9/2054 (2006.01), G06К 2006/01 (2006.01). Способ радиотехнического распознавания излучающих объектов в воздушно-космическом пространстве и устройство для его реализации / Гудаев Р.А., Королев В.О., Рогов Д.А., Катюха Р.В., Логунов С.В., Алдохина В.Н.; заявитель и патентообладатель ВКА. №2016123615; заявл. 14.06.16; опубл. 17.01.18, Бюл. № 2. 18 с.





## Владимир Леонидович Захаров

доктор военных наук, профессор действительный член ABH профессор кафедры ФГБОУ ВО МАИ (НИУ) Адрес: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

Тел.: +7 (905) 566-17-94 E-mail: varahas@yandex.ru

## Владимир Алексеевич Васильев

кандидат технических наук старший научный сотрудник ВА РВСН им. Петра Великого Адрес: 143900, Московская обл., г. Балашиха, ул. Карбышева, д. 8 Тел.: +7 (495) 524-07-63

УДК 621.396.967

МЕТОДИКА РАСЧЕТА
МАКСИМАЛЬНОЙ ДАЛЬНОСТИ
ДЕЙСТВИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ
СТАНЦИИ ПО ОБНАРУЖЕНИЮ
БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ ПО
КРИТЕРИЮ НЕЙМАНА-ПИРСОНА

METHODOLOGY FOR CALCULATING THE MAXIMUM RANGE OF A RADAR STATION FOR DETECTING BALLISTIC TARGETS BY NEUMANN-PEARSON CRITERION

#### Дмитрий Вячеславович Смирнов

почетный работник науки и техники РФ доктор технических наук, доцент действительный член АИН профессор кафедры ФГБОУ ВО МАИ (НИУ) Первый Вице-президент Института –

заместитель Председателя Правления Института МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: +7 (4967) 35-31-93 E-mail: dv\_smr@iifmail.ru

## Аннотация

В статье представлена методика расчета максимальной дальности обнаружения баллистических целей, которая позволяет на основе имеющихся данных диаграммы обратного рассеяния целей оценить диапазон ее изменения применительно к большому числу типов РЛС, привлекаемых к решению задач ПРО США. Сделан вывод о возможности создания малозаметных боевых блоков баллистических ракет большой дальности за счет уменьшения радиуса носового притупления.

**Ключевые слова:** методика, критерий Неймана-Пирсона, радиолокационная станция, баллистическая ракета, боевой блок, зондирующий сигнал, максимальная дальность, радиолокационная заметность.

#### Summary

The article presents a method for calculating the maximum detection range of ballistic targets, which allows, based on the available data of the target backscatter diagram, to estimate the range of its variation in relation to a large number of radar types involved in solving the problems of US missile defense. The conclusion is made about the possibility of creating inconspicuous warheads of long-range ballistic missiles by reducing the radius of the nose bluntness.

**Keywords:** technique, Neumann-Pearson criterion, radar station, ballistic missile, warhead, sounding signal, maximum range, radar signature.

Светлой памяти профессора МАИ Богдана Фёдоровича Высоцкого

### Введение

В 1947 году в издательстве «Советское радио» вышла брошюра на 67 страницах тиражом 6000 экземпляров под названием «Максимальная дальность действия радиолокационной станции». Перевод с английского под редакцией

Б.Ф. Высоцкого. Книга была интересна вдвойне.

Во-первых, это первая и единственная в ту пору, на заре современной радиолокации и создания радиолокационного факультета МАИ, работа по этой тематике. В ней подробно описана методика решения исключительно важной научной и интересной задачи. В основу книги легли переводы 37 научных статей и монографий



на радиолокационную тему, изданных в США, Великобритании и Третьем Рейхе в период с 1932 по 1947 годы.

Методика содержала 71 формулу, 11 графиков и подробно описывала влияние 13 основных факторов на максимальную дальность действия РАС по обнаружению наземных, морских и научных целей. Из приведенного перечня следует, что расчет максимальной дальности РАС 70 лет тому назад являлся не таким уж простым делом.

Во-вторых, редактором данной уникальной книги являлся профессор радиолокационного факультета МАИ Богдан Фёдорович Высоцкий, который в годы Великой Отечественной войны по приказу И.В. Сталина был откомандирован в США с целью изучения достижений в радиолокационной технике. Со своей миссией Б.Ф. Высоцкий успешно справился, что помогло ему создать несколько удачных авиационных боевых радиолокационных систем.

Авторы данной статьи, имеющие непосредственное отношение к радиолокации ПВО и ПРО, решили ознакомить читателей с новейшей разработкой методики расчета максимальной дальности обнаружения баллистических целей по критерию Неймана-Пирсона, изложенной с помощью семи простейших формул, четырех таблиц и пяти графических иллюстраций со ссылками на 17 источников информации.

В качестве примера приведены расчетные значения максимальной дальности обнаружения баллистических целей семи типов радиолокационных станций, привлекаемых для решения задач Глобальной эшелонированной ПРО национальной территории США.

В данной методике учтены новейшие достижения в области физической теории дифракционных краевых и огибающих волн, разработанной 50 лет тому назад Петром Яковлевичем Уфимцевым, который до своего отъезда в США в 1980-1987 гг. читал лекции по теории и практике малой заметности радиолокационных целей (техника Stealth) студентам и аспирантам МАИ.

Кроме того, авторы сочли необходимым сослаться в своей статье на работу других действующих профессоров МАИ – А.И. Куприянова и А.В. Сахарова.

# 1. Моделирование процедуры обнаружения зондирующего сигнала РЛС, обратно рассеянного баллистической целью

Основой функционирования любой ПРО является своевременное оповещение о состоявшихся пусках МБР и БРПЛ противника, а также последующая информация о траектории их полета к цели, желательно с координатами точки

прицеливания боевых блоков. Раннее оповещение возможно только с помощью космических аппаратов, размещенных на геостационарных или эллиптических орбитах и регистрирующих в инфракрасном диапазоне излучения факелов ракет на высотах свыше 50 км. Современные средства раннего оповещения могут подтвердить факт запуска через 60-90 сек после старта и его координаты с ошибкой до 3 км.

Дальнее обнаружение осуществляется системой наземных РАС с большой излучаемой мощностью и снабженных активными фазированными антенными решетками крупных размеров, площадь апертуры которых доходит до 600-1000 м². Это позволяет обнаруживать групповую цель над горизонтом на расстоянии до 5000-6000 км, одиночную — до 4500 км. На подтверждение факта запуска и оценки азимута полета ракеты требуется 5-7 мин. Для стационарных РАС (Аляска, Гренландия) и всего 2-3 мин для РАС передового базирования в Европе.

Информация, полученная средствами раннего и дальнего обнаружения, является исходной для приведения в действие информационноударных комплексов кинетического, огневого или ядерного поражения баллистических целей с предшествующим распознаванием боевых блоков на фоне ложных целей и действия преднамеренных радиопомех. Показателем эффективности радиолокационных средств различного назначения является вероятность обнаружения баллистической цели при заданной вероятности ложной тревоги при отсутствии сигнала, что в условиях отсутствия внешних помех определяется отношением мощности сигнала на входе приемника к мощности внутреннего теплового шума. Эта вероятность определяется по критерию Неймана-Пирсона. В настоящее время процедура вычисления вероятности сводится к простейшим графоаналитическим построениям по данным, приведенным на рисунке 1 [14].

На рисунке 1 по горизонтали указаны значения отношения сигнал/шум, приведенные ко входу приемника, в дБ. По вертикали указаны значения вероятности обнаружения цели в пределах от 0,05 до 0,9999. Наклонные линии характеризует другой параметр процедуры обнаружения цели – вероятность ложной тревоги при отсутствии сигнала в пределах от 10-3 до 10-12. В соответствии с требованием стандарта на РАС США, нормальной считается вероятность обнаружения цели, равная 0,95 при вероятности ложной тревоги 10-6. Искомое значение отношения сигнал/шум определяется по вертикальной линии, опущенной от точки пересечения требуемой вероятности обнаружения и вероят-

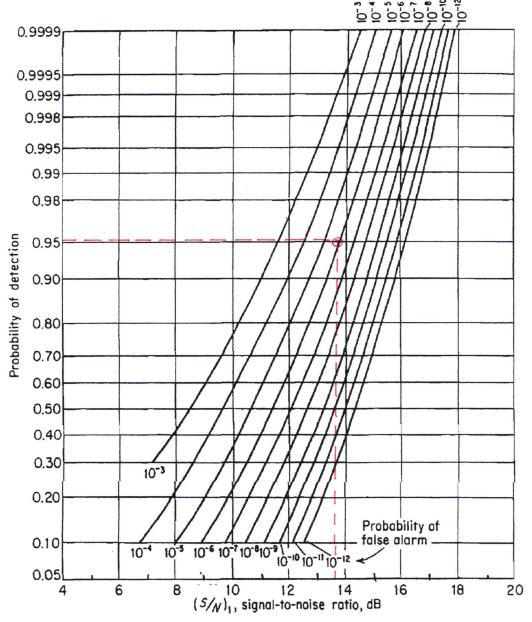


ности ложной тревоги. В данном случае это отношение равно 13,5 дБ (21 раз). На практике принято считать это отношение равным 13 дБ (20 раз) [14].

В настоящее время современные радиолокационные станции используют метод некогерентного накопления энергии сигнала после детектора, в результате чего отношение сигнал/шум на выходе накопителя оказывается больше, чем оно есть на входе приемника. На рисунке 2 приведен график зависимости требуемого отношения мощности сигнала и помехи на входе радиоприемника для достижения вероятности обнаруже-

ния цели 0,95 при вероятности ложной тревоги от  $10^{-4}$  до  $10^{-12}$ . Число накопленных импульсов может меняться от 1 до 10000. В *таблице 1* приведена сравнительная оценка увеличения дальности обнаружения за счет накопления энергии ответных зондирующих импульсов.

Согласно имеющимся данным [4], в современных РАС ПРО США стандартизованы параметры накопления импульсов в зависимости от рубежей дальности обнаружения цели. В частности, для РАС ПРО передового базирования АN/ТРҮ-2 рубеж максимальной дальности обнаружения определен в 1500 км при тактовой ча-



**Рис. 1.** Вероятность обнаружения цели по критерию Неймана-Пирсона в зависимости от отношения мощностей сигнала и теплового шума на входе приемника при заданной вероятности ложной тревоги в отсутствии сигнала



Таблица 1

Сравнительная оценка увеличения дальности обнаружения за счет накопления энергии ответных зондирующих импульсов

Число некогерентно накопленых импульсов		1	10	10²	10³	10 <sup>4</sup>
Наобуалима атианиа силия /илим	дБ	13,5	5,5	-1,0	-6,5	-11,5
Необходимое отношение сигнал/шум	раз	21	3,5	0,8	0,22	0,09
Коэффициент увеличения дальности обнаружения		1,0	1,70	2,25	3,17	4,10

стоте повторения зондирующих импульсов 100 Гц и накоплении 20 импульсов в секунду. Как следует из *рисунка* 2 в этом случае требуемое отношение сигнал/шум составляет 3 дБ (2 раза). Для сравнения, на рубеже 500 км накопление идет по 2 импульса, в результате чего требуется отношение сигнал/шум 11 дБ (12 раз).

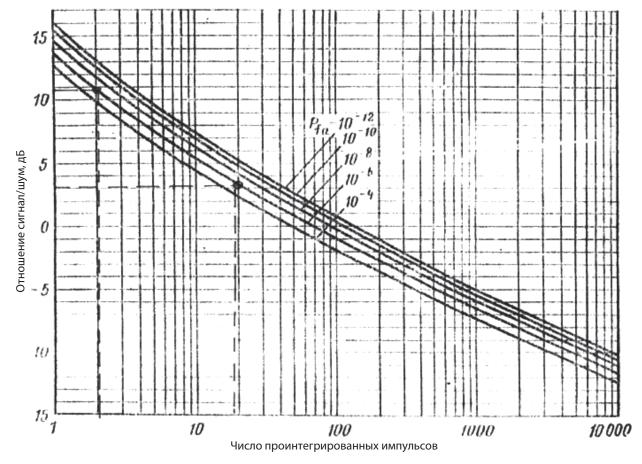
# 2. Моделирование процедуры расчета максимальной дальности обнаружения баллистической цели

Согласно действующему стандарту РАС США, привлекаемых для решения задач ПРО национальной территории США, основными техническими характеристиками являются энергетиче-

ский потенциал, равный произведению излучаемой мощности на площадь апертуры антенны, и отношение мощности сигнала к мощности шума на дальности  $1000~\rm km$  при стандартной площади поверхности обратного рассеяния цели, равной  $1~\rm m^2$  [14].

В *таблице 2* представлены основные технические характеристики РАС, привлекаемых для решения задач ПРО национальной территории США.

Данные *таблицы* 2 позволили рассчитать максимальную дальность обнаружения баллистических целей всех РЛС, привлекаемых для решения задач ПРО США при эффективной площади поверхности обратного рассеяния



**Рис. 2.** Требуемое отношение мощностей сигнала и теплового шума на входе приемника в зависимости от числа проинтегрированных импульсов при заданной вероятности ложной тревоги.



**Таблица 2**Основные технические характеристики РЛС, привлекаемых для решения задач ПРО национальной территории США

Тип РЛС	Энергетический потенциал, Вт×м²	Отношение мощностей сигнала и шума, раз				
GBR-P	1,2 · 10⁵	74				
EMR	5,4 ⋅ 10⁵	380				
THAAD, FBX	7,0 ⋅ 10⁵	437				
SBX	1,5 · 10 <sup>6</sup>	2100				
GBR	3,5 · 10 <sup>6</sup>	7700				
FPS-85	6,9 · 10 <sup>8</sup>	100 000				
Cobra Dane	2,9 · 10 <sup>8</sup>	100 000				

цели в пределах от  $10^4$  м² до 100 м². В таблице 3 приведены расчетные данные максимальной дальности обнаружения баллистической цели для различных РАС [4,11,12]. При этом боевому блоку отводится диапазон от  $10^2$  м² до 1,0 м², выделенный жирным шрифтом, а для корпуса ракеты-носителя от 1,0 м² до 100 м².

Как следует из таблицы 3, РАС дальнего обнаружения AN/FPS-126 и AN/FPS-132 могут обнаруживать боевой блок на максимальной дальности по единичному обратно принятому сигналу в пределах 1420-5080 км, а корпус ракеты – на дальности 8,5-15 тыс. км. В свою очередь, РАС передового базирования AN/TPY-2 (обнаружение, сопровождение, распознавание, прицеливание, наведение и оценка эффективности поражения) могут обнаруживать и сопровождать боевой блок на дальности 550-1720 км. Последние цифры близки к тем, которые приводятся в докладах официальных лиц Управления ПРО МО США (500 км; 1000 км и 1500 км). Самыми низкими характеристиками обладают РАС AN/SPY-1c системы AEGIS морского базирования: 260 км; 470 км; 830 км или по официальным данным 200 км; 400 и 800 км [2,11,14,15].

Содержание таблицы 3 свидетельствует, что радиолокационная заметность боевых блоков баллистических ракет большой дальности может быть заметно уменьшена, если снизить минимальную площадь поверхности обратного рассеяния до  $10^{-3}$  м<sup>2</sup> или даже до  $10^{-4}$  м<sup>2</sup>. В первом случае минимальное значение максимальной дальности обнаружения боевого блока названных выше РАС составит 943 км, 323 км и 157 км соответственно, а во втором – 470 км, 183 км, и 87 км. Эти цифры свидетельствуют, что при современном размещении РАС в Европе обнаружение боевых блоков по одному сигналу крайне усложнено или вовсе невозможно. Правда, дальность обнаружения может быть увеличена за счет некогерентной обработки нескольких ответных сигналов, о чем было сказано выше.

#### Таблица 3

Зависимость максимальной дальности обнаружения баллистической цели от эффективной площади рассеяния о, км (по одиночному ответному сигналу)

o, kin (no odvino monty orbernomy con harry)							
Тип РЛС, длина вол-	Эффективная площадь поверхности обратного рассеяния баллистической цели, м²						
ны, см	10-4	10 <sup>-3</sup>	10-2	10 <sup>-1</sup>	1,0	10	100
AN/FPS-126, AN/FPS-132, 66 cm	470	943	1420	2840	5080	8500	15240
AN/FPS-108, 25 см	667	1150	2000	3450	6000	10350	18000
«Глобус-1» 9,6 см	300	530	920	1660	3000	5300	9200
AN/SPY-1с, 9,6 см	87	157	260	470	830	1410	2490
THAAD, FBX, AN/TPY-2, AN/SPY-3, 3,2 cm	183	323	550	970	1720	2910	5100
EMR, SBP 3,0 cm	373	666	1120	1990	3540	5970	11970
AN/FPS-129 «Глобус-2», 3,0 см	450	800	1420	2500	4500	8000	14200

Основной характеристикой баллистической цели является функция (диаграмма) обратного рассеяния ее энергии зондирующих сигналов РАС, которая выражается зависимостью эффективной площади поверхности обратного рассеяния  $\sigma$  от угла зондирования  $\theta$ . В таблице 4 приведены 11 вариантов простейших геометрических

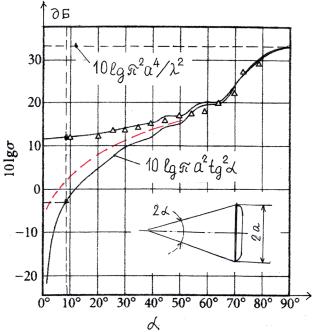


Рис. 3. Зависимость обратного рассеяния прямого линейного конуса с плоской донной частью от угла конусности 2α согласно физической теории дифракционных волн (данные эксперимента) и в соответствии с оптической теорией дифракции (сплошная линия)



фигур и описание диаграммы обратного рассеяния [16].

В рассматриваемом случае для боевого блока баллистической ракеты большой дальности наиболее близкой моделью является остроугольный остроконечный прямой линейный конус с донной частью радиусом a и углом конусности 2a. При облучении под углом  $\theta$ =0° (параллельно продольной оси симметрии) эффективная площадь поверхности конуса равна [9]:

$$\sigma(\theta = 0^0) = n\alpha^2 t g^2 \alpha. \tag{1}$$

Формула (1) получена в терминах теории геометрической оптики [16], которая хорошо подтверждается экспериментальными данными для значений  $\alpha \ge 45^\circ$ . При меньших значениях  $\alpha$  наблюдается значительное увеличение  $\sigma$  по мере уменьшения  $\alpha$ . Это явление объясняется в терминах дифракционных краевых и огибающих волн, создаваемых краем плоской донной части [9,10].

На рисунке 3 приведена зависимость обратного рассеяния прямого линейного конуса с плоской донной частью от угла конусности  $2\alpha$ 

согласно физической теории дифракционных волн (данные эксперимента) и в соответствии с оптической теорией дифракции (сплошная линия). На *рисунке 3* пунктирная горизонтальная линия характеризует максимальное значение  $\sigma$  при  $\alpha$ =90°, когда конус трансформируется в плоский диск радиусом  $\alpha$ :

$$\sigma(\theta = 0^0) = n\alpha^4/\lambda^2, \tag{2}$$

где  $\lambda - д лина волны.$ 

Сплошная линия характеризует изменение  $\sigma$  по законам геометрической оптики [10].

Рисунок 3 свидетельствуют о большом расхождении теоретических и экспериментальных данных от угла конусности  $\alpha$  при малых его значениях [9,10]. Например, при  $\alpha$ =9 $^{\circ}$  реальное рассеяние на 10 дБ больше, чем дает теория геометрической оптики, как показано на рисунке 3. Сопряжение плоской донной части с кормой конуса по радиусу снижает рассеяние, что иллюстрируется пунктирной линией на рисунке 3.

Вертикальная пунктирная линия соответствует значению  $\alpha$ =8,0°, считающимся оптимальным для современных боевых блоков

Таблица 4 (начало)

	Таблица	4 (Ha4ano)
Вид цели	Форма цели	ЭПР цели
Метал- лический шар r>> 2 λ r << 2 λ		$\sigma_0 = \pi r^2$ $\sigma_0 = 144 \frac{\pi^5 r^6}{\lambda^4}$ $\sigma_0 = \sigma_{0 \text{ max}} = \overline{\sigma}_0$
Плоский лист	α β b	$\frac{4\pi ab}{\lambda^2} \left[ \frac{\sin\left(\frac{2\pi a}{\lambda}\sin\alpha\right)}{\frac{2\pi a}{\lambda}\sin\alpha} \frac{\sin\left(\frac{2\pi b}{\lambda}\sin\beta\right)}{\frac{2\pi b}{\lambda}\sin\beta} \right]^2$
Диск		$\sigma_0 = \frac{4\pi^2 r^4}{\lambda^2} \left[ \frac{J_1 \left( \frac{4\pi}{\lambda} r \sin \theta \right)}{\frac{4\pi}{\lambda} r \sin \theta} \right]^2 \cos^2 \theta$ $\sigma_{0_{BMX}} = 4\pi^2 \frac{r^4}{\lambda^2}$
Выпуклая поверхность с радиусами кривизны $\rho_1$ и $\rho_2$	Palpi	$\sigma_{0_{BMX}} = \pi \rho_1 \rho_2$
Уголковый отражатель с прямо- угольными гранями	a	$\sigma_{0_{\rm BMX}} = 12\pi \frac{a^4}{\lambda^2}$



МБР. Здесь верхняя горизонтальная линия соответствует заметности плоского диска диаметром 2a, сплошная кривая – расчетному значению заметности согласно теории дифракции. Как видно из рисунка 3, верхняя кривая, снабженная знаками экспериментальной проверки, свидетельствует, что при изменении  $\alpha$  от  $9^{\rm o}$  до 90° заметность возрастает на 23 дБ (в 200 раз) с учетом влияния краевых дифракционных волн на торце конуса, тогда как без учета этого - на 38 дБ (в 6000 раз). Дальнейшие эксперименты показали, что в случае плавного сопряжения плоской донной части с торцом конуса заметность принимает некоторое промежуточное положение между обеими кривыми. Если  $r \ge \lambda$ , то тогда эти значения находятся ближе к нижней кривой, в среднем снижая заметность при  $\alpha = 9^{\circ}$ в 6-8 раз (8-9 дБ).

# 3. Снижение радиолокационной заметности боевых блоков баллистических ракет большой дальности

Современные боевые блоки баллистических

ракет большой дальности имеют носовое притупление по сфере радиусом несколько сантиметров. Например, в модели боевого блока [3] этот радиус имеет среднее значение 60-80 мм. Сообщается, что наименьшее значение радиуса притупления 20 мм имеют боевые блоки МК-5 с ядерным зарядом W-88 300/475 кт для баллистических ракет подводных лодок «Трайдент-2» D-5 и МК-21 с ядерным боезарядом W-87 300/475 кт баллистических ракет «Минитмен-3». Эти блоки относятся к классу малозаметных боеголовок по стандарту США [6].

Теория и практика показывают [4,5], что при углах конусности  $2a=16^{\circ}-20^{\circ}$ , плоской донной частью, сопряженной с кормой конуса, минимальное значение  $\sigma$  ( $\theta$ =0°) определяется в основном радиусом носового притупления по данным рисунка 4, где представлена нормализованная зависимость  $\sigma/na^2$  от отношения длины окружности полусферы 2na к длине волны. Здесь наблюдаются три характерных области:

- область Релеевского рассеяния при  $2n/\lambda \le 0.8$ ;
- резонансная область при  $2n/\lambda \ge 1,0$ ;

Таблица 4 (окончание)

Таолица + (окончание)				
Бикониче- ский отражатель	900 6,	$\sigma_{0_{BMX}} = \frac{32\pi}{9\lambda} \left( b_2 \sqrt{2 b_2 - b_1} - \sqrt{b_1^3} \right)^2$		
Конус (вдоль оси)	a) a	$\sigma_{0_{\rm Bbix}} = \pi a^2 \mathrm{tg}^2 \alpha$		
Цилиндр	227	$\sigma_0 = \frac{4\pi^2 r l^2}{\lambda} \left[ \frac{\sin\left(\frac{4\pi l}{\lambda}\sin\theta\right)}{\frac{4\pi l}{\lambda}\sin\theta} \right]^2 \sin\theta$ $\sigma_{0\text{BMX}} = 12\pi \frac{r l^2}{\lambda^2}$		
Поверх- ность оживальной формы	20,	$\sigma_{0_{\rm BMX}} = \frac{\lambda^2}{16\pi} i g^4 \Theta_0$		
Конус со сферическим основанием	φα	$\sigma_0 = 1,03\pi r^2 \sqrt{\left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right)^5}$ $1 < \frac{2\pi r}{\lambda} < 1,5$		
Конус- цилиндр		$\sigma_0 = \frac{4\pi^3 r^2}{\left(\pi + \alpha\right)^2} \times \frac{\sin^2\left(\frac{\pi^2}{\pi + \alpha}\right)}{\left[\cos\left(\frac{\pi^2}{\pi + \alpha}\right) - \cos\left(\frac{2\pi^2}{\pi + \alpha}\right)\right]^2}.$		



• область оптического рассеяния при  $2n/\lambda \ge 10$ . Формула для расчета рассеяния металлического шара небольших размеров  $(a \le \lambda/2n)$  была впервые выведена лордом Релеем в1881 году как  $\sigma = 4,41\cdot 10^4 a^6/\lambda^4$ . (3)

Для металлического шара больших размеров, когда  $a \ge \lambda/2n$ , осциллирующая функция имеет вид:

$$\sigma = n\alpha^2 (1 \pm 0, 144 \cdot 10^4 \lambda/\alpha) \tag{4}$$

Из (4) следует, что осцилляцию можно не учитывать при  $2n/\lambda \ge 10$ , как видно из *рисунка 6*. Для большинства практических случаев можно считать, что если  $2na \ge 5$ , то

$$\sigma \approx n\alpha^2$$
. (5)

и не зависит от  $\lambda$ .

Оценим величину  $\sigma$  на волне 3,2 см при различных значениях радиуса носового притупления R=a:

После подстановки в (5) значения R=a=8,0 см; 6,0 см и 2,0 см, получаем  $\sigma=2,0\cdot 10^{-2}$  м²;  $1,1\cdot 10^{-2}$  м²;  $9,5\cdot 10^{-4}$  м² соответственно.

Из рисунка 4 следует, что для значительного уменьшения величины  $\sigma$  (заметности) боевого блока требуется уменьшение радиуса носового притупления R, так, чтобы работать в области релеевского рассеяния, когда  $2n/\lambda \le 0.6$ ; или

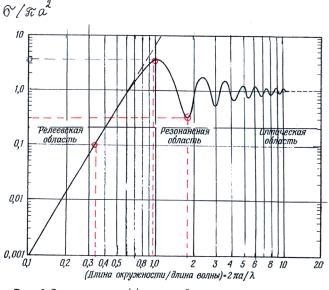
$$\alpha/\lambda \le 0.6/2n = 9.7 \cdot 10^{-2} \approx 0.1,$$
 (6)

или

$$\alpha \le 0.1\lambda.$$
 (7)

Очевидно, что для  $\lambda$ =3,2 см это условие выполняется, если  $\alpha$ <0,1 $\lambda$ =0,32 см.

Реализовать столь малый радиус в настоящее время не представляется возможным, следовательно, в малозаметный блок имеет минимальное значение  $\sigma \approx 10^{-3} \text{м}^2$  без учета дополнительных потерь.



**Рис. 4.** Зависимость эффективной площади поверхности обратного рассеяния сферы от ее размера

Согласно модели стандартного боевого блока, принятой в [3], среднеквадратическое значение  $\sigma$  при различных углах зондирования  $\theta$ может находиться в пределах  $\sigma$ =10-2-1,0 м². Эта модель использована также в [2,4,5,8,15] при оценке эффективности рубежей ПРО США.

Отметим основные преимущества малозаметных боевых блоков с точки зрения снижения их радиолокационной заметности.

Первый самый заметный результат – уменьшение максимальной дальности обнаружения боевых блоков РАС контроля космического пространства, РАС дальнего обнаружения баллистических целей, а также РАС боевых комплексов ПРО.

Второй результат - при радиолокационной заметности менее 0,01 м<sup>2</sup> резко возрастает вероятность ложных тревог из-за возможных отражений от малоразмерных объектов (например, перелетных птиц). Эта особенность РАС была обнаружена еще более 70 лет назад и в настоящее время является источником большого числа ложных тревог в системах ПВО и ПРО. Особенно часто такие ложные тревоги наблюдаются в северных широтах весной и осенью, когда наблюдается сезонная миграция диких гусей, лебедей, уток и других птиц. На рисунке 5 приведены результаты натурных исследований американских орнитологов и специалистов радиолокации по определению радиолокационной заметности одиночных птиц различных видов [20]. Здесь по горизонтали - масса птицы, в граммах, по вертикали – заметность, в квадратных сантиметрах на волне длиной 9,6 см. Сплошные линии получены при облучении птиц под углом  $\theta$ =0°±20° со стороны головы, пунктиром - со стороны хвоста,  $\theta$ =180°±20° для случаев прижатых к телу крыльев. Цифрами обозначены: 1 – воробей; 2 – чибис; 3 – голубь; 5 – чайка; 6 – утка. Данные по птицам массой более 1000 грамм (орлы, альбатросы, кондоры, поморники и др.) открыто не публиковались.

#### Заключение

Описанная методика расчета максимальной дальности обнаружения баллистических целей позволяет на основе имеющихся данных диаграммы обратного рассеяния целей оценить диапазон ее изменения применительно к большому числу типов РАС, привлекаемых к решению задач ПРО США. Сделан вывод о возможности создания малозаметных боевых блоков баллистических ракет большой дальности за счет уменьшения радиуса носового притупления. При достижении заметности менее 0,01 м² обнаружение боевого блока объясняется влиянием полета



крупных птиц и других природных явлений.

Таким образом, в зоне  $\sigma$ < 10-2 см² боевой блок может маскироваться не только собственными ложными целями, но и стаями, либо одиночными птицами. Эту возможность уже давно и эффективно использует Армия обороны Израиля, применяя разведывательные и ударные беспилотные летательные аппараты малой заметности, снабженные электрическими двигателями. В результате РЛС арабских стран не могут достоверно обнаружить их наземными РЛС и поразить ЗРК с инфракрасной головкой самонаведения.

## Литература

- 1. A Simple Model for Calculating Ballistic Missile Defense Effectiveness By Dean A. Wilkening // Science & Global Security, 1999, Vol. 89, №2. Pp. 183-215.
- 2. MEADS Program Overview // Meads Quternational, Quc. / M115-1405, 12 December 2005. 17 p.
- 3. THAAD Like High Altitude Theater Missile Defense: Strategic Defense Capability and Certain Countermeasures Analysis. By HeYingbo, Qiu Yong. // Science & Global Security, 2003, Vol. 11. Pp. 151-202.
  4. Can the EuropeanPhased Adaptive Approach
- 4. Can the EuropeanPhased Adaptive Approach Strategic Ballistic Quatercept Russian Strategic

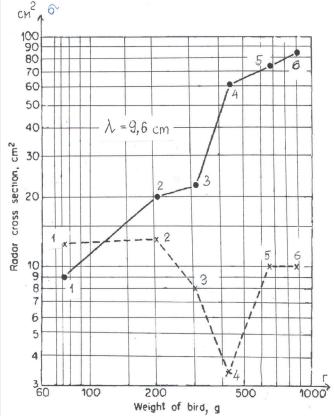


Рис. 5. Результаты натурных исследований по определению радиолокационной заметности одиночных птиц различных видов в зависимости от их массы и направления полета

- Ballistic Missiles? By Dean A. Wilkening // Center for Quternational Security and Cooperation, Stanford University. September 2, 2011. 20 p.
- 5. Countermeasures. A Technical Evaluation of the Operational of the Planned US National Missile Defense System. Andrew M. Sessler (Chair of the Study Group), John M. Cornwall, Bob Dietz, Steve Fetter, Sherman Frankel, Richard L. Garwin, Kurt Gottfried, Lisbeth Gronlund, George N. Lewis, Theodor A. Postol, David C. Wright. Union of Concerned Scientists MIT Security Studies Program, April, 2000. 200 p.
- 6. Ядерное оружие США / Под общей редакцией академика РАН В.Н. Михайлова. М.: Институт стратегической стабильности государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», 2011. 186 с.
- 7. The 50-Year Anniversary of the PTD: Comments on the PTD's Origin and Development. By Pyotr Y. Ufimtsev. // IEEE Antennas ans Propagation Magazine, Vol. 55, N 3, June 2013. Pp. 18-28.
- 8. European Ballistic Missile Defense Options. By Dean Wilkening. Center for International Security and Cooperation, Stanford University. September 2009. 29 p.
- 9. Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction. By Pyotr Y. Ufimtsev. Willey - Interscience, A John Willey & Sons, Inc., Publication, 2007. 329 p.
- 10. Comment of Diffraction Principles and Limitations of RCS Reduction Techniques. By Pyotr Y. Ufimtsev. // Proceeding of the IEEE, Vol. 84, N 12, 1996. Pp. 1830-1851.
- 11. Ballistic Missile Defense. Edited by Ashton B. Carter, David N. Schwarts. The Brookings Institution, Washington, D.C., 1984. 455 p.
- 12. Introduction to Radio Systems. By Merrill I. Scolnik. Second Edition, Mc Graw Hill Company, London, 1981. 580 p.
- 13. Radar Handbook. Third Editor. Editorin Chief Merrill Ivanovitch Skolnik. Mc Graw-Hill Comhany, New York, 2008. 1352 p.
- 14. The Proposed US Missile Defense in Euroupe: Technological Issues Relevant Policy. By Theodore A. Postol and George N. Lews.// American Association of the Advancement of Science, Washington, DC, August 28, 2007. 40 p.
- 15. Airborne Boost-Phase Ballistic Missile Defense. By Dean Wilkening.// Science and Global Security, Vol. 12, №1, 2004. P.1-67.
- 16. Куприянов А.И., Сахаров А.В. Радиоэлектронные системы в информационном конфликте. М.: Вузовская книга, 2003. 528 с.
- 17. Уфимцев П.Я. Теория дифракционных краевых волн в электродинамике. Пер. с англ. П.Я. Уфимцева. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. 366 с.



**УДК 004.85** 

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЗОВЫХ РЕКУРСИВНЫХ БЛОКОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОГО УРОВНЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОСТИ РЕКУРСИИ

USE OF BASIC RECURSIVE UNITS
TO PROVIDE A HIGH LEVEL OF
RECURSION PARALLELISM



аспирант

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2

Тел.: 8 (910) 915-58-25 E-mail: vershinin\_ve@mail.ru

## Анатолий Викторович Мазин

доктор технических наук, профессор заведующий кафедрой «Защита информации» Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2

Тел.: 8 (910) 915-58-25 E-mail: mazinav@yandex.ru

## Евгений Владимирович Вершинин

кандидат физико-математических наук, доцент заведующий кафедрой «Системы обработки информации» Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2

Тел.: 8 (910) 510-73-50 E-mail: yevgeniyv@mail.ru

#### Аннотация

В работе обосновываются предпосылки для увеличения скорости обучения рекуррентных нейронных сетей. Рассматриваются алгоритм и архитектура модели, позволяющие оптимизировать выполнение рекурсивных вычислений путем их распараллеливания. Приводятся результаты эксперимента, проводимого с использованием описанной модели для одной из задач по обработке естественного языка.

**Ключевые слова:** обработка естественного языка, рекуррентная нейронная сеть, рекурсия, параллельные вычисления, эмоциональная окраска текста.

#### Summary

The paper substantiates the prerequisites for increasing the learning speed of recurrent neural networks. The next part contains algorithm and architecture of the model that allow to optimize the execution of recursive calculations by parallelizing. The results of an experiment conducted using the described model for one of the natural language processing tasks are presented.

**Keywords:** natural language processing, recurrent neural network, recursion, parallel processing, text emotional coloring.

#### Введение

Рекуррентные нейронные сети в настоящее время являются ядром наиболее используемых подходов, применяющихся для большого спектра задач по обработке естественного языка. В их числе машинный перевод, определение тональности фрагментов текста, генерация аннотаций и другие [1]. Ключом к решению многих из этих задач являются архитектуры повышенной емкости и количества вычислений. Например, самые высокоэффективные модели для ролевой маркировки и перевода используют восемь рекуррентных слоев, требующих нескольких дней для полноценного обучения. Масштабируемость подобных моделей стала одной из наиболее кри-

тичных проблем, которые мешают исследованиям в области обработки естественного языка.

Сложность масштабирования рекуррентных сетей увеличивается в зависимости от времени вычисления состояний. В стандартных архитектурах, таких как долгая краткосрочная память (Long short-term memory, LSTM) и управляемых рекуррентных блоках (Gated Recurrent Units, GRU), вычисление каждого шага приостанавливается до полного выполнения предыдущего этапа. Данная рекурсия делает выполнение операций в рекуррентных сетях значительно более медленным, по сравнению с другими архитектурами, и ограничивает их применимость. Например, последние модели сетей для опре-



деления эмоциональной окраски текстов состоят в основном из нерекурсивных компонентов, таких как фокусировка и свертка, для обеспечения масштабируемости процесса обучения [2]. В связи с этим предлагается использовать базовые рекурсивные блоки (Basic Recursive Blocks, BRB), реализующие легковесную рекурсию, обеспечивающую высокий уровень как распараллеливания, так и емкости. Структура BRB частично основывается на модели квази-рекуррентных нейронных сетей (Quasi-Recurrent Neural Networks, QRNN), но обладает дополнительными преимуществами:

- Демонстрируется такой же уровень параллелизма, как и в сверточных сетях. Это достигается путем балансировки между последовательными зависимостями и автономными операциями: если вычисление состояний в BRB зависит от предыдущих уровней, то каждое из измерений состояния является независимым. Это упрощение позволяет задействовать оптимизацию на CUDA-уровне (Compute Unified Device Architecture), которая распараллеливает вычисления скрытых измерений и рекурсивных шагов, эффективно используя все возможности современных графических процессоров.
- Не используются операции свертки, применяемые в QRNN. Они заменяются большим количеством рекуррентных связей, тем самым сохраняя требуемую емкость при меньшем объеме вычислений.
- •Улучшен процесс обучения глубоких рекуррентных моделей, посредством использования «магистральных» соединений [3] и схемы инициализации параметров, адаптированной для глубоких архитектур нейронных сетей.

## Архитектура модели

Рассмотрим подробно структуру BRB. Каждый его уровень BRB включает в себя следующие вычисления:

$$\mathbf{f}_t = \sigma \left( \mathbf{W}_f \mathbf{x}_t + \mathbf{v}_f \odot \mathbf{c}_{t-1} + \mathbf{b}_f \right) \quad (1)$$

$$\mathbf{c}_t = \mathbf{f}_t \odot \mathbf{c}_{t-1} + (1 - \mathbf{f}_t) \odot (\mathbf{W} \mathbf{x}_t)$$
 (2)

$$\mathbf{r}_t = \sigma \left( \mathbf{W}_r \mathbf{x}_t + \mathbf{v}_r \odot \mathbf{c}_{t-1} + \mathbf{b}_r \right)$$
 (3)

$$\mathbf{h}_t = \mathbf{r}_t \odot \mathbf{c}_t + (1 - \mathbf{r}_t) \odot \mathbf{x}_t \tag{4}$$

Здесь W,  $W_f$  и  $W_r$  являются матрицами параметров, а  $v_f$ ,  $v_r$ ,  $b_f$  и  $b_r$  векторами параметров, которые будут приведены к оптимальным значениям в процессе обучения. Полная архитектура состоит из двух компонентов: легковесной рекурсии (выражения 1 и 2) и «магистральной» сети связей (выражения 3 и 4).

В ходе выполнения рекурсии поэтапно считываются входные векторы  $x_{_{l}}$  и вычисляется

цепочка состояний  $c_l$ , позволяющая захватывать последовательную информацию. Сами вычисления имеют сходство с другими моделями рекуррентных сетей, например LSTM. В целом «фильтр забывания»  $f_l$  отвечает за контроль информационного потока, а цепочка состояний  $c_l$  вычисляется путем адаптивного усреднения предыдущего состояния  $c_{l-1}$  и текущего значения параметров  $W_{sd}$ , на основании  $f_l$ .

Ключевым решением при проектировании BRB, которое отличает его от других архитектур использующих фильтры, стал способ использования  $c_{\iota,l}$  в сигмоидальном фильтре. Обычно  $c_{\iota,l}$  перемножается с матрицей параметров для вычисления  $f_{\iota}$ , к примеру

$$f_t = \sigma(W_{t} x_t + V_{t} c_{t-1} + b_t).$$

Именно использование  $V_{f_{l,l}}$  затрудняет распараллеливание вычисления состояний: каждое из измерений  $c_l$  и  $f_l$  зависит от всех входов  $c_{l,l}$ , а значит процессу придется ожидать полного вычисления предыдущего этапа. Для обеспечения параллельности вычислений в нашей рекурсии используется поточечное произведение. Благодаря этому упрощению каждое измерение вектора состояния становится независимым и, как следствие, доступным для параллельного вычисления.

Магистральная сеть связей в свою очередь облегчает процесс обучения глубоких сетей. Она использует фильтр сброса  $r_{\iota}$  для совмещения входа  $x_{\iota}$  и состояния  $c_{\iota}$ , полученного из рекурсии, тем самым позволяя градиенту спуститься на предыдущий слой. Применение данного способа показало свою эффективность для улучшения масштабируемости модели [4].

Таким образом, комбинация этих двух компонентов делает общую архитектуру модели простой, эффективной и масштабируемой благодаря улучшению параллельности вычислений и градиентного спуска.

## Параллельная реализация

Не смотря на то, что структура модели была разработана для использования параллельных вычислений, наивная реализация, которая будет обрабатывать выражения (1)-(4) последовательно для каждого шага t, может не достигнуть своего полного потенциала. Предлагается использовать два усовершенствования в контексте программирования GPU/CUDA, однако основная идея может быть реализована и на других программно-аппаратных архитектурах параллельных вычислений.

Следует реализовать вычисление выражений (1)-(4) в виде двух основных этапов. На первом необходимо равномерно распределить все опе-



рации умножения матриц и входной последовательности между всеми этапами выполнения обучения. На втором шаге выполняется вычисление оставшихся поточечных операций. Для этого нужно скомпилировать все такие операции в одно CUDA-ядро и распараллелить вычисления между каждым измерением скрытого состояния. Временная сложность этого алгоритма равна O(LBd) для каждого уровня сети. Здесь L – длина последовательности, B – количество тренировочных объектов в партии, а d – размер вектора скрытых состояний. Для сравнения, сложность вычислений в LSTM  $O(LBd^2)$  из-за перемножения измерений скрытых состояний и невозможности осуществления их параллельного выполнения. CUDA ядро само по себе также обеспечивает дополнительный уровень оптимизации.

Без описанной выше модификации, для таких операций как сигмоидальная функция активации, каждый раз будут выполняться новый вызов процедуры, тем самым добавляя задержку и дополнительные затраты на перемещение данных.

## Инициализация модели

Правильный подбор параметров модели может способствовать уменьшению проблем при градиентном спуске, а значит будет способствовать увеличению общей производительности модели. Ниже будут приведены параметры инициализации, с использованием которых были получены наилучшие результаты.

Для используемого оптимизатора ADAM начальная скорость обучения установлена на 0,001. Остальные параметры принимают значения по умолчанию. Количество объектов в каждой партии – 800, размер вектора скрытых состояний = 256, а вероятность отсева = 0.1.

#### Тестирование модели

Описанная выше модель может применяться для решения различных задач по обработке естественного языка. При этом общая производительность модели будет отличаться, так как большое влияние будут оказывать как тестовые данные, так и другие параметры, которые являются специфичными для каждой отдельной области использования.

В данном случае модель тестировалась для определения эмоциональной окраски текстов. Было принято решение сравнить эффективность модели на двух различных обучающих выборках: «Stanford Sentiment Treebank» и «IMDB movie review dataset». В качестве векторных представлений слов используются 300-мерные вектора GloVe, обученные на множестве

Common Crawl, состоящем из 840 миллиардов токенов. Процесс обучения протекал 100 эпох, обучающие данные разбивались стандартным способом.

Средние результаты точности реализованной модели, полученные в ходе 5, независимых между собой, прогонов были сопоставлены с данными, опубликованными различными авторами, которые решали аналогичную задачу, используя другие архитектуры нейронных сетей, но те же обучающие выборки. По итогам сравнения BRB показали приблизительно равную точность с QRNN [5] и LSTM. Однако прирост в скорости обучения составил от 5 до 9 раз относительно LSTM и от 15% до 25% при сравнении с QRNN.

#### Вывод

Таким образом, основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод о применимости разработанной модели для оптимизации процесса обучения рекуррентных моделей нейронных сетей, путем распараллеливания вычислений. И хотя общая производительность модели при этом сохраняется на уровне аналогов, значительное уменьшение временных затрат на процесс обучения оправдывают себя.

#### Литература

- 1. Alaa A. Qaffas, Improvement of Chatbots Semantics Using Wit.ai and Word Sequence Kernel: Education Chatbot as a Case Study, International Journal of Modern Education and Computer Science(IJMECS), Vol.11, No.3, pp. 16-22, 2019.DOI: 10.5815/ijmecs.2019.03.03.
- 2. Вершинин Е.В., Вершинин В.Е. К вопросу об использовании рекуррентносверточных нейросетевых моделей для обнаружения текстового контента с заданной эмоциональной окраской // Национальная безопасность России: актуальные аспекты: сборник статей Всероссийской научнопрактической конференции (Санкт-Петербург, Сентябрь 2019). СПб.: ГНИИ «Нацразвитие», 2019. С.12-16.
- 3. Rupesh Srivastava, Klaus Greff, Jürgen Schmidhuber. Training Very Deep Networks. In proceedings of NIPS, 2015. URL: https://arxiv.org/abs/1507.06228.
- 4. Julian Georg Zilly, Jan Koutník, Jürgen Schmidhuber Recurrent Highway Networks. In proceedings of International Conference on Machine Learning, 2017. URL: https://arxiv.org/abs/1607.03474.
- 5. James Bradbury, Stephen Merity, Caiming Xiong, and Richard Socher. Quasi-recurrent neural networks. In Proceedings of the International Conference on Learning Representations, 2017. URL: https://arxiv.org/abs/1611.01576v2.





УДК 004.056

## КОНЦЕПЦИИ И РЕАЛИЗАЦИЯ ЦЕНТРА ОПЕРАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

CONCEPTS AND
IMPLEMENTATION OF THE
OPERATIONAL SECURITY
CENTER

## Ирина Андреевна Колягина

студент

ФГБОУ ВО «МГТУ Н.Э. Баумана (НИУ)»

Адрес: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1 Тел.: 8 (977) 803-43-13

E-mail: airishandreevna@gmail.com

## Вероника Анатольевна Фёдорова

кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)»

Адрес: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

Тел.: 8 (985) 815-5321 E-mail: bmstukf@mail.ru

## Дмитрий Александрович Руссак

студент

ФГБОУ ВО «МГТУ имени Н.Э. Баумана (НИУ)»

Адрес: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1 Тел.: 8 (916) 800-78-59 E-mail: drussak@yandex.ru

#### Аннотация

Центр операционной безопасности (SOC) состоит из пяти отдельных типов модулей: источников событий, коллекторов событий, баз данных сообщений, механизмов анализа и программного обеспечения для управления реагированием на инциденты информационной безопасности. Основная проблема, возникающая при построении SOC, заключается в интеграции всех этих модулей, обычно построенных как автономные части, при одновременном обеспечении доступности, целостности и безопасности данных и каналов их передачи. В статье анализируется функциональная архитектура, необходимая для интеграции этих модулей. Представлены концепции, лежащие в основе каждого модуля, и кратко описаны общие проблемы, возникающие с каждым из них. Предложена разработка глобальной архитектуры SOC. Выполнен анализ при сборе и анализе данных, генерируемых датчиками.

**Ключевые слова:** Центр операционной безопасности, информационная безопасность, реагирование на инциденты, расследование инцидентов.

### Summary

The Operational Security center (SOC) consists of five separate types of modules: event sources, event collectors, message databases, analysis mechanisms, and software for managing information security incident response. The main problem that arises when building SOCS is to integrate all these modules, usually built as standalone parts, while ensuring the availability, integrity, and security of data and its transmission channels. The article analyzes the functional architecture required for the integration of these modules. The concepts underlying each module are presented, and the common problems encountered with each module are briefly described. The development of a global SOC architecture was proposed. The analysis was performed when collecting and analyzing data generated by sensors.

**Keywords:** Security Operation Center, SOC, cybersecurity, information security, prevention of data leak, threat intelligent, incident response.

## Введение

Центр операционной безопасности (SOC) – это общий термин, описывающий часть или всю платформу, предназначенную для предоставления служб обнаружения и реагирования на инциденты безопасности. В соответствии с этим определением можно выделить пять операций, которые должны выполняться SOC: генерация событий безопасности, сбор, хранение, анализ и реакция.

Для наглядности распределим все по компонентам, то есть:

Е – источники событий (АРМы, сервера, ПО);

D – базы данных событий;

R – реагирование (процесс реагирования на инциденты);

A – получение отчетов и выполнение анализа (процесс анализа событий);

С – коллекция событий и форматирование.



Каждый компонент описывает функциональную группу «модулей», выполняющих определенные операции. В качестве примера компонент под индексом «Е» может представлять собой группу приложений, генерирующих системные события через стандартный интерфейс системного журнала операционной системы, на которой они выполняются. Это также может быть пул сетевых идентификаторов. Графически архитектура компонентов представлена на рисунке 1.

Е-компонент отвечает за генерацию событий. Можно выделить два основных семейства таких блоков: генераторы данных на основе событий (т.е. датчики), которые генерируют события в соответствии с конкретной операцией, выполняемой в ОС, приложениях или по сети, и генераторы данных на основе состояния, которые генерируют событие в соответствии с реакцией

на внешнее воздействие, такой как ping, проверка целостности данных или проверка состояния демона.

#### Датчики

Наиболее известным типом датчиков являются идентификаторы, например конечное устройство, на котором работает пользователь или сервер. Также можно добавить к этой категории практически любую систему фильтрации (сетевую, прикладную или пользовательскую), обеспечивающую ведение журнала, брандмауэры, маршрутизаторы с ACL, коммутаторы и беспроводные концентраторы, реализующие ограничение MAC-адресов, RADIUS-серверы, SNMP-стеки и др. В крайнем случае, «honeypots» и сетевые снифферы также должны рассматриваться как датчики. В последнем случае каждый анализатор пакетов будет генерировать событие.

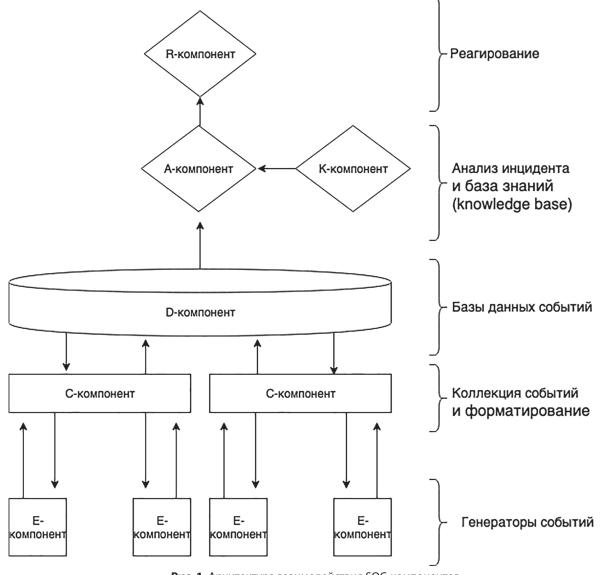


Рис. 1. Архитектура взаимодействия SOC-компонентов

Каждый датчик должен рассматриваться как автономный агент, работающий во враждебной среде, и, соответствуя следующим характеристикам: работать непрерывно, быть отказоустойчивым, генерировать минимальные накладные расходы, быть конфигурируемым и адаптируемым, быть масштабируемым, обеспечивать изящную деградацию обслуживания и позволять динамическую реконфигурацию.

### С и D компоненты

Назначение этих компонентов – собирать информацию с различных датчиков и переводить ее в стандартный формат, чтобы иметь однородную базу сообщений (то есть нормализовать события).

Доступность и масштабируемость этих компонентов являются серьезной проблемой. Однако такие аспекты могут управляться способом, аналогичным тому, который используется для любой серверной службы, с использованием кластеров, высокой доступности и балансировки нагрузки выделенного оборудования/устройств.

Стандартное форматирование собранных данных, представляется гораздо более теоретическим и все еще вызывает споры вокруг сообщества безопасности. Однако неофициальные расширения уже необходимы для целей корреляции, а также для управления распределенными датчиками.

Компоненты типа «D» – базы данных, стандартные модули, которые находятся в архитектуре SOC.

Единственная специфическая операция SOC, выполняемая этим типом компонентов – базовый уровень корреляции для идентификации и слияния дубликатов либо из одного, либо из разных источников, выявления аномалий в сети.

Помимо классических проблем, связанных с доступностью, целостностью и конфиденциальностью баз данных, компоненты типа «D», будут в основном сталкиваться с проблемой производительности, поскольку датчики могут генерировать десятки сообщений каждую секунду. Эти сообщения должны быть сохранены, обработаны и проанализированы как можно быстрее, чтобы обеспечить своевременную реакцию на попытки вторжения или успех [1].

## А и К компоненты

Эти модули отвечают за анализ событий, хранящихся в D-компонентах. Они должны выполнять различные операции для предоставления квалифицированных предупреждающих сообщений, которые минимизирует количество ложных срабатываний.

Этот вид операции, является тем, на котором сосредоточено большинство современных исследований, с точки зрения корреляционных алгоритмов, обнаружения ложноположительных сообщений, математического представления или распределенной работы.

Однако разнообразие таких исследований и ранняя стадия реализации (в основном ограниченная доказательством концепции) приводят к разработке модуля, который является наиболее патентованной и нестандартной частью SOC. Таким образом, мы представляем подход, касающийся структурного анализа попыток вторжения, а также анализа поведения, т.е. согласования с политикой безопасности.

Очевидно, что процесс анализа требует ввода данных из базы данных, в которой хранятся характеристики путей проникновения, модель защищенной системы и политика безопасности. В этом и заключается цель К компонентов.

## R компоненты

Это общий термин, используемый для определения совокупности средств реагирования и отчетности, используемых для реагирования на события нарушения, происходящие в контролируемых системах или внутри них.

Опыт показывает, что это очень субъективная концепция, поскольку она включает в себя эргономику графического интерфейса, стратегию применения политики безопасности, правовые ограничения и договорные SLA со стороны надзорной команды по отношению к клиенту [2].

Эти субъективные ограничения делают практически невозможным определение чеголибо иного, кроме рекомендаций и наилучшей практики, основанной на реальном жизненном опыте с течением времени. Однако важность R-компонентов не следует недооценивать, поскольку попытка вторжения вполне может быть прекрасно проанализирована и квалифицирована, но все операции окажутся бесполезными, если в течение определенного промежутка времени не будут приняты по устранению возникшей проблемы безопасности.

## Общая архитектура SOC

Глобальная архитектура SOC реализует различные типы блоков, определенные в предыдущей части. Однако, помимо чисто технических аспектов, связанных с такой реализацией, необходимо рассматривать надзор за ИТ-инфраструктурой как полноценный операционный проект. Таким образом, мы будем следовать функциональным шагам такого проекта, чтобы описать как назначение, так и концепции от-



дельных частей архитектуры, описанных алгоритмом на рисунке 2.

#### Сбор данных

Перед настройкой датчиков и разработкой любого правила корреляции или анализа необходимо оценить общий уровень безопасности контролируемой ИТ-инфраструктуры. Это позволит определить, может ли путь вторжения эффективно привести к вторжению в целевую систему и критичность, связанную с такой попыткой вторжения.

Еще один момент, который необходимо определить — это политика безопасности, в основном с точки зрения прав доступа, разрешенных операций и т.д. [3].

# Техническая и организационная инвентаризация

Оценку уровня безопасности можно разделить на две части: оценка уязвимости и критичность системы. Эти данные должны храниться в определенном модуле базы знаний: записи конфигурации клиента (ССR).

Сбор этих данных может осуществляться двумя различными способами: методом черного ящика (тестирование на проникновение) либо методом белого ящика (аудит) [4].

Первое является типичным результатом процесса слепого тестирования на проникновение. Такой процесс широко внедряется и быстро дает результаты. Однако последний подход представляется более подходящим для структурирован-

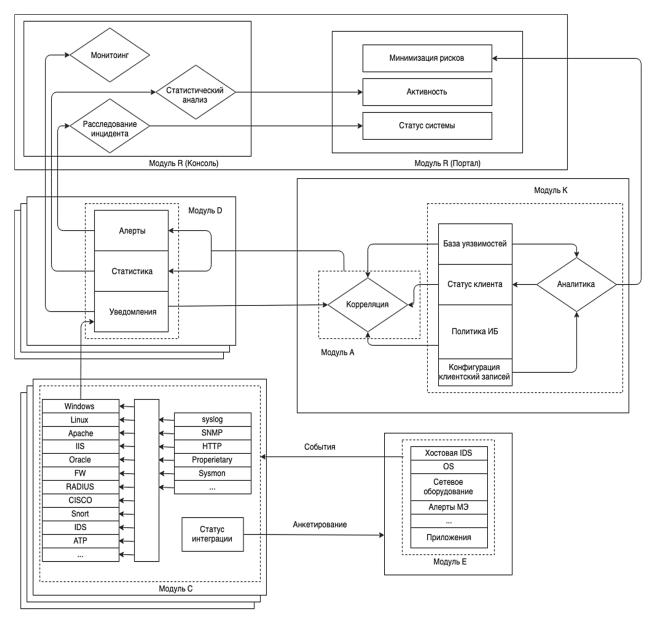


Рис. 2. Архитектура SOC



ного и постоянного контроля за процессом функционирования центра операционной безопасности. Наиболее эффективным вариантом является объединение этих двух методов контроля.

Критичность системы должна определяться в соответствии с относительным воздействием, которое вторжение может оказать на каждый тип последствий. Поскольку такой подход очень субъективен, то работа должна быть выполнена с использованием стандартного метода систематизации атак и их классификации [5].

#### Политика безопасности

Следующим этапом инвентаризации контролируемой системы является организационный и, более конкретный, обзор аспектов политики безопасности, которые могут повлиять на генерацию событий и/или процессы отчетности о реагировании.

Очевидно, что два основных аспекта политики безопасности, которые необходимо пересмотреть – это процедуры авторизации и тестирования/аудита. Эти два аспекта предоставят информацию о поведении, которое обнаружат датчики. Стенерированные события (логин администратора, сканирование портов и т.д.) будут помечены как соответствующие критериям политики безопасности. Другие будут проанализированы как возможная часть попытки вторжения.

#### Оценка состояния

Последняя часть базы знаний представляет собой детальную оценку уровня безопасности систем, подлежащих мониторингу. Цель состоит в том, чтобы обработать оценку с помощью механизма анализа, способного интегрировать вид уязвимостей, а также ограничения политики безопасности. Механизм должен предоставлять список уязвимостей, которым подвержена каждая система, относительное воздействие каждой уязвимости и пути проникновения, ведущие к активации "неактивных" уязвимостей.

Чтобы быть надежной, такая оценка должна повторяться каждый раз, когда обнаруживается новая уязвимость или изменяется одна из отслеживаемых систем.

#### Сбор и хранение информации

Основными операциями, выполняемыми коллекторами, являются прием необработанных сообщений по различным протоколам и идентификация/форматирование типа источника. После форматирования сообщение сохраняется в базе данных событий. Проблемы производительности и доступности, естественно,

подразумевают разработку масштабируемой архитектуры, которая позволяет широко распределять коллекторы и базы данных по сети [1].

#### Структурные и поведенческие предупреждения

Основными операциями, которые генерируют оповещения, являются следующие: корреляция, структурный анализ, анализ путей проникновения и анализ поведения.

Корреляция – автономная операция, ведущая к созданию контекстов, в отношении которых будет проведен дальнейший анализ, чтобы проверить, соответствуют ли они характеристикам попытки вторжения.

Структурный анализ можно сравнить с усовершенствованным процессом сопоставления шаблонов, используемым для определения того, приводят ли события, хранящиеся в определенном контексте, к известному пути вторжения [1].

Анализ путей проникновения – это следующий шаг, на выходе которого будет получена информация о подверженности целевой системы, обнаруженной попытке проникновения. Затем анализ поведения интегрирует элементы из политики безопасности, чтобы определить, разрешена ли попытка вторжения или нет.

Целью таких операций является создание предупреждений, которые не только соответствуют структурному пути вторжения (т.е. сканирование, снятие отпечатков пальцев, эксплуатация, создание «бэкдоров» и т.д.), но также помогает усовершенствовать политику безопасности.

#### SOC консоль

Консоль SOC (компонент типа «R») предназначена для внутреннего анализа и представляет в основном неформатированные данные из разных частей компонентов типа «К». К ним относятся три интерфейса:

- 1) Интерфейсы мониторинга в реальном времени, которые предоставляют необработанные данные из части сообщений компонентов типа «К». Это позволяет использовать основные функции фильтрации, такие как «едгер» для изоляции определенных сообщений и используется для отладки, глубокого анализа конкретных событий и воспроизведения событий.
- 2) Интерфейс обработки инцидентов внутренний движок, используемый для генерации и отслеживания билетов на инциденты (тикеты) и процедур реагирования. Он предоставляет квалифицированную информацию о предупреждениях, а также многочисленные отладочные данные и контрольные точки. Это более сложный интерфейс, поскольку он должен соответствовать либо



эксплуатационным характеристикам, эргономике и передовым фильтрам, либо функциям исследования и идентификации. Такой интерфейс является краеугольным камнем своевременной и адекватной реакции человека на вторжение.

3) Интерфейс статистического анализа, предоставляет необработанные данные статистики деятельности в области безопасности за короткий, средний и долгосрочный периоды. Это в основном используется в качестве нижнего слоя для графического представления.

#### Портал конечного пользователя

Портал конечного пользователя предоставляет форматированные данные о деятельности. Он предназначен для обеспечения многоуровневой отчетности для целей, начиная от инженеров по безопасности и заканчивая руководителями высшего уровня через сотрудников Службы безопасности.

#### Процедуры реагирования и эскалации

В конечном счете, адекватное реагирование на атаку – это в основном вопрос организации и процедур, которые должны применяться группами реагирования на инциденты. Реакция варьируется от пассивного мониторинга для получения дополнительной информации до аварийной остановки целевой системы через отчет об инцидентах СЕКТ. Конечно, соответствующая реакция должна быть определена до того, как произойдет атака, и процедуры должны быть проверены, а затем надежно (главным образом с точки зрения целостности) сохранены и доступны для групп надзора [1].

Проще говоря, необходимо определить определенный уровень эскалации, с тем, чтобы обеспечить быстрое и эффективное реагирование параллельно с использованием соответствующих людских ресурсов. Обычно определяют 3 линии реагирования:

- 1) Первый уровень должен быть тем, что мы называем первой линией, т.е. персоналом среднего технического уровня, который способен понимать события, генерируемые компонентом, а также процедуру реакции, чтобы применить (это необходимо, поскольку важно знать, когда применение такой процедуры не удалось). Первая линия эскалируют инциденты до второго уровня, если событие не соответствует критериям «известные события» или «заранее определенная реакция» или если достигнут предел времени в зависимости от критичности инцидента.
- 2) На втором уровне должна быть команда технических экспертов. Эти эксперты отвечают за анализ событий вторжения, которые не были

определены априори. Их приоритет позволяет квалифицировать события с помощью консольных интерфейсов SOC и обеспечить обходной путь, который будет применяться агентами первого уровня, в ожидании дальнейших исследований или постоянных решений.

3) Третий уровень должен быть «лабораторией», в которой будут воспроизводиться подозрительные пакеты, системные операции и так далее, чтобы определить характер неизвестного вторжения и обеспечить полностью квалифицированную процедуру реагирования. Лаборатория также будет отвечать за контакт с поставщиками ОС, приложений, оборудования и т.д. для разработки патчей и/или их применения [6].

Сложность настройки SOC – это скорее вопрос интеграции, чем реализации отдельных модулей. Новые стандарты должны помочь сократить разрыв между теоретическими подходами, собственными реализациями и автономными системами.

#### Вывод

Очевидно, что на практике вторжение имеет место, и поэтому сегодня существует необходимость в системах оперативного надзора. Опыт показывает, что для реализации профессионального подхода, который может обеспечить надежные результаты, необходим прагматический подход. Теория, предложенная выше, формирует основу для развертывания такого общества.

#### Литература

- 1. You Want to Build a SOC: Foundations for Your Security Operations Team (Part 1). [Электронный ресурс] URL: https://blogs.cisco.com/security/so-you-want-to-build-a-soc-foundations-for-your-security-operations-team-part-1 (Дата обращения: 11.02.2020).
- 2. Cybersecurity SLAs: managing requirements at ARM'S [электронный ресурс] 22.11.2019 URL: https://resources.sei.cmu.edu/asset\_files/Presentation/2013\_017\_101\_54269. pdf (Дата обращения: 11.02.2020).
- 3. Joseph Muniz, Gary McIntyre, Nadhem AlFardan .Security Operations Center. Building, Operating, and Maintaining your SOC. Cisco Press.448 p.
- 4. What is SOCURL: [Электронный ресурс] URL: https://www.splunk.com/en\_us/data-insider/what-is-a-security-operations-center.html#building\_soc (Дата обращения: 11.02.2020).
- 5. Миллер Дж. Внедрение Splunk 7. М.: ДМК Пресс. 2019. 490 с.
- 6. Внутренние показатели или как эффективно смотреть на линии SOC [Электронный ресурс] 19.11.2019 URL: https://soc-forum.ib-bank.ru/files/files/SOC2019/38%20Krivonogov.pdf (Дата обращения: 11.02.2020).





УДК 519.8

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ
ОПТИМАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО
УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ
СПЕКТРАЛЬНОГО МЕТОДА И
МУЛЬТИАГЕНТНЫХ АЛГОРИТМОВ
ОПТИМИЗАЦИИ

PARAMETRIC SYNTHESIS OF OPTIMAL PROGRAM CONTROL BASED ON THE SPECTRAL METHOD AND MULTI-AGENT OPTIMIZATION ALGORITHMS

#### Андрей Владимирович Пантелеев

доктор физико-математических наук, профессор заведующий кафедрой «Математическая кибернетика» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт» (Национальный исследовательский университет) Адрес: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

Тел.: 8 (909) 679-45-80 E-mail: avpanteleev@inbox.ru

#### Мария Магдалина Сергеевна Каранэ

магистрант кафедры «Математическая кибернетика» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт» (Национальный исследовательский университет)

Адрес: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4 Тел.: 8 (985) 775-04-72 E-mail: mmarselina@mail.ru

#### Аннотация

Рассматривается задача поиска оптимального программного управления детерминированными динамическими нелинейными системами с помощью разложения по системам базисных функций. Функция управления ищется в виде функции насыщения, которая имеет релейную структуру, аргументы которой предлагается искать в виде линейной комбинации базисных функций. Описан алгоритм решения задачи, основанный на использовании трех мультиагентных алгоритмов глобальной условной оптимизации: методе, имитирующем поведение стаи криля; методе, имитирующем империалистическую конкуренцию. На базе описанных алгоритмов сформирован комплекс программ, позволяющий решать специально подобранный набор тестовых примеров, а также прикладные задачи.

**Ключевые слова:** оптимальное программное управление, базисные функции, спектральный метод, мультиагентные методы оптимизации, детерминированная динамическая система.

#### Summary

The problem of finding the optimal open-loop control of deterministic dynamic nonlinear systems by expanding into basis function systems is considered. The control function is sought in the form of a saturation function, which has a relay structure, and the arguments of which are proposed to be sought in the form of a linear combination of basis functions. An algorithm for solving this problem based on the use of multi-agent global conditional optimization algorithms: Fish School Search, Krill Herd and Imperialist Competitive Algorithm is described. Based on the described algorithms, a set of programs has been formed that allows to solve a specially selected set of test problems.

**Keywords:** optimal open-loop control, basis functions, spectral method, multi-agent optimization methods, deterministic dynamic system.

#### Введение

Применение мультиагентных алгоритмов для глобальной оптимизации функций многих переменных является довольно востребованным в связи со сложностью большинства прикладных задач параметрического синтеза элементов конструкций и систем управления летательных аппаратов [1-4]. С помощью классических чис-

ленных методов такие задачи решить не всегда удается по причине больших вычислительных затрат или потому что большинство методов могут найти только локальный, а не глобальный экстремум. Мультиагентные алгоритмы, как и остальные известные метаэвристические методы, в свою очередь, довольно просты в применении и показывают приемлемые результаты



за разумное вычислительное время. Хотя эти алгоритмы не имеют строгого обоснования и не гарантируют сходимости, но, тем не менее, они успешно применяются на практике [1,3,4].

В работе предлагается подход к решению задач поиска оптимального программного управления, основанный на параметрической оптимизации, с помощью группы метаэвристических мультиагентных алгоритмов. Существующие численные методы поиска оптимального программного управления в большинстве случаев базируются на применении принципа максимума, методов оптимизации первого и второго порядков, поиска искомого управления в виде кусочно-постоянных, кусочно-линейных, кусочно-полиномиальных функций времени [5,6]. Проблема численного решения нелинейных задач теории управления остается актуальной. В связи с этим предлагается алгоритм поиска оптимального программного управления одним классом нелинейных систем с помощью разложения по системе базисных функций, применяемых в спектральном методе анализа и синтеза нелинейных систем управления [7]. Используется идея представления функции управления в релейном виде, учитывающем ограничения, наложенные на управление. Эффективность предложенного алгоритма демонстрируется на решениях двух модельных примеров [8].

#### Постановка задачи

Пусть поведение модели объекта управления описывается обыкновенным дифференциальным уравнением

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = f(t, \mathbf{x}(t), u(t)),\tag{1}$$

где x – вектор состояния системы;

 $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n$ ;

u – вектор управления;

 $u = (u_1, ..., u_n)^T \in U \subseteq R^q;$ 

U – некоторое заданное множество допустимых значений управления, определяемое прямым произведением отрезков

$$[a_1,b_1]\times\ldots\times[a_d,b_d];$$

 $t \in T = [t_o, t_o]$  – промежуток времени функционирования системы;

моменты начала процесса  $t_0$  и  $t_1$  заданы;

f(t,x,u) – непрерывная вектор-функция;

 $R^{n}$  – n-мерное евклидово пространство.

Начальное условие  $x(t_0) = x_0$  задает начальное состояние системы.

Определим множество допустимых процессов  $D(t_0,x_0)$  как множество пар  $d=(x(\cdot),u(\cdot))$ , которые включают траекторию  $x(\cdot)$  и управление  $u(\cdot)$ (где

$$\forall t \in T: x(t) \in \mathbb{R}^n, u(t) \in U,$$

функции  $x(\cdot)$  непрерывны и кусочно-дифферен-

цируемы, а  $u(\cdot)$  кусочно-непрерывны), удовлетворяющие уравнению (1) с заданным начальным условием.

На множестве  $D(t_0, x_0)$  определим функционал качества управления

$$I(d) = F(x(t_1)), \tag{2}$$

где F(x) – заданная непрерывная функция.

Требуется найти такую пару

$$d^* = (x^*(\cdot), u^*(\cdot)) \in D(t_0, x_0),$$

 $I(d^*) = \min_{d \in \mathcal{D}(t_0, x_0)} I(d)$  . Для систем (1), линейных по ограниченному управлению,

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = A(x) + B(x)u, \tag{3}$$

где A(x), B(x) – заданные непрерывные матричные функции размеров  $(n \times 1), (n \times q)$  соответственно, структура оптимального программного управления согласно принципу максимума является релейной. Поэтому предлагается искать приближенное решение в параметрическом виде:

$$u_{j}(t) = \text{sat}\{g_{j}(t)\}, j = 1, ..., q,$$

$$\text{sat} g_{j}(t) = \begin{cases} a_{j}, g_{j}(t) \le 0, \\ b_{j}, g_{j}(t) > 0, \end{cases}$$

$$g_{j}(t) = \sum_{i=0}^{L-1} c_{i}^{(j)} p_{i}(t)$$
(4)

а  $p_i(t)$  – заданные базисные функции, i=0,1,...,L–1. Для удобства использования, как правило, выбираются системы ортонормированных на отрезке  $[0,t_1]$  функций времени  $(t_0=0)$ .

#### Стратегия поиска решения

В алгоритме поиска оптимального управления одним классом нелинейных непрерывных детерминированных систем (3) используется идея поиска управления в виде некоторой функции (функции насыщения (4)), которая будет обеспечивать выполнение ограничений, наложенных на управление. Аргументом этой функции является линейная комбинация некоторых базисных функций, например нестационарных косинусоид, полиномов Лежандра, полиномов Уолша и др., применяемых в спектральном методе анализа и синтеза нелинейных систем управления [7]. В частности, в данном алгоритме в качестве базисных функций будут рассмотрены нестационарные косинусоиды. Коэффициенты в разложении неизвестны и подлежат оптимизации. Функция насыщения будет принимать два граничных значения управления: если линейная комбинация базисных функций больше нуля, то функция принимает значение, равное правой границе промежутка возможных значений управления, а если меньше – левой. Коэффициенты разложения находятся с помощью одного из мультиагентных методов оптимизации [3, 4].



#### Алгоритм решения задачи

Шаг 1. Инициализация. Выбрать метод из семейства мультиагентных алгоритмов [3,4] и задать его параметры. Задать начальный масштаб усечения по времени L=1, промежуток возможных значений коэффициента разложения

 $c_0 \in \left[c_{0_1}, c_{0_2}\right], \, \varepsilon = 5\%.$  *Шаг 2.* Сгенерировать начальную популяцию, состоящую из NP особей, определяемых коэффициентами  $c_i$  в разложении g(t):

$$\left\{c_0^{(j)}, c_1^{(j)}, \dots, c_{L-1}^{(j)}\right\}, j=1,\dots, NP,$$

где

$$c_i \in [c_{i_1}, c_{i_2}], i=0,1,...,L-1$$
.

Шаг 3. По сгенерированным коэффициентам сформировать управление в виде функции насыщения sat, гарантирующей выполнение ограничений на управление:

$$\begin{aligned} u_j^{(m)}(t) &= \operatorname{sat}\{g_j(t)\}, j = 1, \dots, q; \ m = 1, \dots, NP, \\ \text{far} &\forall t \in T \\ \operatorname{sat} g_j(t) &= \begin{cases} a_j, & g_j(t) \leq 0, \\ b_j, & g_j(t) > 0, \end{cases} \quad g_j\left(t\right) = \sum_{i=0}^{L-1} c_i^{(j)} p_i(t) \end{aligned}$$

В качестве базисной функций  $p_i(t)$ , можно взять ортонормированную на отрезке [0,t] систему нестационарных косинусоид:

$$p_{i}(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{t_{i}}}, & i = 0, \\ \sqrt{\frac{2}{t_{i}}} \cos\left(\frac{i\pi t}{t_{i}}\right), & i = 1, 2, \dots, L - 1, \end{cases}$$

где  $t_1$  – момент окончания функционирования

*Шаг 4.* Проинтегрировать *NP* систем дифференциальных уравнений (3) с управлениями  $u^{1}(t),...,u^{NP}(t)$ , например, методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Для каждой особи получить соответствующие траектории

$$(x_I^{\ I}(\cdot),...,x_n^{\ I}(\cdot)),...,(x_I^{\ NP}(\cdot),...,x_n^{\ NP}(\cdot))$$
 и вычислить значения функционала  $I^1,...,I^{NP}$ .

Шаг 5. Выполнить очередную итерацию выбранного метода минимизации функционала (2). Получить новые положения особей 1,...,NP(векторы значений коэффициентов разложения по системе базисных функций). Перейти к шагу 3.

*Шаг* 6. Цикл (*шаг* 3 – *шаг* 5) заканчивается по достижению заданного числа итераций. Выбирается лучшая особь (набор коэффициентов c).

Соответствующие ей управление и траектория, а также значение функционала  $I_{c}^{\star}$  принимаются за приближенное решение задачи с найденными коэффициентами  $c_i^{*(L)}$ , i=0,1,...,L-1 с данным масштабом усечения L.

**Шаг** 7. Если 
$$I_{c_l^{(L)}}^* < I_{c_l^{(L-1)}}^*$$
 и 
$$\delta = \frac{\left|I_{c_l^{(L)}}^* - I_{c_l^{(L-1)}}^*\right|}{\left|I_{c_l^{(L-1)}}^*\right|} \cdot 100\% > \varepsilon$$
 (условия проверяются при  $L \ge 1$ ), то положить

 $\dot{L} = L + 1$  и перейти к **шагу 2**. Если  $I_{c^{(L)}}^* \ge I_{c^{(L-1)}}^*$ , процедура поиска оптимального программного управления завершается и выбирается управление с коэффициентами  $c_i^{*(L-1)}$ .

Пример 1 [8]. Постановка задачи:

1 /	
Размерность вектора состояния	n=2
Интервал времени	t∈[0;1]
Ограничения на управление	-1≤u≤1
Начальное состояние	x(0) = (0,0)T
Система дифференциальных уравнений	$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + \sin x_1 + u \\ \dot{x}_2 = x_1 \cos x_2 u \end{cases}$
Целевой функционал	I(u) = x2(1)

Найденное наилучшее количество коэффициентов в разложении: L=2.

Метод оптимизации и его параметры: метод, имитирующий поведение стаи рыб (NP=5,ITER=100,  $W_{scale} = 150, W = 100, step_{vol} = 0,1,$  $step_{ind} = 0.01);$  метод, имитирующий поведение стаи криля (NP=10, ITER=100,  $N_{\max}$ =0,01,  $\mu$ =0,5,  $V_f$ =0,02,  $D_{max}$ =0,005,  $\sigma$ =0,2); метод, имитирующий империалистическую конкуренцию  $_{b}=150, N_{imp}=15, ITER=500, \beta=0,2, \gamma=0,02,$  $\xi = 0.01$ ) [3,4]. Результаты решения *примера 1* с помощью выбранных методов приведены в та-

Для всех трех методов было подсчитано относительное изменение значения критерия  $\delta$  при L=3: в методе, имитирующем поведение стаи рыб,  $\delta$ =72%; в методе, имитирующем поведение стаи криля,  $\delta$ =64%; в методе, имитирующем империалистическую конкуренцию,  $\delta = 43\%$ , причем значение функционала при количестве коэффициентов, равном трем, ухудшилось от-

Таблица 1

Мультиагентный метод	Координаты конечных точек $(x,(1),x_2(1))$	Коэффициенты разложения с	Значение функционала I
Метод, имитирующий поведение стаи рыб	(0,55505; -0,13348)	6,13493; 6,68018	-0,13348
Метод, имитирующий поведение стаи криля	(0,55687; -0,13352)	6,13519; 6,71235	-0,13352
Метод, имитирующий империалистическую конкуренцию	(0,53915; -0,13407)	5,08622; 7,68099	-0,13407



#### Таблица 2

Мультиагентный метод	Координаты конечных	Коэффициенты	Значение
Мультиатентный метод	точек (х <sub>1</sub> (1,6),х <sub>2</sub> (1,6))	разложения с <sub>:</sub>	функционала I
Метод, имитирующий поведение стаи рыб	(3,45449; 12,87063)	0,4543; 1,15332	-2,98082
Метод, имитирующий поведение стаи криля	(3,36478; 12,51793)	0,5496; 1,09753	-2,89418
Метод, имитирующий империалистическую	(3,38582; 12,71709)	0,53287; 1,21046	-2.97272
конкуренцию	(5,56562, 12,71765)	0,33207, 1,21040	2,37272

носительно наилучшего значения функционала с двумя коэффициентами в разложении во всех случаях. Поэтому поиск был завершен, и в качестве решения был выбран результат, полученный при количестве коэффициентов в линейной комбинации в управлении, равном двум.

В [8] было получено следующее решение npu-мера 1:

I = -0.13599,

 $(x_1(1),x_2(1))^T = (0,440804;-0,13593)^T.$ 

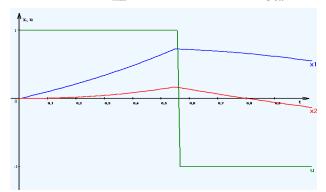
Использованные мультиагентные алгоритмы успешно справились с рассмотренной задачей поиска оптимального программного управления и нашли решение близкое к известному за приемлемое время. Найденное управление и траектории изображены на рисунке 1.

*Пример 2 [8]*. Постановка задачи:

Размерность вектора состояния	n=2
Интервал времени	t∈[0;1,6]
Ограничения на управление	-2≤u≤1
Начальное состояние	$x(0) = (1,0)^T$
Система дифференциальных уравнений	$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{\cos x_1 + 2} + 3\sin x_2 + u \\ \dot{x}_2 = x_1 + x_2 + u \end{cases}$
Целевой функционал	$I(u)=-x_1(1,6)+0.5 x_2(1,6)$

Найденное наилучшее количество коэффициентов в разложении: L=2.

Метод оптимизации и его параметры: метод, имитирующий поведение стаи рыб (NP=10, ITER=200,  $W_{scale}=200$ , W=150,  $step_{vol}=0,1$ ,



**Рис. 1.** Графики оптимальных траекторий и управления в *примере 1* 

 $step_{ind}=0,01$ ); метод, имитирующий поведение стаи криля (NP=10, ITER=100,  $N_{max}=0,01$ ,  $\mu=0,5$ ,  $V_f=0,02$ ,  $D_{max}=0,005$ ,  $\sigma=0,2$ ); метод, имитирующий империалистическую конкуренцию ( $N_{pop}=150$ ,  $N_{imp}=15$ , ITER=500,  $\beta=0,2$ ,  $\gamma=0,02$ ,  $\xi=0,01$ ) [3,4]. Результаты решения  $npumepa\ 2$  с помощью выбранных методов приведены в  $ma-6nuue\ 2$ .

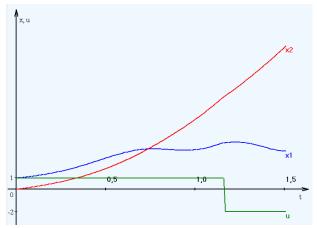
Для трех мультиагентных алгоритмов было подсчитано относительное изменение значения критерия  $\delta$  при L=3: в методе, имитирующем поведение стаи рыб,  $\delta=14\%$ ; в методе, имитирующем поведение стаи криля,  $\delta=19\%$ ; в методе, имитирующем империалистическую конкуренцию,  $\delta=17\%$ , причем значение функционала при количестве коэффициентов, равном трем, ухудшилось относительно наилучшего значения функционала с двумя коэффициентами в разложении во всех случаях. Поэтому поиск был завершен, и в качестве решения был выбран результат, полученный при количестве коэффициентов в линейной комбинации в управлении, равном двум.

В [8] было получено следующее решение npu-мера 2:

I = -2,98086,

 $(x_1(1,6),x_2(1,6))^T = (3,46114;12,884)^T.$ 

Использованные мультиагентные алгоритмы успешно справились с рассмотренной задачей поиска оптимального программного управления и нашли решение близкое к известному за



**Рис. 2.** Графики оптимальных траекторий и управления в *примере 2* 

# 103(57)202(

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

приемлемое время. Найденное управление и траектории изображены на *рисунке* 2.

#### Заключение

Разработано алгоритмическое и программное обеспечение поиска оптимального программного управления одним классом нелинейных детерминированных систем. Описанный алгоритм основан на использовании трех мультиагентных алгоритмов глобальной оптимизации и разложений по ортонормированным системам базисных функций. Сформированный комплекс программ позволяет находить решение специально подобранного набора тестовых задач оптимального программного управления, изображать графики оптимальных управления и траекторий, вычислять оптимальное значение функционала качества управления.

#### Литература

- 1. Пантелеев А.В., Скавинская Д.В., Алешина Е.А. Метаэвристические алгоритмы поиска оптимального программного управления. М.: ИНФРА-М, 2016. 396 с.
- 2. Floudas C.A., Pardalos P.M. (eds.) Encyclopedia of Optimization. Springer, 2009.

- 3. Пантелеев А.В., Каранэ М.С. Анализ эффективности мультиагентных методов оптимизации элементов конструкций летательных аппаратов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации, 2019. №22(2). С.96-108.
- 4. Пантелеев А.В., Каранэ М.С. Мультиагентный алгоритм поиска оптимального программного управления одним классом детерминированных систем // Моделирование и анализ данных, 2019. №3. С.58-64.
- 5. Rao Anil V. A Survey of Numerical Methods for Optimal Control //Advances in the Astronautical Sciences. (Preprint) AAS 09-334. V. 135(1). 2010.
- 6. Федоренко Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления. М.: Наука, 1978. 488 с.
- 7. Пантелеев А.В., Рыбаков К.А., Сотскова И.Л. Спектральный метод анализа нелинейных стохастических систем управления. 2-е изд. М.: Вузовская книга, 2015. 392 с.
- 8. Финкельштейн Е.А. Вычислительные технологии аппроксимации множества достижимости управляемой системы: дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (05.13.01). Иркутск: Институт динамики систем и теории управления, 2018.



УДК: 629.7.054.07

АЛГОРИТМ НАВИГАЦИИ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ С УЧЕТОМ
МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ СРЕДСТВ
ПРОТИВОВОЗДУШНОЙ ОБОРОНЫ\*

ALGORITHM FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES NAVIGATION BASED ON THE LOCATION OF AIR DEFENSE EQUIPMENT

#### Андрей Михайлович Федулин

директор центра разработки программного обеспечения AO «КТ – Беспилотные Системы» Адрес: 199178, Санкт-Петербург,

Малый проспект В.О., д. 54, корп. 4, лит. П

Тел.: +7 (812) 449-90-90 E-mail: af@kronshtadt.ru

#### Ринат Наилевич Садеков

доктор технических наук, доцент начальник научно-исследовательского отдела ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА» Адрес: 353456, Краснодарский край,

г. Анапа, Пионерский пр., д. 28 Тел.: +7 (495) 693-30-91, доб. (25-21)

#### Аннотация

Рассматривается новый подход по автономной коррекции маршрута БЛА с учетом разведанной в ходе полета информации о размещаемых средствах ПВО. Маршрут находится методом поиска в глубину на трехмерном графе, с учетом штрафа за нахождение в зоне ПВО. Алгоритм реализован с использованием современных ГИС.

**Ключевые слова:** маршрут полета, беспилотный летательный аппарат, автономное управление, противовоздушная оборона, алгоритмы на графах, реализация алгоритмов на GPGPU.

#### **Summary**

Considering a new approach to the unmanned aerial vehicle (UAV) 3D-route planning with the avoidance of the anti-aircraft forces zones. The solution is based on the depth-first search algorithm applied to specially constructed 3D-graph weighted by potential damage penalties. The high-performance implementation is made with modern general-purpose computing on graphics processing units (GPGPU) techniques.

**Keywords:** UAV 3D-route planning, anti-aircraft forces, graph algorithms, GPGPU techniques.

#### Введение

Опыт современных локальных конфликтов подтвердил высокую эффективность применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) класса «MALE» [1], которые могут находиться в воздухе более 24 часов, пролетая за это время расстояние в несколько тысяч километров, поэтому вопрос повышения их автономности является актуальной задачей. Несмотря на малую эффективную площадь рассеивания таких БЛА низкая крейсерская скорость полета (~180 км/ч) делает их уязвимыми перед широким спектром средств противовоздушной обороны (ПВО) [2]. В условиях горной местности в зонах размещения ПВО противника вопросы планирования маршрута с учетом изменения оперативной и тактической обстановки [3] в реальном времени ставятся особенно жестко. Такие маршруты с одной стороны, должны минимизировать вероятность поражения БЛА средствами ПВО, с другой, обладать минимальной протяженностью.

#### 1. Анализ существующих работ

Высокая актуальность данной темы, в том числе и при решении аналогичной задачи для пилотируемых летательных аппаратов, обуславливает наличие большого количества работ в исследуемой области [4-6]. Выбор методов решения задачи планирования зависит от исходных данных. Существующие методы планирования можно классифицировать на несколько групп.

Первая группа алгоритмов относиться к разряду «sample-based» методов. Идея данных методов заключается в формировании большого количества случайных гипотез о возможном местоположении объекта, в окрестности исходной точки, их проверки на каждом такте предсказания, до тех пор, пока не будет достигнута целевая точка. Примерами алгоритмов первой группы являются «Random Trees», «Probalistic Roadmaps (PRM)», «K-PRM» [7], «S-PRM» [8].

Вторая группа алгоритмов осуществляет поиск пути в узлах графа. Как правило, поиск



<sup>\*</sup> Работа выполнена при поддержке гранта Президента России МД-2102.2019.9

пути в таких алгоритмах осуществляется путем минимизации функции стоимости, а решение формируется на основе методов динамического программирования. Примерами алгоритмов второй группы являются алгоритмы «Dijkstra», «A\*», «D\*», «Theta\*» [9], «D\*-Lite» [10] и другие.

Существуют и другие подходы к решению задачи, например, на основе эволюционных алгоритмов [11] или нейронных сетей [12,13]. Также применяются комбинации из нескольких описанных выше алгоритмов. В данной работе, в отличие от известных [14], используется комбинированный алгоритм, основанный на построении трехмерного графа возможных точек маршрута в пространстве, с учетом минимизации пройденного пути и вероятности поражения БЛА средствами ПВО.

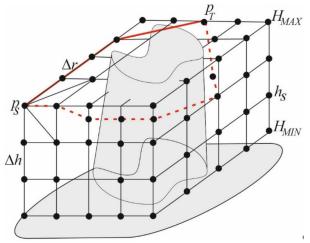


Рис. 1. Иллюстрация к постановке задачи

#### 2. Постановка задачи и алгоритм ее решения

Представим, что для полета над заданным районом Z имеется цифровая модель рельефа, заданная регулярной сеткой, в каждом узле p которой хранится значение высоты рельефа над уровнем моря  $h_s(p)$ . Для простоты, будем считать, что все объекты района располагаются в узлах сетки.

Летно-технические характеристики (ЛТХ) БЛА заданы:

- функцией  $T_{\rm U}(p_1,p_2)$  времени полета БЛА между поворотными пунктами маршрута (ППМ) с координатами  $p_1$  и  $p_2$ . Параметры и характер самой зависимости для каждого БЛА являются уникальными и, как правило, разработчиками не раскрываются;
  - ullet потолком высоты  $H_{\max}$ ;
- $\bullet$  безопасной высотой полета над поверхностью земли  $H_{\min}.$

Дано K разведанных средств ПВО, заданных:

- координатами местоположением  $A_{k}k=1...K$ ;
- $\bullet$  минимальной  $r_{\scriptscriptstyle k}$  дальностью поражения БЛА;
- ullet максимальной  $R_{k}$  дальностью поражения (обнаружения) БЛА;
- экспоненциальным законом распределения вероятности поражения от дальности до БЛА.

Необходимо определить такой маршрут движения Б $\Lambda$ Аw\*, который обеспечивает минимальное время полета, не превышающее  $T_{\rm U}(p_1,\ p_2)$  в N раз, при минимальной вероятности поражения Б $\Lambda$ АP (см.  $pисунок\ 1$ ). Обозначив  $p_{\rm S}$  – начальный ППМ, а  $p_{\rm T}$  – целевой, математически условия можно записать так:

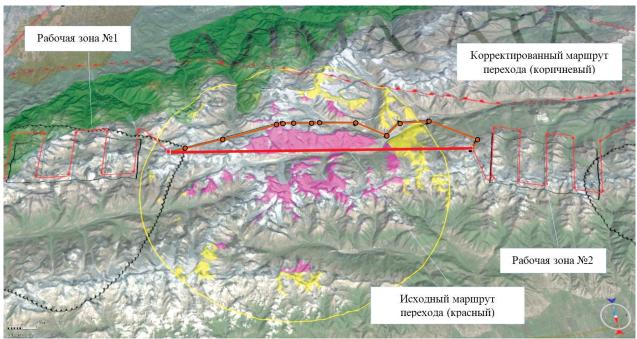


Рис. 2. Иллюстрация к постановке задачи



$$\begin{cases} T(w^*) \le T_{\mathbf{U}}(p_S, p_T) * N \\ P(w^*) \to \mathbf{MIN} \end{cases}$$
 (1)

На практике значение N выбирается в диапазоне [1,2;1,4], что обеспечивает множество возможных маршрутов движения БЛА за указанное время. Среди них выбирается такой, который имеет минимальную вероятность поражения БЛА. В случае, если N=1, алгоритм выдаст единственный маршрут без учета фактора поражения. Следует отметить, что множество траекторий движения будет обеспечено в том числе и за счет изменения высоты полета БЛА, что снижает вероятность его обнаружения.

На рисунке 2 БЛА решает задачу аэросъемки с переходом (выделен красным) между двумя рабочими зонами через зону ПВО. Маршрут обхода (выделен коричневым) при несущественном увеличении общего времени полета снижает вероятность поражения БЛА средствами ПВО за счет использования складок местности. Фиолетовым (желтым) обозначены зоны, в которых высота поражения (обнаружения) меньше безопасной высоты полета.

Поставленная таким образом задача может быть сведена к классической задаче поиска маршрута на графе. Трехмерный граф G состоит из ребер и вершин (ППМ), которые формируются в пределах зоны Z с фиксированным шагом в плане  $\Delta r$  и по высоте  $\Delta h$ , начиная с безопасной высоты  $H_{\min}$  над рельефом и заканчивая максимальной высотой  $H_{\mathrm{max}}$ . Выбор шага определяется таким образом, чтобы соотношение  $\Delta h$  к  $\Delta r$  было сопоставимо с соотношением скороподъемности к максимальной крейсерской скорости БЛА.

Далее для всех ППМ в текущий и ближайшие нижний и верхний уровни графа по каждому из 8 направлений строятся кратчайшие

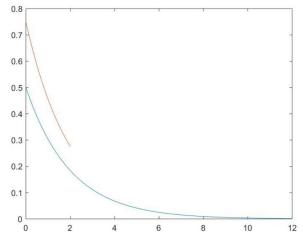


Рис. 3. Классический экспоненциальный закон (синим) и построенный по формуле (3) для диапазона [0-2 км] (коричневым)

ребра, достижимые с точки зрения ЛТХ БЛА и рельефа. После построения всех ребер из графа удаляются ППМ, у которых нет хотя бы двух инцидентных им ребер.

Вероятность поражения БЛА при пролете по ребру определяется как максимальная вероятность среди точек  $p_{i}$  данного ребра

$$P(p_1, p_2) \max_{t(P(p_t))}.$$
 (2)

С учетом независимости действий ПВО вероятность поражения БЛА в точке p, определяется по формуле  $P(p_t) = 1 - \prod (1 - P_k(p_t))$ 

Вероятность поражения  $\stackrel{\kappa=1}{\text{Б}} \Lambda \Lambda k$ -ым средством

ПВО в точке  $p_i$  определяется по формуле экспоненциального распределения

$$P_{\mathbf{k}}(p_t) = \frac{\mathbf{\mu} \cdot \exp\left(-\mathbf{\mu} \cdot d_k(p_t)\right)}{\int_{r_k}^{R_k} \mathbf{\mu} \cdot \exp\left(-\mathbf{\mu} \cdot r\right) dr} , \qquad (4)$$

где  $d_k(p_t) = \sqrt{(A_k^x - p_t^x)^2 + (A_k^y - p_t^y)^2 + (A_k^h - p_t^h)^2}$ 

В формуле (4) знаменатель необходим для проведения нормировки суммы вероятностей в пределах  $[r_{\iota}, R_{\iota}]$  к единице (рисунок 3).

В работе  $\mu$ =0,5. Расчет вероятности по формуле (4) проводится только для случая, когда между точками  $p_{\iota}$ и  $A_{\iota}$  имеется прямая видимость, иначе  $P_k(p_i) = 0$ . Механизм определения прямой видимости точек будет конкретизирован ниже.

Вероятность поражения БЛА на маршруте рассчитывается по формуле:

$$P(w = \{p_i\}_{i=1}^N) = 1 - \prod_{i=1}^{N-1} (1 - P(p_i, p_{i+1})). \quad (5)$$

Псевдокод работы алгоритма перебора возможных маршрутов из  $p_s$  в  $p_T$  методом поиска в глубину для выбора среди них соответствующего условиям формулы (1) приведен в листинге (см. pucyнok 4). Для оптимизации отсекаются те частично построенные маршруты, уже имеющие вероятность больше текущей оптимальной

$$(P(p_{\varsigma}, p) \ge P(w^*))$$

или эвристическую оценку времени больше заданной

$$(T(p_s,p)+T_u(p,p_T)\geq N*T_u(ps,p_T)).$$

Сортировка ППМ по близости к  $p_{\scriptscriptstyle T}$  позволит в первую очередь перебирать маршруты близкие к прямолинейному.

#### 3. Реализация алгоритма и его апробация

При реализации алгоритм разделяется на три функции: предполетная функция по инициализации вершин и ребер графа  $G(Z,H_{\max})$ , а также расчета величины  $T_{11}(p_1,p_2)$ , функция обновления информации о средствах ПВО по расчету величины  $P(p_1,p_2)$  и функция поиска маршрута (FindRoute  $(p_s, p_T)$ ).



```
function FindRoute (ps, pr)
    w*:=Ø
                P_{W^*}:=+\infty
                              T_{\overline{w}*}:=+\infty
    DepthFirstSearch({ps},0,0,pr)
    return w*
end function
procedure DepthFirstSearch(w, Pw, Tw)
    if w[0] = p_T // если w - полный маршрут от p_S до p_T
         if (w^*=\emptyset) or (P_{\overline{w}} < P_{\overline{w}*}) or (P_{\overline{w}} = P_{\overline{w}*}) and T_{\overline{w}} < T_{\overline{w}*})
             w^\star := w P_{\overline{u}^\star} := P_{\overline{u}^\star} T_{\overline{u}^\star} := T_{\overline{u}^\star} // w менее опасен, или также опасен, но более быстрый
         end if
    else
         V:=Ø
         for each v adjust w[0] // BCE NNM, инцидентные w[0]
             if w.CONTAIN(v)=false // исключаем циклы
                  and P_{\overline{w}}+P(w[0],v)*(1-P_{\overline{w}})< P(w^*) // отсекаем менее безопасные
                  and T_W + T_U(w[0], v) + T_U(v, p_T) < N^*T_U(p_S, p_T) // отсекаем слишком долгие
                  V:=V+V
             end if
         end for
         V.SORT(T_U([], p_I)) // сортировка по близости к целевой ППМ
         for each v in V // вызов может быть распараллелен
             \underline{DepthFirstSearch}(v+w,P_{\overline{w}}+P(w[0],v)*(1-P_{\overline{w}}),T_{\overline{w}}+T_{\overline{U}}(w[0],v))
         end for
    end if
end procedure
```

**Рис. 4.** Псевдокод процедуры поиска оптимального маршрута  $w^*$ 

Для быстрого расчета прямой видимости между  $p_t$  и  $A_k$  применяются методы 3D-графики: для каждого k-го средства ПВО формируется текстура дальностей  $Z_{BUFFER}$  путем растеризации сетки рельефа в перспективную камеру с центром в  $A_k$ , горизонтальным углом обзора  $360^{\circ}$  и вертикальным  $arctg~(H_{max}/r_k)$ . С помощью  $Z_{BUFFER}$  можно за одно сравнение определить наличие прямой видимости между  $p_t$  и  $A_k$  по формуле (см. pucyнок~5):  $Z_{BUFFER}[\varphi/2n, h/\rho]^2 > h^2 + \rho^2$ 

где  $(\rho, \varphi, h)$  – координаты  $p_{\iota}$  в цилиндрической системе относительно  $A_k$ .



Реализация алгоритма выполнена на языке C++ с применением библиотеки «OpenGL», что позволяет перенести его на российскую элементную базу [15], поддерживающую аппаратное ускорение. В качестве исходной модели рельефа взяты данные «SRTM30», имеющие шаг в плане 30 м и абсолютную ошибку по высоте 9 м в доверительном интервале 90% [16].

Пример работы алгоритма для БЛА [17] приведен на *рисунках* 6,7.

На рисунке 6 приведен маршрут БЛА (красным) на фоне карты местности (район побережья Черного моря между Сукко и Дюрсо). Места расположений средств ПВО противника обозначены условными знаками. Фиолетовым (желтым) градиентом на карте обозначены зоны, где высота поражения (обнаружения) составляет величину от 50 м до 0 м: хорошо видны места «ущелий» – перспективных зон для прокладки маршрута БЛА, безопасных для полета за счет складок рельефа относительно средств ПВО.

На рисунке 7 приведен высотной профиль



маршрута. Номера ППМ на рисунках синхронизированы. Фиолетовым (желтым) обозначена минимальная высота поражения (обнаружения) для каждого ПВО, коричневым – минимальная высота полета (меньшая по высоте ППМ графа G), черным – высота рельефа.

Время расчета показанного на рисунке маршрута длины  $\sim$ 20 км при шаге ППМ в плане 500 м на вычислителе nVidia Jetson TX2 с производительностью 1,33 ТФлопс без учета этапа предобработки составило 30 сек. Хотя процедура FindRoute() и имеет экспоненциальную сложность

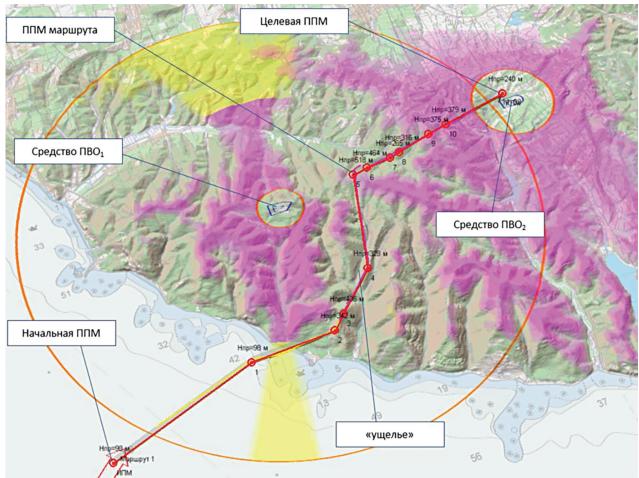


Рис. 6. Маршрут полета с учетом расположения средств ПВО противника

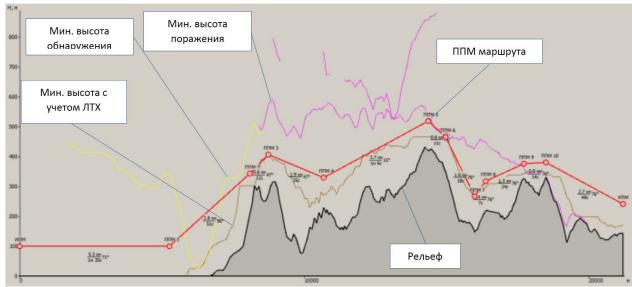


Рис. 7. Профиль рельефа местности маршрута полета



от отношения длины маршрута к шагу ППМ, фактически за счет эффективного отсечения и эвристики, реальное время выполнения соответствует допустимым на практике пределам.

#### Заключение

В работе предложен новый подход к построению трехмерного маршрута полета БЛА с учетом рельефа местности и обхода зон ПВО, основанный на комбинации классических методов теории графов и компьютерной графики. Задаваемое ограничение маршрута по времени обеспечивает управление стратегией поведения БЛА, ранжированной по шкале «прорыв – обход».

Предложенный метод позволяет усложнить заложенную модель работы средства ПВО. Также без внесения существенных изменений может быть проведена разметка графа, обеспечивающая учет запрещенных для полета зон по заданным эшелонам или зон работы средств радиоэлектронного подавления.

Достигнутое за счет эвристик и аппаратного ускорения быстродействие обеспечивает возможность исполнения алгоритма автономно на борту, что позволит повысить живучесть БЛА в условиях подавления канала связи с пунктом управления или необходимости работы в режиме радиомолчания.

В настоящий момент проводятся исследования по усовершенствованию модели ПВО, внедрение модели РЭП и одновременном использовании нескольких БЛА решения задачи прикрытия и поражения.

#### Литература

- 1. Евтодьева М.Г. Беспилотные летательные аппараты военного назначения: тенденции в сфере разработок и производства / М.Г. Евдотьева, С.В. Целицкий // Пути к миру и безопасности, 2019. № 2 (57). С. 104-111.
- 2. Аминов С. ПВО в борьбе с БЛА // Беспилотная авиация: спец выпуск МАКС, 2011. URL: http://uav.ru/articles/pvo\_vs\_uav.pdf. (дата обращения 26.04.2020).
- 3. Комяков А.В. Объединенная система связи, обмена данными, навигации и опознавания как составная часть воздушного эшелона системы связи ВС РФ // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2017. № 8. С.14-18.
- 4. Попов А.Н. Методы планирования траектории движения БЛА с учетом противодействия противника / А.Н. Попов, Д.П. Тетерин // Известия Самарского научного центра РАН, 2017. № 1-2. Том 19. С.371-376.
- 5. Шолохов А.В. Формирование траектории корреляционно-экстремальной навигационной системы по критерию минимума погрешностей

- координат /Шолохов А.В., Беркович С.Б., Котов Н.И.// Сборник: Юбилейной XXV Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам Сборник материалов. Гл. ред. В.Г. Пешехонов, 2018. С.175-177.
- 6. Бердышев В.И. Траектория, минимизирующая облучение движущегося объекта /В.Б. Костоусов // Тр.ИММ УрО РАН, 2020. Т.26. №1. С. 27-38.
- 7. De Filippis L. Path Planning strategies for UAVs in 3D environments / L. De Filippis, G. Guglieri, F. Quagliotti // Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2012. 65.1-4. Pp.247-264.
- 8. Lavalle S.M. Planning algorithms / S.M. Lavalle // Cambridge university press, 2006.
- 9. Karaman S. Sampling-based algorithms for optimal motion planning / S. Karaman, E. Frazzoli // The International Journal of Robotics Research, 2011. № 30 (7). Pp.846-894.
- 10. Hrabar S. 3D path planning and stereo-based obstacle avoidance for rotorcraft UAVs/S. Hrabar//Intelligent Robots and Systems, 2008//IROS. 2008//IEEE // RSJ International Conference on IEEE, 2008. Pp.807-814.
- 11. Hasircioglu I. 3D path planning for the navigation of unmanned aerial vehicles by using evolutionary algorithms. Proceedings of the 10th annual conference on Genetic and evolutionary computation / I. Hasircioglu, H.R. Topcuoglu, M. Ermis // ACM, 2008. Pp.1499-1506.
- 12. Kroumov V. 3D path planning for mobile robots using simulated annealing neural network / V. Kroumov, J. Yu, K. Shibayama // International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 2010. № 6 (7). Pp. 2885-2899.
- 13. Михайлин Д.А. Нейросетевой алгоритм безопасного облета воздушных препятствий и запрещенных наземных зон // Научный вестник МГТУ ГА, 2017. № 4. Т.20. С.18-24.
- 14. Васильченко А.Н. Формирование маршрутов полета БЛА с учетом местоположения средств ПВО и РЭП. / А.Н. Васильченко, М.С. Иванов, Г.Н. Колмыков // Системы управления, связи и безопасности, 2019. № 4. С.403-420.
- 15. Адамов А.А. Альтернативные современным GPGPU перспективные универсальные и специализированные процессоры-ускорители / А.А. Адамов, П.В. Павлухин, Д.В. Биконов, А.Л. Эйсымонт, Л.К. Эйсымонт // Вопросы кибербезопасности, 2019. № 4. С.13-21.
- 16. Farr T.G. et al. The Shuttle Radar Topography Mission / T.G. Farr, P.A. Rosen // Reviews of Geophysics, 2007. № 45.
- 17. Рекламный паспорт №143\17\ЭП на Комплекс воздушной разведки с беспилотными летательными аппаратами большой продолжительности полета «Орион-Э».



**УДК 539.182** 

# НОВЫЕ СИММЕТРИИ МНОГОМЕРНОЙ ГЕОМЕТРИИ В КВАНТОВОЙ ФИЗИКЕ И КВАНТОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

NEW SYMMETRIES OF MULTIDIMENSIONAL GEOMETRY IN QUANTUM PHYSICS AND QUANTUM INFORMATION

#### Сергей Владимирович Смуров

почетный работник науки и техники РФ доктор технических наук, профессор Первый Вице-президент Института – Главный конструктор Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1a

Тел.: +7(4967)35-31-93 E-mail: Svs\_iif@mail.ru

#### Геннадий Германович Волков

доктор физико-математических наук, профессор старший научный сотрудник МОУ «ИИФ»
Апрес: 142210, Московская обл.,

адрес: 142210, московская оол., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: +7(4967)35-31-93

E-mail: gennadii.volkov@rambler.ru



генеральный директор ООО «Протиус»

Адрес: 124460, Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, д. 2, строение 4

Тел.: +7 (906)042-95-89 E-mail: stolbovsn@mail.ru

#### Алексей Николаевич Царьков

заслуженный деятель науки РФ доктор технических наук, профессор

Президент Института -

Председатель Правления Института

МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210 Московская обл.,

г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: +7(4967) 35-31-93 E-mail: info@iifmail.ru

#### Аннотация

Известно, что Теории Великого объединения в рамках суперструн/супергравитации не принесли нам ожидаемого успеха в объяснении или понимании ряда проблем современной квантовой физики кварклептонного мира с его загадочными структурами различных вакуумов, свойства которых можно было бы использовать для сверхдальней квантовой телепортации. Прежде всего, огромный прогресс в суперструнах был связан с изучением различной структуры геометрических объектов больших размерностей D=6,...,12. Так внимание физиков привлекли несимметрические геометрические объекты из классификации Берже, в частности, 6-мерные пространства Калаби-Яу с SU(3) голономией, которые были вовлечены в процесс компактификации гетеротической  $E(8) \times E(8)$  10-мерной суперструны на  $M^{1,3} \times K6 (K_6 = CY_2)$ -пространство и дуальности между 5 суперструнными/М/F теориями. Очень важный результат, касающийся классификации бесконечной серии  $CY_n$  пространства с SU(n)-голономией на основе мульти-арной (n=3,4,5...) рефлексивной алгебры проективных весов, позволил вторгнуться в структуры нестандартной торовой геометрии высоких размерностей как на языке графов Берже, так и на структуре самих многомерных объектов. Топологические особенности пространств СҮ с n=3 и выше подтолкнули нас к открытию бесконечной серии мульти-арных (арити=3,4,...) абелевых и неабелевых алгебр и групп, которые строились через теорию многомерной комплексификации эвклидовых  $R^n$ -пространств. В статье рассмотрены геометрические истоки начал п-арных алгебр и групп симметрий, которые уже частично изучались в наших статьях с целью описания как геометрии кутритовых и выще состояний, так и открытия новых возможностей квантового запутывания и телепортации, а также для новых физических явлений за пределами стандартной квантовой физики.

**Ключевые слова**: квантовая физика, квантовая информация, алгебры, группы, кутриты, группа голономии, графы Берже, Калаби-Яу пространства, кварки, лептоны, мааркрионы.

#### Summary

It is known that the Great Unification Theories within the framework of superstrings/supergravity did not bring us the expected success in explaining or understanding a number of problems of modern quantum physics of the quark-lepton world. First of all, huge progress in superstrings was associated with the study of the various structures of geometric objects of large dimensions D=6,...,12. So, physicists attracted the attention of asymmetric geometric objects from the Berger classification, in particular, 6-dimensional Calabi-Yau spaces with



SU (3) holonomy, were involved in the process of compactification of the heterotic  $E(8)\times E(8)$  10-dimensional superstring into spaces  $M^{1,3}\times K_6$  ( $K_6=CY_3$ ) and studying duality between 5 superstring/M/F theories. A very important result concerning the classification of an infinite series of CYn spaces with SU(n)-holonomy based on the multi-ary (n=3,4,5...). Reflexive algebra of projective weights allowed us to invade the structures of non-standard torus geometry of high dimensions as in the language of graphs Berger, and on the multidimensional objects themselves. The topological peculiarities of the spaces  $CY_n$  with n=3 and above prompted us to discover an infinite series of n-ary Abelian and non-Abelian algebras and groups, which were constructed through theories of multidimensional complexification of Euclidean  $R^n$ -spaces. The article considers the geometric sources of the beginnings of n-ary algebras and symmetry groups, which have already been partially studied in our articles with the aim of describing both the geometry of the qutrits and higher states and the discovery of new possibilities of quantum entanglement and teleportation, as well as for new physical phenomena outside the standard quantum physics.

**Keywords:** quantum physics, quantum information, algebras, groups, cutrites, holonomy group, Berger graphs, Calabi-Yau spaces, quarks, leptons, maarkrions.

#### Введение

Кутриты и высшие многомерные состояниякудиты могут привести к расширению фундамента квантовой физики совершенно по тем же причинам [1,2,3,4], по которым требуется ее расширение в сфере физики сверхвысоких энергий, которая в настоящий период проникла в самые запутанные дебри микромира 3-х кварклептонных поколений (семейств)

 $I = \{(u,d)^a, (v_e,e)\}, II = \{(c,s)^a, (v_u,\mu)\}, III = \{(t,b)^a, (v_i,\tau)\},\$ где  $a=1,...,3; N_s=3$  – три цветовых состояния, которые, участвуют в электромагнитных взаимодействиях (1-векторный безмассовый фотон  $A_{_{\!\scriptscriptstyle I\!\!I}}$  ), сильных цветовых взаимодействиях  $((N_c^2-1)=8$ -векторных безмассовых глюонов  $G_u^k$ ; k=1,...,8) и слабых взаимодействиях (три массивных векторных бозона, два заряженных  $W_{_{\parallel}}^{\ \pm}$ с массой  $80\Gamma \ni B/c^2$  и один нейтральный  $Z_{\mu}^{\ 0}$ с массой 91ГэВ/с<sup>2</sup>. Современное понимание физики этих элементарных состояний нашей Вселенной в рамках Стандартной Модели (без учета гравитации) определено двумя типами непрерывных групповых симметрий, внешними глобальными группами симметрий пространства-времени G<sup>ext</sup>-группы Пуанкаре [5], описывающей параметры и свойства многообразия окружающего мира, и внутренними локальными групповыми симметриями

$$G^{int} = SU(3^c) \times SU(2_{IW}) \times U(1^Y),$$

описывающими как квантовые свойства материи, так и взаимодействия материи, распространяющейся в рассматриваемом пространственно-временном континууме  ${\rm M}^{1,3}$ . Основополагающую роль групп симметрий как внешних, так и внутренних, играют неприводимые представления этих групп, которые определяют конкретно тип и все квантовые параметры материи – заряд  ${\rm Q}^{\rm em}$ , спин –  ${\rm S}$ , цвет –  ${\rm Q}^{\rm color}$ , изотопический спин-I, масса- ${\rm m}$ ,..., и исходя из ковариантности полей материи и инвариантности взаимодействия в рамках квантового подхода с учетом дополни-

тельных глобальных дискретных законов сохранения CPT-инвариантности, или нарушения пространственной P-четности и комбинированной CP-четности в слабых переходах выстраивается базис самой теории в рамках S-матрицы [5].

Одним из важнейших достижений так построенной теории является ее перенормируемость, что означает возможность рассчитывать физические процессы в любом порядке теории возмущений и сравнивать их с результатами экспериментов [5].

Перенормируемость квантового фундамента Стандартной Модели, прежде всего, связана с размерностью Dim=1t+3s=4 пространства-времени  $M^{1,3}$  с группой внешней симметрии Пуанкаре, а также с типами внутренних симметрий, абелевой калибровочной группы электромагнетизма  $U(1_{em})$ , неабелевой безмассовой калибровочной группы хромодинамики SU(3°) (массы 8-глюонов  $m(G_u^k)=0$ ). Спонтанно-нарушение электрослабой группы калибровочной симметрии  $SU(2_{IW}) \times U(1_{V})$  до калибровочной симметрии электромагнетизма  $U(1_{{\it EM}})$  основано на введении в теорию  $SU(2_{{\scriptscriptstyle IW}})$ -комплексного дублета  $\psi = (\psi^+, \psi^0)^T$ , в совокупности 4-х скалярных частиц, с чисто мнимым значением первоначального его массового параметра. Спонтанное нарушение означает, что первоначальная симметрия  $SU(2_L)$  $_{w}) \times U(1_{v})$  с калибровочными векторными полями  $W_{u}^{i}$ , i=1,2,3 и  $Y_{u}^{0}$ , соответственно, нарушается в вакууме теории, при чем таким образом, чтобы три калибровочных поля

$$(W_{\mu}^{\pm}=(^{1}\!/_{2})^{1/_{2}}(W_{\mu}^{-1}\pm i\ W_{\mu}^{-2}),\ Z^{0}=W_{\mu}^{-3}cos\theta_{w}-Y_{\mu}^{-0}sin\theta_{w}),$$
 ответственных за слабые переходы  $(sin^{2}\theta_{w}=1-M_{w}^{-2}/M_{z}^{-2}\approx0.23),$ 

калибровочное электромагнитное поле  $A_{\mu}$ , остается безмассовым, в соответствии с законом сохранения электромагнитного заряда



$$Q_{EM} = I_{3W} + Y/2,$$

а соответствующее электромагнитному полю единственное скалярное поле из заряженного дублета остается в спектре и приобретает массу. Это поле, которое называют Хиггсовским бозоном, и было открыто недавно в экспериментах на протон-протонном коллайдере в ЦЕРНе с массой ≈125 ГэВ/с² с далеко идущими перспективами открыть механизм образования электромагнитно-заряженной материи во вселенной и найти подход к квантованию гравитации на будущих электрон-позитронных (протон-протонный) коллайдерах сверхвысоких энергий (компактный линейный коллайдер СLIС в CERN и будущий круговой коллайдер с периметром 100км -FCC-ее (45-175 ГэВ) и FCC-рр(100 ТэВ)в CERN).

В результате, при рассмотрении только квантовой электродинамики электрона или протона (эм. заряженных частиц), созданной на основе локальной группы симметрии  $U(1_{\scriptscriptstyle EM})$ , симметрия вакуума сохраняется, что проверено с большой степенью точности. Следующий шаг для объяснения природы образования  $Q_{EM}$  заряженных частиц во вселенной, понадобились слабые взаимодействия, идущие с нарушением P-четности, в которых только нейтрино остается чисто нейтральным объектом, (V-A)-пространственно-временной структуры SO(1,3)-группы симметрии, причем слабость взаимодействий объясняется массивными промежуточными  $W_{u}^{+}, W_{u}^{-}, Z^{0}$  - векторными бозонами, которые они приобретают за счет нарушения первоначальной  $SU(2_{nv}) \times U(1_{v})$  симметрии вакуума, сохраняющим только  $U(1_{{\scriptscriptstyle EM}})$  - симметрию, которая сохраняется во всей вселенной. Несмотря на огромный успех в этой модели есть ряд недостатков, связанных с ее построением. Например, построение Лоренц-(V-A)-структуры фермионов в  $SU(2_{nv})$ -дублетах и (V+A)-фермионов в  $SU(2_{IW})$ -синглетах требует более глубокого исследования. Другая загадка это происхождение слабого изотопического  $I_{\scriptscriptstyle W}$ -спина и  $U(I_{\scriptscriptstyle V})$ -гиперзаряда, которые фактически играют роль в образовании  $Q_{_{\!F\!M}}$  – заряда для кварковых, лептонных состояний, оставляя нейтрино чисто нейтральным состоянием. Наконец. в Стандартной Модели в связи с открытием хиггсовского бозона открывается один из самых насущных вопросов вселенной - образование массы материи, в данном случае образование масс кварков и заряженных лептонов через диагонализацию трех (3x3)-матриц  $M_{ii}^{(f)}$ , образовавшихся в результате юкавских связей 3-х "up"-кварков  $f = \psi_i = (u^a, c^a, t^a)$ , 3-х "down"-кварков  $(f = \psi = d^a, s^a, b^a)$  и 3-х заряженных лептонов  $f = \psi_{i} = (e, \mu, \tau)$  с вакуумным ожиданием:

$$M_{ij}^{(f)} \equiv Y_{ij}^{(f)} = \lambda_{ij}^{(f)} \overline{\psi}_{iL} \langle \varphi_0 \rangle \psi_{jR} + H.C.$$
, i,j=1,2,3,  $\psi_{iL} = P_L \psi_i = 1/2(1+\gamma 5) \psi_i, \ \psi_{iR} = = P_L \psi_i = 1/2(1-\gamma 5) \psi_i,$  где  $P_{L,R}^{-2} = P_{L,R}^{-2}$  проекционные операторы на левои правокиральные состояния, соответственно.

Для 3-х нейтрино — вопрос особый, какова его роль в образовании электромагнитно-заряженной материи нашей Вселенной и его связи с другими внешними мирами [6,7]. Так не ясна даже SO(1,3)-структура нейтрино-Дираковская или Майорановская, и. более того, возможность его 6-мерной природы. В связи с открытием Хиггсовского скалярного (S=0) бозона открывается очень важная и перспективная экспериментальная проблема, какой ускоритель — коллайдер надо строить, чтобы получить всю информацию обо всех юкавских константах, если не будет открыто еще 4-ое синглетное кварк-лептонное поколение [8].

Исходя из экспериментальных данных спектр масс кварков лептонов имеет значительный разброс в секторе заряженных лептонов от массы электрона 511 КэВ/с² до массы таулептона  $m \approx 1.7 \Gamma \vartheta B/c^2$ , и масс в кварковом секторе- от масс "up"-кварка  $m_{z} \approx (2-3) \Gamma_{2} B/c^{2}$  и "down"кварка  $m_{d} \approx (4-5)\Gamma_{2}B/c^{2}$  до массы топ-кварка m(t)≈172 $\Gamma$ э $B/c^2$ , в рамках стандартной модели с одним дублетом скалярных бозонов такой огромный будет и разброс по значениям юкавских констант, что ставит под угрозу возможность решения такой экспериментальной задачи на одном коллайдере. В спектре масс кварклептонных поколений наблюдается две иерархии значений масс, одна связана с нарушением слабого изотоп-спина  $I_{w}$ , а другая иерархия более значительная связана с ростом номера  $N_{\sigma}$  поколения от  $N_{_{\sigma}}$  =1 к третьему  $N_{_{\sigma}}$ =3 то есть

 $m(\mathfrak{I}) = m(\mathfrak{I}) < m(\mathfrak{I}) < m(\mathfrak{I}) < m(\mathfrak{I})$ ;

m(d) < < m(s) < < m(b) ; m(u) < < m(c) < < m(t);

Например была предложена такая формула для масс кварков  $m(\mu{\approx}1 GeV)$  со слабым  $SU(2_{{\scriptscriptstyle IW}})$ - изотопспином  $I_{{\scriptscriptstyle W}}=\pm1/2$  [9]

$$\begin{split} & m_{i}(k) \!\approx\! (q_{u})^{2k} \, m_{o}; \, k \!=\! 0, 1, 2; \, i_{o} \!=\! u, \, i_{1} \!=\! c, i_{2} \!=\! t \\ & m_{i}(k) \!\approx\! (q_{d})^{2k} \, m_{o}; \, k \!=\! 0, 1, 2; \, i_{o} \!=\! d, \, i_{1} \!=\! s, i_{2} \!=\! b \\ & q_{u} \!\approx\! (q_{d})^{2}, \, q_{d} \!\approx\! 4 \!-\! 5 \!\approx\! 1 / \!\! sin \theta_{e} \end{split}$$

Такая особенность масс фермионов указывает на "сильное" нарушение так называемой горизонтальной калибровочной симметрии SU(3H) {или SU(3H)xU(1H)}-кварк-лептонных поколений Ng=3 {или  $Ng=3_{CKM}+1s$ }, которую обсуждали в связи с возможностями объяснения матрицы смешивания Кабиббо–Кобаши-Маскавы и механизма нарушения СР-инвариантности. Из экспериментов по редким распадам  $\mu^{\pm}$ -мюонов,  $K^0$ -, $K^+$ -(анти)мезонов, "очарованных" с- и "быю-



ти" b-кварков, процессам  $\mu$ -e-конверсии, которые могли бы идти в случае существования этой нарушенной локальной симметрии, следует, что массы соответствующих векторных бозонов могут быть в диапазоне 1-100ТэВ?! Еще в 1980 году был предложен механизм СР-нарушения, который также мог бы быть связан с горизонтальными взаимодействиями. Текущая задача кваркового сектора Стандартной Модели является вычисление спектра масс кварков и его связь с матрицей Кабиббо-Кобаяши-Маскавыматрицы смешивания кварковых поколений, решение которой уходит в изучение приграничного вакуума, возможно определяемого не только одним единственным хиггсовским полем. Соответствующий механизм спонтанного нарушения горизонтальной SU(3H) {SU(3H)xU(1H)}-калибровочной симметрии потребует значительного расширения скалярного сектора, что значительно дополнит информацию о структуре приграничного вакуума в зоне сверхмалых расстояний, первые знания о котором дает хиггсовский механизм нарушения электрослабой калибровочной симметрии $SU(2_{rw})xU(1_{v})$ до  $U(1_{EM})$ -калибровочной симметрии света видимой вселенной [9]. В квантовой информации кроме локальности  $U(1_{EM})$ - электромагнитного вакуума, используются и глобальные его свойства, позволившие достичь первых результатов в квантовой телепортации, за дальнейшим прогрессом которой стоит глубокое понимание структуры электромагнитного вакуума, и как он был образован при рождении вселенной.

В настоящее время намечается очень критичная ситуация как для самой квантовой теории, так и для выделения главных будущих экспериментов с целью изучения вакуумов вселенной, которые представлены в Стандартной Модели квантовой физики кварков, заряженных лептонов и нейтрино:

1)  $SU(3^c)$ -вакуум глюонодинамики, природа которого связана с вопросами запирания кварков в протоне и нейтроне, которое выразилось в том, что все поиски кварков в свободном состоянии кончились неудачами. С точки зрения теории стоит задача квантования протона и нейтрона на основе новых гипотетических видов материи-мааркрионов. [10]. Хромодинамические (цветовые) взаимодействия кварков с калибровочной локальной группой симметрии, являющейся и симметрией вакуума, обуславливаются обменами безмассовых векторных бозонов- глюонов таким образом, что квантовое число цвет имеет физическое значение только внутри бесцветного адрона.

2) Сравнивая с  $SU(2_{\mathit{nw}}) \times U(1_{\mathit{w}})$ -электрослабыми

взаимодействиями кварков и лептонов, нарушение  $SU(2_{\mathit{nv}}) \times U(1_{\mathit{v}})$ -симметрии вакуума до  $U(1_{\scriptscriptstyle EM})$ -симметрии приводит к образованию масс переносчиков этого взаимодействия  $W_u^+, W_u^-, Z_u^0$ -бозонов и массам кварков и заряженных лептонов, причем сохраняющаяся  $U(1_{\scriptscriptstyle FM})$ -симметрия становится наблюдаемой величиной адронов и заряженных лептонов, а три нейтрино остаются электромагнитно-нейтральными объектами. участвующими только в (V-A\_) слабых заряженных и нейтральных переходах.  $SU(2_{IW})xU(1_{V})$ электрослабый вакуум это и изучение начала  $I_{w^{-}}$ изотопической и У-гиперзарядной симметрий, и экспериментальные исследования каналов распада хиггсовского бозона, которые могут позволить вторгнуться в механизм происхождения масс фундаментальных составляющих материикварков и заряженных лептонов, что откроет новый путь к квантованию гравитации. Другие важнейшие исследования должны касаться возможных гипотетических взаимодействий хиггсовского поля (полей, если будут открыты еще другие представители этого класса) с другой материей, например, с темной материей. Калибровочная  $SU(2_{nv}) \times U(1_{v})$ -симметрия запрещает какие-либо токовые переходы кварка в заряженный лептон или в нейтрино (и обратные переходы также). Для понимания таких запретов потребуется квантование электрона.

3) Нейтрино – это особый объект, который может осуществлять связь нашей электромагнитно-заряженной вселенной с другой многомерной гипервселенной, в которой надо искать начало образования нашей вселенной с материей в виде заряженных кварков и лептонов с их дальнейшими подструктурами. Это должно пролить свет на природу вакуумов, на происхождение электромагнитного света, спиновой структуры, цвета, массы материи.

# Глава 1. Геометрия групп Ли в квантовой физике и пути их расширения

Многие идеи и положения квантовой физики были заложены еще в абстрактной математике, прежде всего в теории чисел, алгебрах, группах преобразований и симметрий, теории многообразий и пространств. Это касается и специальной, и общей теорий относительности. В формулировке аксиом специальной теории относительности основную роль сыграло открытие как самих уравнений Максвелла, так и их инвариантность (ковариантность) относительно  $\mathcal{A}=4(=3s+1t)-x$ -мерных преобразований, образующих ортогональную группу SO(3,1)-симметрии неэвклидового пространственновременного континуума "видимой" вселенной,



что для физических концепций означало фундаментальное свойство электромагнитного вакуума, выражающееся как абсолютизм скорости света. Фактически уравнения Максвелла оказались инвариантными относительно конформной группы симметрий SO(4,2), следствия которой еще не конца выяснены. В общей теории относительности математическим фундаментом является прогресс в неэвклидовой геометрии Лобачевского и Римана и развитие в кривом ее обобщении аппарата дифференциальной геометрии и тензорного анализа, то есть метрический тензор Римана, которому впоследствии Эйнштейн придаст функцию гравитационного поля, тензоры кривизны и кручения и введение для ковариантного дифференцирования связности символа Кристоффеля.

Традиционная геометрия римановых симметричных однородных компактных и некомпактных пространств, исследованная на базе векторных полей, образующих алгебры Ли, фактически связана с классификацией Картан-Ли алгебр, начало которых восходит к абелевым и неабелевым алгебрам бинарных чисел – вещественных, комплексных, кватернионов, октонионов.

Дальнейший значительный шаг был основан на изучении несимметричных пространств на основе групп голономий, классификация которых была предложена Марселем Берже в 1955 году [11,12]. Примечательно, что бесконечные серии компактных комплексных пространств с SU(n)-голономией (n=1,2,3,...) оказались связаны с алгеброй рефлексивных проективных чисел, с теорией операд [13,14]. Эти числа являются обобщением знаменитых древнеегипетских чисел.

Опыт математики учит, чтобы найти новые алгебраические структуры надо начинать с поиска новых чисел и, соответственно, с создания теории этих чисел. Изученные нами  $C_n$ циклические абелевы и неабелевы n-арные комплексные числа и их групповые свойства, позволили найти новые непрерывные симметрии и их геометрические свойства, которые вместе могли бы служить базисом новой науки за пределами квантовой физики [1-4].

Классические теории электромагнитного поля и гравитации показали на глубокую связь топологических и различных структурных свойств многообразий и пространств с их локальными и глобальными симметриями. Ярким примером являются непрерывные группы, группы Ли, которые также являются многообразиями. Так как группы Ли являются аналитическим многообразием, то для них можно использовать аппарат дифференциальной геометрии, кото-

рый позволяет использовать весь арсенал векторных полей и других тензорных структур на многообразии. В результате, почти вся информация групп Ли изучалась на основе касательного пространства единицы группы, Ли алгебры [12,15,16]. Все касательные вектора в точке образуют касательное векторное пространство в точке g, а множество всех касательных векторных пространств, для всех  $g \in G$  образуют расслоение T=UTg. Векторное поле это расширение X(g) на всю группу  $X(g) \in G$ ,  $g \in G$ . Векторные поля образуют не только векторное пространство, но и бесконечномерную алгебру относительно операции коммутатора, [Х,Ү], называемую Ли алгеброй. В результате, векторные поля образуют  $\Lambda$ и алгебру на любом многообразии, но на групповом многообразии можно ввести подпространство лево-инвариантных векторных полей, которые образуют конечномерную алгебру Ли размерности, совпадающей с размерностью многообразия. Одно из важнейших свойств такого подхода касается кривизны, которая всюду на многообразии постоянна [12,17]. Как было обнаружено в тернарной неабелевой G=TSU(3)группы симметрии [1] помимо бинарных коммутационных соотношений 8-генераторов tsu(3)удовлетворяла тернарному коммутационному соотношению:

 $[X,Y,X] = XYZ + jYZX + j^2ZXY$ 

Появление в алгебре тернарного коммутатора связывается с тернарным коммутантом  $U = \{exp(tX)exp(uY)exp(vZ)\} \times exp(jtX)exp(juY)exp(jvZ)\} \times \{exp(j^2tX)exp(j^2uY)exp(j^2vZ)\}$ 

где  $j^3=1$ ,  $1+j+j^2=0$ .

Возникновение новой дифференциальной структуры можно объяснить тем, что TSU(3)-многообразие не является пространством постоянной кривизны. Связь пространств постоянной кривизны или, как их называют локальносимметрические пространства, с группами  $\Lambda$ и будет обсуждена ниже.

# Глава 2. Группы Ли и однородные симметричные пространства

Для группы  $\Lambda$ и G операция умножения определяется как  $w:GxG \mapsto G$ ,  $w(g_1,g_2)=g_1g_2$  для всех  $g_1g_2 \in G$ , где действие группы G на G является свободным и транзитивным. Пусть G группа  $\Lambda$ и, и она действует на многообразии  $M:x\mapsto gx$  для  $x,y\in M$ ,  $g\in G$ . Действие группы G свободно, если для gx=x для некоторой точки  $x\in M$  подразумевает g=e. Действие этой группы G на G транзитивно, если для любых двух точек G существует такой элемент G что G что G для любого G определяется орбита точки G как подмножество G на G у G у G у G у G у G определяется орбита точки G как подмножество G на G у G у G у G у G у G у G определяется орбита точки G как подмножество G у G у G у G у G у G у G у G у G у G у G определяется орбита точки G как подмножество G у G



может быть задано действие подгруппы изотропии H. Подгруппа H состоит из тех элементов группы G, которая оставляет точку  $x \in M$  фиксированной, то есть  $H:\{g \in G \mid gx=x\}$ . Группа изотропии определяется однозначно относительно любого выбора точки  $x \in M$ . Действие группы G свободно, если каждая изотропная подгруппа тривиальна и транзитивна, то есть, если ровно одна орбита [12,15,16].

Многообразие M относительно транзитивной группы G называется однородным пространством такой группы. Существует взаимно однозначное соответствие между точками однородного пространства M группы G и фактор-классами G/H, где H – группа изотропии. Симметричные пространства могут быть определены с помощью симметрии инволюции, т.е. на односвязном многообразии M с метрическим тензором  $g_{ab}$ для точки  $x \in M$  может определяеться изометрия  $\sigma_{x}:M\mapsto M$ , оставляющая точку x фиксированной и относительно которой все касательные векторы v в точке x получают отражение:  $\sigma(v) = -v$ . Напомним, что изометрия – это диффеоморфизм  $M \mapsto M$ , который сохраняет метрику. Симметричные пространства также могут быть определены условием на тензор кривизны, который должен быть параллельным:  $\nabla R = 0$  [12,17]. Существует очень важная связь симметрических пространств с тензором кривизны, Итак римановы пространства (M,  $g_{ii}$ ) локально симметричны тогда и только тогда, когда они имеют постоянную кривизну  $\nabla R = 0$ . Таким образом, симметричные пространства являются пространствами постоянной кривизны. Также симметричные пространства локально однородны. Симметрические пространства имеют транзитивную группу изометрий. Известными примерами симметричных пространств являются  $R^n$ , сферы  $S^n$ ,  $CP^n$  и т.д. (см. таблицу 1).

Сфера  $S^{n-1} = SO(n)/SO(n-1)$  в пространстве  $R^n$ , заданная уравнением:  $x_1^2 + \ldots + x_n^2 = 1$ , является однородным пространством относительно группы SO(n) с группой изотропии SO(n-1). Точно так

**Таблица 1**Примеры симметрических однородных пространств

М	G <sub>транз</sub>	Н <sub>изо</sub>	Dim <sub>R</sub>	V
SO(n)/SO(n-1)	SO(n)	SO(n-1)	n-1	S <sup>n-1</sup>
O(n)/O(n-1)	O(n)	O(n-1)	n-1	RP <sup>n-1</sup>
SU(n)/SU(n-1)	SU(n)	SU(n-1)	2n-1	S <sup>2n-1</sup>
SU(n)/SU(n1)xU(1)	SU(n)	SU(n-1)xU(1)	2n-1	CP <sup>n-1</sup>
SP(n)/SP(n-1)	Sp(n)	Sp(n-1)	4n-1	S <sup>4n-1</sup>
Sp(n)/Sp(n1)xSp(1)	Sp(n)	Sp(n-1)xSp(1)	4n-1	HP <sup>n-1</sup>

же проективное пространство можно представить в следующем виде  $RP^n = O(n)/O(n-1) \times O(1)$ . Для унитарных групп SU(n) примерами являются сферы  $S^{2n-1} = SU(n)/SU(n-1)$ , заданные в  $C^n$  квадратурой  $|z_t|^2 + \ldots + |z_n|^2 = 1$ , которые имеют транзитивную группу SU (n) и изотропную группу SU(n-1). Соответственно, для комплексных проективных пространств  $CP^n = SU(n)/SU(n-1) \times U(1)$ , которые непосредственно, участвуют в практических приложениях в квантовой информации. Чистые состояния кудитов образуют комплексные проективные компактные многообразия  $CP^{n-1}$ : кубит n=2, кутрит n=3,...

# Глава 3. Группа голономии и несимметричные пространства

Понятие симметрии голономии было введено для всех римановых локально симметричных пространств. Группа голономии H является одной из основных характеристик связности на многообразии М. Определение группы голономии непосредственно связано с параллельным переносом вектора вдоль замкнутого кусочногладкого пути. Для связного п-мерного многообразия M с римановой метрикой  $g_{ii}$  и связностью  $\Gamma_{ii}^{\ k}$  параллельный перенос вектора  $v \in T_{b}M$  определяется изометрией скалярного произведения на касательных пространствах  $T_{b}M$ . Так что для любой точки  $p \in M$  можно представить множество всех линейных автоморфизмов ассоциированных с касательными пространствами  $T_p M$ , индуцированными всевозможными параллельными переносами вектора  $v = v^{\alpha} \partial_{\alpha} |_{p}$  вдоль замкнутых кривых  $C_{b} \in M$ , начинающихся и заканчивающихся в точке P.

На римановом многообразии М касательные векторы могут перемещаться вдоль пути параллельными переносами, которые сохраняют операции сложения векторов и скалярного умножения. Замкнутый цикл в базовой точке P приводит к обратимому линейному отображению  $T_{_{b}}M$ касательных векторов в Р. Можно образовывать любые замкнутые циклы, производя один за другим, инвертировать их, возвращаясь назад. Следовательно, множество линейных преобразований, возникающих при параллельном переносе по замкнутым петлям, образует группу голономии [12,17]. В общем случае связность на римановом пространстве размерности n является SO(n)-калибровочным полем. Некоторые из них или все SO(n)-матрицы могут образовывать подгруппу группы голономии  $H_{\sigma l} \subset SO(n)$ .

На римановом многообразии существует единственная связность, которая не имеет кручения и совместима с метрикой. На римановом (псевдориманновом) многообразии M с метри-



ческим тензором  $g_{ik}$  существует каноническая связность (связность Леви-Чивита), также известная ковариантная производная, которая на касательном расслоении, обеспечивает ковариантное дифференцирование векторных полей, форм или любых тензорных полей.

Так для векторных  $T^i(x^I,...,x^n)$  и ковекторных  $T_i(x_I,...,x_n)$  полей операции ковариантного дифференцирования определяются, соответственно, следующим образом

 $\nabla_k T^i = \partial T / \partial x^k + \Gamma^i_{mk} T^m$ ,  $\nabla_k T_i = \partial T_i / \partial x^k - \Gamma^m_{ik} T_m$  где  $\Gamma^m_{ik}$  – символ Кристоффеля. Через ковариантное дифференцирование определяется ковариантно постоянное или параллельное векторное (тензорное) поле, которое переносится вдоль кривой  $x^k = x^k(t)$ , имеющей вектор скорости  $v^k = dx^k / dt$ :

$$\nabla_{v} T^{i} = v^{k} \cdot \nabla_{k} T^{i} = v^{k} \cdot (\partial T^{i} / \partial x^{k} + \Gamma^{i}_{mk} T^{m}) = 0.$$

Вращение, заданное группой голономии, является мерой кривизны многообразия. На римановом многообразии  $(M;g_{ij})$  кривизна  $R(^{\nabla})$  связности является тензором  $R^m_{ijk}$ , для которого выполняются следующие уравнения  $g_{lm}R^m_{ijk}=R_{lijk}$  [12,17]:

$$\begin{split} R_{ijkl} = -R_{jikl} = -R_{ijlk} = R_{klij}; \quad R_{ijkl} + R_{iljk} + R_{iklj} = 0; \\ \nabla_b R_{iikl} + \nabla_k R_{iilb} + \nabla_l R_{iibk} = 0. \end{split}$$

Кривизна Риччи  $R_{ik} = R^m_{\ imk,}$  являющаяся частью полной римановой кривизны, удовлетворяет  $R_{ik} = R_{ki}$ . В случаях  $R_{ij} = 0$ , риманова метрика называется Риччи плоской.

Геометрически параллельный перенос касательного вектора  $v^k$  вдоль бесконечно малой петли дает изменение  $\delta v^k$ , пропорциональное кривизне:

$$\delta v^k \sim [\nabla_i, \nabla_j] v^k = R_{ijl}^k v^l.$$

Таким образом, вектор  $v^k$  преобразуется ортогональными матрицами R(ij). Если группа голономии есть унитарная группа  $H_{gl} = U(n)$ , матрицы R(ij) уже являются U(n)-генераторами, вложенными в SO(2n)-матрицы. В этом случае матрицы R(ij)kl с фиксированными индексами (i,j) производят преобразование U(n). Если мы рассмотрим теперь римановы многообразия с SU(n)-голономией, можно получить гораздо более важное ограничение для тензора кривизны.

Понятие постоянства (параллельности) вектора (тензора) зависит от связности и выбора кривой. Если в качестве вектора взять вектор скорости кривой  $T^k = dx^k/dt$ , то это уравнение дает определение геодезической линии связности  $\Gamma^m_{ik}$ , связывающей какие-либо две заданные точки многообразия, которая будет согласована с метрическим тензором  $g_{ij}$ , если  $\nabla_k g_{ij} = 0$ , k, i, j=1,...,n. Из условия согласованности связности с метрикой следует постоянство скалярного про-

изведения двух векторных полей  $u^i(t)$  и  $v^j(t)$  параллельно переносимых вдоль кривой  $x^i = x^i(t)$ :

 $d/dt(g_{ij}u^{i}(t)v^{j}(t)) = dx^{k}/dt \cdot \nabla_{k}(g_{ij}(t)u^{i}(t)v^{j}(t)) = 0.$ 

В результате, согласованность связности с метрикой приводит к тому, что параллельный перенос векторного поля из одной точки кривой в другую является ортогональным O(n)-преобразованием касательного пространства в одной точке в касательное пространство другой точки той же кривой. Для многообразия  $C^n$  с координатами  $z=x_1+iy_1,...,x_n=x_n+iy_n$  и эрмитовой метрикой  $ds^2=g_{ij}dz^idz^{i*}$ ,  $g_{ij}=(g_{ji})^*$  можно определить в вещественных координатах  $x^1,...,x^n, y^1,...,y^n$  риманову метрику

 $dr^2 = Re(g_{ib})[dx^i dx^k + dy^i dy^k],$ 

с которой единственным образом можно согласовать симметрическую связность. Чтобы согласовать ее с комплексной структурой необходимо потребовать замкнутости следующей дифференциальной формы  $w=1/2dz^i \wedge dz^{j*}$ , то есть dw=0. В этом случае метрика  $ds^2$  называется кэллеровской и параллельные переносы соответствуют уже преобразованиям унитарной группы  $U(n) \subset SO(2n)$  [12].

Риманово многообразие (M;g) называется римановым симметрическим пространством, если для каждой точки р€М существует изометрия  $s_{b}:M->M$ , которая является инволюцией (то есть  $(s_p)^2$  является тождеством), такая, что p является изолированной фиксированной точкой  $s_h$  [12,17]. Примеры включают  $R^n$ , сферы  $S^n$ , проективные пространства  $CP^m$  с метрикой Фубини. Симметрические пространства имеют транзитивную группу изометрий. Симметричные пространства могут быть классифицированы полностью, используя теорию групп  $\Lambda$ и. Эта классификации позволяет вывести список групп голономии симметричных пространства. Риманово многообразие (M; g) называется локально симметричным, если каждая точка имеет открытую окрестность, изометричную открытому множеству в симметрическом пространстве, и несимметричный, если оно не является локально симметричным.

Римановы многообразия (M,g) локально симметричны тогда и только тогда, когда  $\nabla R = 0$ . Если связь локально симметрична, то ее группа голономии  $H_{gl}$  совпадает с локальной подгруппой изотропии  $H_{uso}$  группы изометрий G. Следовательно, классификация групп голономии для этих связей эквивалентна классификации симметричных пространств [11]. Полный список симметрических пространств (см.табл.1) задается группами  $\Delta$ и через однородные пространства M = G/H, где G связная группа  $\Delta$ и, действующая транзитивно на M и H, являющейся односвязной подгруппой  $\Delta$ и группы G, что определяет



группу голономии M. Исходя из этого и была найдена классификация групп голономии  $H_{gl}$  для несимметричных неприводимых римановых многообразий M [11]. В 1955 году Берже доказал, что если M — односвязное многообразие размерности n, и  $g_{ij}$  является римановой метрикой на M, которая неприводима и не симметрична, тогда точно один из следующих семи случаев имеет место [11,17]. Список Берже несимметричных неприводимых римановых многообразий с группами голономии  $H_{gl}$  из M можно увидеть в  $maблице\ 2$ .

Поскольку параллельный перенос сохраняет риманову метрику д, группа голономии Н содержится в ортогональной группе O(n). Более того, если многообразие ориентируемо, то оно содержится в специальной ортогональной группе SO(n). Общая риманова метрика на ориентируемом многообразии имеет группу голономии SO(n), но для некоторых специальных метрик она может быть ее подгруппой. Комплексные Келлер многообразия с группой голономией, содержащейся в группе U(n), являются римановыми многообразиями с комплексной структурой В настоящее время известно (но потребовалось еще тридцать лет, чтобы выяснить это), что все группы в списке Берже существуют как группы голономии неприводимых, несимметричных метрик [11,17].

$$(1) \ H_{gl} = SO \ (n),$$
 
$$(2) \ n = 2m \ c \ m > 2 \ u \ H_{gl} = U \ (m) \ e \ SO \ (2m),$$
 
$$(3) \ n = 2 \ m \ c \ m > 2 \ u \ H_{gl} = SU \ (m) \ e \ SO \ (2 \ m),$$
 
$$(4) \ n = 4 \ m \ npu \ m > 2 \ u \ H_{gl} = Sp \ (m) \ e \ SO \ (4 \ m),$$
 
$$(5) \ n = 4 \ m \ npu \ m > 2 \ u \ H_{gl} = Sp \ (m) \ Sp \ (1),$$
 
$$(6) \ n = 7 \ u \ H_{gl} = G2 \ e \ SO \ (7) \ unu$$
 
$$(7) \ n = 8 \ u \ H_{gl} = Spin \ (7) \ e \ SO \ (8).$$

SO(n) — группа голономии общих римановых метрик. Римановы метрики g c  $H_g$   $\subset$  U(n) называются кэлеровыми метриками. Эти метрики являются естественным классом метрик на комплексных многообразиях. Метрики g c  $H_g$   $\subset$  SU(n) называются метриками Калаби-Яу поскольку SU(n) является подгруппой в U(n)= $SU(n)\times U(1)$ ,

**Таблица 2**Список классификации Берже для несимметричных
Римановых пространств

M	H <sub>al</sub>	DimR
Общее	SO(n)	n
Кэллер	U(n)⊂SO(2n)	n
Калаби-Яу	SU(n)⊂SO(2n)	2n
Гипер-Келлер	Sp(n)⊂SO(4n)	4n
Кватернион-Келлер	Sp(n)xSp(1)	4n
Исключительная	G(2)⊂SO(7)	7
Исключительная	Spin(7)⊂SO(8)	8

все метрики Калаби-Яу являются кәлеровыми. Если g является кәлеровым, а M односвязным, то  $H_{gl} \subset SU(n)$  тогда и только тогда, когда g является Риччи плоской  $R_{ij} = 0$ . Группы голономии  $G_2$  и Spin(7) называются исключительными группами голономии.

Группы голономии можно понимать с точки зрения четырех алгебр с делением: действительных чисел R, комплексных чисел C, кватернионов H и октонионов O. Так SO(n) – группы автоморфизмов  $R^n$ . U(m) и SU(n) – группы автоморфизмов  $C^n$ . Sp(n) и  $Sp(n)\times Sp(1)$  являются группами автоморфизмов  $H^n$ .  $G_2$  – группа автоморфизмов  $ImO=R^7$ . Спин O0 является группой автоморфизмов  $O=R^8$ 0.

В 10-мерной теории суперструн возник особый интерес к бесконечной серии пространств Калаби-Яу  $CY_n$  с группой голономии SU(n), n=1,2,3,4,... [13,14]. Здесь лучше определить п-мерные многообразия Калаби-Яу как четверку  $(M,J,g,\Omega)$ , где (M;J) – комплексное компактное п-мерное многообразие с комплексной структурой I, g – является кэлеровой метрикой с SU(n) – группой голономии, и ненулевым постоянным (параллельным)  $\Omega = (n, 0)$ -тензором, называемым формой голоморфного объема. В принципе, достаточно определить п-мерное Калаби-Яу пространство как компактное кэлерово многообразие (M; J; g) размерности n с группой голономией SU(n), что позволяет доказать существование ненулевой постоянной (параллельной) голоморфной  $(n; \theta)$  формы:  $\Omega = dz_1 \wedge ... \wedge dz_n$  [17]. Таким образом, в самом общем случае, касательный вектор преобразуется ортогональными матрицами R(ij). Если группа голономии есть U(n), матрицы R(ij) уже являются U(n)-генераторами, вложенными в SO(2n)-матрицы. В этом случае матрицы R(ij)kl с фиксированными индексами (i,j) производят преобразование U(n). Если мы рассмотрим теперь римановы многообразия с SU(n)-группой голономии, можно получить гораздо более важное ограничение для тензора кривизны. Метрики такого многообразия должны быть Риччи плоскими  $R_{:t} = 0$ .

В результате классификации Берже существует несколько бесконечных рядов с группами голономии SO(n), U(n), SU(n),  $Sp(n) \times Sp(1)$ , Sp(n), а также с некоторыми исключительными пространствами. с голономией G(2), Spin(7) [11,17].

Для суперструнных теорий особый интерес представляло изучение пространств  $CY_n$  с n=2,3,..., огромный набор пространств  $CY_n$  с  $n\geq 3$  мог бы быть связан с новыми n-арными симметриями групп  $\Delta u$ . Так было обнаружено, что эллиптические расслоения  $K3\equiv CY_2$  с их структурой особенностей тесно связаны с аффинными



симметриями  $\Lambda$ и. Эта связь пространств  $CY_2$  с алгебрами  $A_r^{(I)}$   $D_r^{(I)}$ ,  $E_6^{(I)}$ ,  $E_7^{(I)}$ ,  $E_8^{(I)}$  проявилась на основе «крепент» разрешений в этих пространствах сингулярностей C2/G [13], где G – дискретная подгруппа в SU(2). Для эллиптических К3-расслоений, которые можно было записать в форме Вейерштрасса, была найдена классификация ADE-вырождений [13]. В следующей главе этой статьи, которая будет опубликована в очередном номере, мы изложим основные успехи и достижения в исследовании Калаби-Яу пространств с -SU(n)-группой голономии, а также пространств с исключительной G(2)-группой голономии.

В этой связи наш интерес к новым n-арным алгебрам и их классификации начался с изучения пространств более высокой размерности  $CY_n$ ,  $n=3,4,\ldots$ , характеризуемых соответственно группами голономии SU(3),  $SU(4),\ldots[14]$ . Наша гипотеза состоит в том, что пространства  $CY_3(CY_n)$  связаны с тернарными (n-арными) симметриями, которые являются естественным обобщением бинарных Картан- $\Delta$ и симметрий .

Все современные теории, основанные на бинарных алгебрах Ли, имеют общее свойство, так как алгебры/симметрии связаны с некоторыми инвариантными квадратичными формами. Тернарные алгебры/симметрии должны быть связаны также с определенными кубическими инвариантными формами. Новые алгебры и соответствующие группы симметрий могли бы пролить свет на появление все новых и новых структур "несимметричной" геометрии Берже-Калаби-Яу и могли бы дать дальнейший прогресс в понимании квантовой физики и за ее пределами. Кажется, что, принимая во внимание различные измерения, можно понять очень глубоко, как расширить понятие групп  $\Lambda$ и, привлекая многомерные пространства с большим числом тензорных и топологических структур, когда симметричные римановы пространства становятся уже недостаточными для дальнейшего проникновения в тайны вселенной, в основы современной квантовой физики и за ее пределами.. Этот процесс можно усложнять и идти к дальнейшему усложнению закона композиции. Наш интерес к новым п-арным алгебрам и группам симметрий [9,20-23] находится в тесной взаимосвязи между открытыми вопросами в современной квантовой физике кварк-лептонной материи, как симметрий с их возможным спонтанным нарушением, так поисками новых путей, расширяющих геометрию 4-х мерного пространства-времени с соответствующими новыми внешними симметриями, что позволило бы нам понять рождение вселенной с динамикой возникновения квантовых параметров фундаментальных объектов материи и всех видов ее взаимодействий. Все это находится в тесной связи с вопросами достижения сверхдальней телепортации, которое зависит от глубины нашего понимания вакуумов вселенной. Конечно, могут быть и другие направления, например. такие как квантовые группы, но эти направления не касаются пока расширения самих законов композиции в сторону проблемы многих тел.

#### Литература

- 1. Царьков А.Н., Смуров С.В., Волков Г.Г. Тернарные неабелевы симметрии о запутывании многомерных пространств// Известия Института инженерной физики, 2020. №2(56). С.74-81.
- 2. Волков Г.Г., Масликов А.А., ЦарьковА.Н., Смуров С.В. О геометрии невидимого света вселенной// Известия Института инженерной физики, 2020. №1(55). С.74-84.
- 3. Царьков А.Н., Смуров С.В., Волков Г.Г., Масликов А.А., Капитонов И.Ю. Симметрийно-групповые расширения аксиом квантовой физики в динамике квантовых систем// Известия Института инженерной физики, 2019. №4(54). С.84-92. 4. Смуров С.В., Волков Г.Г., Глотова И.О., Кукин Н.С., Мурадова А.Р. Математические вопросы расширения основ квантовых теорий // Известия Института инженерной физики, 2015. №4(38). С.71-84.
- 5. Боголюбов Н.Н., Логунов А.А., Оксак А.И., Тодоров И.Т. Общие принципы квантовой теории поля. М.: Наука, 1987. 616 с.
- 6. Volkov G.G. Geometry of Majorana neutrino and new symmetries, Annales Fond Broiglie, 31 (2006). 227 p.
- 7. Volkov G.The Possible Signals from the D=6 Space-Time arXiv:1112.3583 [hep-ph]
- 8. Maslikov A.A., Sergeev S.M., Volkov G.G. NonAbelian gauge family symmetry in rank 8-16 grand unified string theories. Phys. Rev. D15. V.15 (1994)7740.
- 9. Maslikov A.A., Naumov I.A., Volkov G.G. Non-Abelian Gauge Family Symmetry in Rank 8 and 16 Grand Unified String Theories Nuovo Cim. A108: 1285-1340, 1995.
- 10. Maslikov A., Volkov G. Ternary *SU*(3)-group symmetry and its possible applications in hadron-quark substructure. Towards a new spinor-fermion structure. «Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics» (Baldin ISHEPP XXIV) Dubna, Russia, Sept 17-22, 2018 EPJ Web of Conf. V.204 (2019).
- 11. Berger M. Sur les groupes d'holonomie homog`ene des vari'et'es 'a connexion affine et des vari'et'es riemanniennes, Bull. Soc. Math. France 83 (1955). Pp.279-310.



# No3/57)202

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- 12. Дубровин Б.А., Новиков С.П., Фоменко А.Т. Современная геометрия. М.: Наука, 1979. 760 с. 13. Anselmo F., Ellis J., Nanopoulos D., Volkov G. Towards an algebraic classification of Calabi-Yau Manifolds: Study of K3 spaces, Phys. Part. Nucl. 32(2001) 318-375; Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra 32 (2001). Pp.605-698.
- 14. Volkov Ĝ. Hunting for the New Symmetries in Calabi-Yau Jungles, Int.J. Mod. Phys A19 (2004). Pp.4835-4860.
- 15. Zuber J.B. Invariances in Physics and Group Theory (2013).
- 16. Исаев А.П., Рубаков В.А. Теория групп и симметрий: Конечные группы. Группы и алгебры  $\Lambda$ и. M.: URSS, 2018. 504 с.
- 17. Dominic Joyce Riemannian holonomy groupsand calibrated geometryNotes for graduate lecture course, MT 2006.
- 18. Batyrev V. Dual Polyhedra and Mirror Symmetry for Calabi-Yau Hypersurfaces in Toric Varieties,

- J. Algebraic Geom. 3 (1994). 493 p.
- 19. Lipatov L.N., Sabio-Vera A., Velizhanin V.N., Volkov G.G. From New Geometry Towards a New Symmetry. Reflexive Numbers and Berger Graphs from Calabi-Yau Spaces, Dark Matter in Astro- and Particle Physics , DARK-2004 Springer, (2004). Pp.622-655.
- 20. Lipatov L.N., Rausch de Traunbenberg M., Volkov G.G. On the ternary complex analysis and its applications, J. Math. Phys. 49, 013502. 2008.
- 21. Volkov G.G. Ternary «Quaternions» and Ternary TU(3) algebra, arXiv: 1006.5627. 2010.
- 22. Volkov G.G., Maslikov A.A. Geometry of the Standard Model. Nonlinear Dynamics and Applications, Proc of the XXI- NPCS, Minsk, 2014. Pp.257-264.
- 23. Смуров С.В., Волков Г.Г., Глотова И.О., Кукин Н.С., Мурадова А.Р. Введение в геометрию N-арных комплексных чисел// Известия Института инженерной физики, 2016. №2(40). С.75-84.

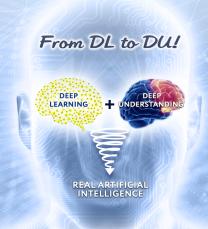




УДК 004.8:004.9

## ОТ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ К ГЛУБОКОМУ ПОНИМАНИЮ

FROM DEEP LEARNING
TO DEEP UNDERSTANDING



#### Игорь Александрович Бугаков

заслуженный изобретатель РФ почетный работник науки и техники РФ доктор технических наук, профессор член Научного совета при Президиуме РАН по методологии искусственного интеллекта и когнитивных исследований вице-президент по инновационным проектам МОУ «ИИФ» Адрес: 142210 Московская обл.,

г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: +7(4967) 35-31-93 E-mail: bia@iifmail.ru

#### Аннотация

Статья посвящена междисциплинарному обобщению с представлением в виде концептуальных идей знаний о функционировании психики и интеллекта живых организмов как основы для создания технических объектов с искусственной психикой и способным к пониманию (настоящим) искусственным интеллектом. В качестве направления дальнейших исследований, позволяющего снять ограничения и устранить недостатки реализаций ИИ на основе нейронных сетей глубокого обучения, предлагается направление, названное автором «From DL to DU»: от глубокого обучения (deep learning – DL) к глубокому пониманию (deep understanding – DU) на основе формирования и использования при реализации глубокого обучения соответствующих требуемому уровню развития ИИ аналогов присутствующих в естественном интеллекте филогенетического (видового) и онтогенетического (индивидуального) опыта с иерархически-сетевой моделью внешнего мира, ассоциативными и причинно-следственными связями, языком с необходимыми семантическими категориями, способностью к предвидению (основное предназначение интеллекта) и пр.

**Ключевые слова:** психика, интеллект, филогенез, онтогенез, модель мира, сознание, обучение, понимание, иерархия, сеть, базис, ассоциация, причинность, мультимодальность, рефлекс, автоматизм, распознавание, предвидение, последовательность, одновременность, образ, ощущение, инвариантность, язык, речь, мысль, мышление, эмоции, память, дружественность.

#### Summary

The article is devoted to interdisciplinary generalization with the presentation in the form of conceptual ideas of knowledge about the functioning of the psyche and intelligence of living organisms as the basis for creating technical objects with an artificial psyche and capable of understanding (real) artificial intelligence. As a direction for further research, which allows to remove the limitations and eliminate the shortcomings of AI implementations based on deep learning neural networks, the author propose a direction called "From DL to DU": from deep learning (DL) to deep understanding (DU) ) on the basis of the formation and use in the implementation of deep learning of the analogs of the phylogenetic (species) and ontogenetic (individual) experiences with the hierarchical network model of the external world, associative and causal relationships, a language with the necessary semantic categories, corresponding to the required level of AI development, analogs present in the natural intelligence, ability to foresight (the main purpose of intelligence), etc.

**Keywords:** psyche, intelligence, phylogenesis, ontogenesis, world model, con-sciousness, learning, understanding, hierarchy, network, basis, association, causality, multimodality, reflex, automatism, recognition, foresight, sequence, simultaneity, image, sensation, invariance, language, speech, thought, thinking, emotions, memory, friendli-ness.



Основной проблемой создания настоящего искусственного интеллекта (ИИ) является проблема понимания [12]. Демонстрируемые сегодня достижения искусственных нейронных сетей (так называемого глубокого обучения) в распознавании образов имеют статистическую основу и весьма далеки от присущего живому понимания<sup>1</sup>. От отсутствия понимании и известные общие недостатки искусственных нейронных сетей: способность грубо ошибаться, легкость обмана<sup>2</sup>, непрозрачность (невозможность обоснования) решений, зависимость качества функционирования от обучающей выборки (ее размера и качества) и длительности обучения, «катастрофическая забывчивость» и др., исключающие их применение в ответственных случаях. Очевидно, что одна только самоорганизация без наличия и использования эволюционного видового и индивидуального опыта со всеми их составляющими неспособна придать тому, что сегодня относят к ИИ, желаемое понимание.

Создание человеком понимающего («настоящего») ИИ невозможно без понимания психических процессов в организмах носителей естественного интеллекта и использования этого понимания для создания искусственной психики носителей ИИ. Интеллекта вне психики не бывает. К сожалению, целостного понимания психики живого в настоящее время нет. Знания частных наук о живом, раскрывающие отдельные стороны его функционирования, разрознены и не объединены не только с физикой, общими теориями (систем, управления, информации и др.) как универсальными областями знаний, но и между собой, еще более разъединяющимися сегодня в условиях появления множества различных нейронаправлений. Сложность такого объединения состоит не только в разобщенности подходов, предметов и понятийных аппаратов разных наук, но и в том, что «психические процессы в организме недоступны для прямого чувственного восприятия» [7]. Организм не может воспринимать свои (а тем более чужие) восприятия<sup>3</sup>. Науке неизвестен носитель представляемой в нашем сознании информации. Информация нам дана в чистом виде [4], хотя и распространяется по законам распространения своего носителя<sup>4</sup> [8]. Сегодня можно лишь утверждать о наличии связи психических состояний и процессов с регистрируемыми нервными сигналами<sup>5</sup>, но понимания того, как формируются ощущения и представления, какая одна или несколько перекодировок сенсорного нейронного кода для появления психического ощущения происходят в нервной системе, нет. Психика как предмет исследования – по-прежнему программа с закрытым исходным кодом.

Понимание психики живого для создания понимающего ИИ невозможно без междисциплинарной интеграции знаний. Только междисциплинарный подход способен привести к созданию целостной теории психических процессов в живом, объединяющей теоретические и экспериментальные знания из самых различных областей науки и позволяющей ставить и решать задачу создания «настоящего» (общего, универсального) ИИ6. Создание обобщающей теории психического («теории психики», «единой теории психики», «общей теории психики») как некой метатеории, учитывающей достижения различных областей знания, использующей новые понятия и в целом новый язык, на котором смогут общаться представителями разных наук, является настоятельной необходимостью.

К проблеме понимания ИИ сегодня есть два противоположных отношения. Большая часть исследователей отрицает какое-либо присущее ИИ понимание, некоторые же утверждают об обратном<sup>7</sup>. По-своему правы и те, и другие, поскольку говорят о разном. Первые – о высшем, итоговым понимании, реализуемым в неокортексе человека, с многофакторной иерархической категоризацией воспринимаемого и его органичным осознаваемым встраиванием в субъективную модель мира. Второе – о низшем, первичном «понимании» отделов мозга,

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Например, Р. Курцвейл в [16, С.195] утверждает, что иерархическое статистическое обучение, которое демонстрирует IBM Watson, есть не что иное, как мышление с пониманием.



<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Можно сказать, что современные реализации ИИ, использующие большие объемы информации (в том числе из Интернета), много «знают» (в смысле обладают, хранят информацию), но мало понимают. Заметим, что «многознание» при «малопонимании» - одна из основных проблем современности, препятствующая необходимому внедрению концепции устойчивого развития и ставящая под угрозу само существование человечества [34].

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Например, алгоритмы глубокого обучения плохо реагируют на изменения (сдвиг образа на несколько пикселей способен привести к потере эффективности обученной нейросети).

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Потому психическое нельзя описать иначе как в терминах свойств и отношений внешних объектов [7].

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Что может быть полезно использовано для его (носителя) выявления, связывая психически воспринимаемое с регистрируемыми процессами в нервной системе.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Физически раздражая разные участки мозга, можно вызвать различные представления. И наоборот, «усилием воли» (т.е. мыслью) можно управлять физиологией (частотой пульса, болевыми ощущениями, ...).

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Вопросам создания такой «единой теории психических процессов» посвящены труды Л.М. Веккера, например книга [7], некоторые идеи которой использованы в данной статье

автоматически (без подключения сознания) распознающих паттерны поступающей сенсорной информации. Такое распознавание условно можно считать начальным, первичным, но всетаки пониманием, которое демонстрирует узел, «принимающий решение» о соответствии между входом и конкретным выходом. «Субъективная реальность», «модель мира» такого узла состоит из объектов в виде наборов паттернов, некоторые из которых он способен «узнавать» - ставить каждому из них в соответствие сигнал на выходе (в простейшем случае: «1» - знакомый паттерн, «0» – незнакомый). И все. В этой модели нет понимания того, образ какого объекта несет распознанный паттерн, каково имя объекта, какими свойствами этот объект обладает, что он значит для других и др. Именно на таком ограниченном, зачаточном, начальном, первичном, «понимании» («понимании первого уровня»), использующем для своей реализации высокие вычислительные возможности компьютеров для предварительного статистического (само) обучения на огромном количестве примеров, основана работа современных систем распознавания, в том числе и демонстрирующих высокие практические результаты искусственных нейронных сетей глубокого обучения. Послойное по мере продвижения по сети усложнение (обобщение) несомого входным паттерном образа ничего не добавляет к сущности понимания. Выделяемые признаки по-прежнему ничего не значат, кроме их наличия или отсутствия в известном образе, никак не связанном с остальным миром. Следствием такого ограниченного понимания и являются вышеуказанные принципиальные недостатки искусственных нейросетей.

Быстрота и устойчивость распознавания организмов с естественным интеллектом является следствием применения ими при каждом распознавании всего опыта организма<sup>8</sup>, иерархически-сетевым задействованием имеющейся у него пространственно-временной «модели мира» с всевозможными ассоциативными и причинноследственными связями, восприятием на основе параллельной обработки сенсорных сигналов различной модальности с их многофакторной семантической категоризацией на соответствующем языке, что дает требуемое понимание, позволяющее органично встроить воспринимаемое в имеющуюся модель мира и сохранить его в ней для дальнейшего использования. Более того, именно понимание позволяет реализовывать основную функцию интеллекта – предвидение (достоверное прогнозирование), планировать, осуществлять «терминальное поведение»<sup>9</sup>.

Потому устранение вышеперечисленных недостатков используемого в технологиях ИИ глубокого обучения возможно только на основе углубления его «понимания», перехода от используемого ныне в глубоком обучении начального, первого уровня понимания к следующим, более «настоящим» уровням понимания в общей иерархически-сетевой системе (миро) понимания, используя полную, достаточную для эффективного функционирования<sup>10</sup> в реальности (мире), модель мира.

Исходя из этого, в качестве направления дальнейших исследований, позволяющего снять ограничения и устранить недостатки реализаций ИИ на основе нейронных сетей глубокого обучения, предлагается направление, названное автором «From DL to DU»: от глубокого обучения (deep learning - DL) к глубокому пониманию (deep understanding - DU) на основе формирования и использования соответствующих требуемому уровню развития ИИ аналогов присутствующих в естественном интеллекте филогенетического (видового) и онтогенетического (индивидуального) опыта с иерархически-сетевой моделью внешнего мира, ассоциативными и причинно-следственными связями, языком с необходимыми семантическими категориями, способностью к предвидению (основное предназначение интеллекта) и пр. При этом глубокое понимание не отрицает идею статистического обобщения глубокого обучения, по-прежнему используемого на каждом иерархическом уровне (распознавания), но уже в рамках полной (и непрерывно пополняемой в онтогенезе) модели мира, что позволяет каждому обобщению на каждом уровне глубокого обучения придать многогранный целесообразный смысл, существенно сокращая время и повышая качество обучения и дальнейшего функционирования. Сочетание глубокого обучения с глубоким пониманием (combination of deep learning with deep understanding) – ключ к решению всех проблем современного ИИ, путь к невиданному усилению интеллектуальных возможностей человека, созданию перспективной автономной интеллектуальной робототехники.

Потенциальную глубину понимания в первом приближении можно определить глубиной (количеством уровней иерархии) и шириной



<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Как суммы постоянного филогенетического опыта и развиваемого онтогенетического опыта.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Поведение, исходя из конечной цели, путь достижения которой может корректироваться в связи с появлением по мере его реализации новых обстоятельств.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> В природе – для выживания индивида и вида.

(средним количеством элементов на уровне, исходя из их общего количества) используемой иерархически-сетевой модели мира, в которую органично (логически, чувственно) встраивается воспринимаемое. У каждого вида в природе своя обобщенная генетически заданная модель, настраиваемая и развиваемая каждым представителем вида индивидуально в процессе своей жизни. Совместное существование природных видов в одних и тех же условиях ведет к частичному перекрытию видовых моделей, позволяющему их обладателям сосуществовать с достаточной степенью понимания (в рамках своих моделей) поведения друг друга.

Далее как результат анализа и обобщения различных источников [1-34] приводятся касающиеся психики, понимания, естественного и искусственного интеллектов принципы и концептуальные идеи, совокупность которых может быть полезной при постановке и решении проблемы создании «настоящего» (понимающего) ИИ.

- 1. Психика генетически заданная, проявляющаяся и развивающаяся в онтогенезе интегральная способность организма отображать свойства и отношения объектов внешнего мира в виде усложняющейся субъективной модели мира («субъективной реальности»), позволяющая организму реализовывать во внешней среде определяемое его потребностями эффективное целесообразное поведение. Психика - это то, что связывает, объединяет организм с внешним миром, позволяет его чувствовать, воспринимать, представлять, понимать и, как следствие, планировать и совершать в нем эффективные действия (в том числе и по его изменению). Возможности психики соответствует возможностям тела. Основное предназначение психики обеспечение выживания организма и продолжение рода.
- 2. Функции психики: познавательная (построение субъективной модели мира), регуляторная (управление действиями), коммуникативная (общение с другими). Носитель психики нервная система.
- 3. Каждый вид обладающего психикой живого имеет свой генетический опыт и свою видовую, генетически предопределенную оптимальную модель мира (с ее гранями «вещей в себе» и границами их познания), достаточную для существования с учетом возможностей тела и соответствующих им возможностей нервной

системы. Каждый вид ощущает, воспринимает и мыслит мир наиболее полезным для выживания и развития образом, взаимодействует со своей частью реальности, становясь вместе с ней единой целостностью, и использует свой язык ее описания.

- 4. Генетически заданная видовая (филогенетическая) и формируемая в процессе жизни индивидуальная (онтогенетическая) составляющие в психике живого присутствуют в виде программ. Филогенетическая составляющая представлена безусловными рефлексами (от элементарных автоматизмов до сложных инстинктивных программ поведения), программами поддержания гомеостаза. Онтогенетическая - сформированными (большей частью под контролем сознания) в процессе индивидуальной жизни временными (могут исчезать за ненадобностью) условными рефлексами, поведенческими автоматизмами (от элементарных до сложных). Причем большинство из частного онтогенетического базируется на общем (базисном) программно-заданном филогенетическом, «включаемом» в соответствующие моменты времени (например, по завершении исполнения предыдущих программ) и доводимым (раскрываемым) под условия и потребности конкретного организма<sup>11</sup>. К среде обитания априорно адаптировано не только тело, но и мозговые структуры с их априорным опытом и алгоритмами функционирования, управляющие действиями тела.
- 5. Содержание филогенетических и онтогенетических программ формируется, исходя из постоянства (нахождения в заданных пределах диапазонности) условий среды обитания: земных условий в целом для филогенеза, конкретных условий обитания организма для онтогенеза. Чем неизменней условия (меньше диапазон их изменения), тем специализированней (и эффективней) программа.
- 6. Особенностью формируемой психикой субъективной модели мира является ее принципиальная ограниченность и в то же время субъективная полнота (замкнутость) в каждый момент жизни, позволяющая принимать «обоснованные» (на своем уровне понимания, исходя из возможностей своей модели) поведенческие решения. Знание о себе позволяет учитывать влияние внутренних состояний на познание внешних объектов.
- 7. Понимание как логичное (органичное) встраивание воспринимаемого в индивидуаль-

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Мы не можем знать, что еще существует в реальности помимо того, что нашло отражение в нашей модели мира на основе информации от наших органов чувств.



<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Пропуск генетически предопределенного момента включения таких программ может иметь для организма катастрофические последствия («дети-маугли»).

# No3(57)202

# ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

ную модель мира (с ее возможным расширением) и способность объяснить (себе и другим) – условие наличия и проявления интеллекта, способного выявлять причинно-следственные связи в происходящих пространственно-временных событиях. Восприятие «вскрывает» сенсорный код, сравнивает его с хранимым в памяти, приписывая ему значение, выявляя смысл и причинно-следственные связи. Понимание нового базируется на старых понятиях. Образное и символьное понимание дополняют друг друга. Филогенетические и онтогенетические программы реализуют понимающее поведение: первые – вида, вторые – индивида.

8. Понимающее поведение как поведение целесообразное: автоматическое (бессознательное) – видовое (генетический опыт) и индивидуальное (автоматизмы); осмысленное (осознанное) – индивидуальное, формируемое, например, в процессе обучения (самообучения).

- 9. Иерархическая категоризация воспринимаемого (по многим направлениям одновременно) как основа распознавания и понимания. Генетические основы базисных категорий. Влияние ожидания на восприятие.
- 10. Психические качества субъекта как вектор в психическом пространстве, создаваемом соответствующим базисом. Обоснование базисных элементов различных психических пространств и обеспечение их полноты как отдельная нерешенная задача.
- 11. Пространство, время, энергия как основные природные ресурсы. Эволюционное сохранение структур, минимизирующих их расходы для реализации требуемых функций. Принцип минимальности (ПМ) как один из основных природных принципов<sup>13</sup>.
- 12. Однородность структуры мозговой ткани на всех иерархических уровнях. Универсальность сигналов нервного возбуждения, но специфичность (различная модальность и интенсивность) формируемых ими ощущений как следствие их пространственно-временного возникновения (тип сенсоров и место их нахождения), передачи и поступления в мозговые структуры.
- 13. Древовидная иерархически-сетевая структура и пластичность мозговых структур. Пространственно-временные паттерны на входе и выходе узла. Жесткое электрическое соединение нейронов для постоянного филогенетического и временное химическое (посредством

специфических медиаторов) – для онтогенетического $^{14}$ .

- 14. Иерархия, рекурсия и фрактальность как механизмы одновременного и многократного использования одного и того же простого (как отдельных нейронов, так и нейронных структур) для создания различного сложного.
- 15. Мультимодальное интегрированное (неосознаваемое) динамическое восприятие на основе приоритета крутизны (производная во времени и градиент в пространстве) сигнала. Градиенты и производные как факторы самоорганизации. Структурирование как ограничение степеней свободы, как исключение ненужных из потенциально возможных связей между нейронами.
- 16. Ассоциативность восприятия, запоминания и вспоминания, мышления в целом на основе близости во времени и пространстве, понятийной и ситуационной близости, реализуемых посредством частичного перекрытия близлежащих нейронных структур.
- 17. Интеллект как инструмент психики, обеспечивающий целесообразное поведение организма, средство ее развития, приобретения дополнительно к видовому генетического индивидуального опыта. Проявляется как способность формировать и реализовывать новые эффективные алгоритмы поведения в новых и (или) старых условиях среды обитания, модель которой вместе с опытом хранится в памяти<sup>15</sup>.
- 18. Сознание как инструмент интеллекта, разрешающий противоречие между сложностью организма и его быстродействием, обеспечивающий целесообразное восприятие и, в целом, поведение с формированием новых, пополняющих опыт алгоритмов и автоматизмов (в том числе мыслительных), впоследствии реализуемых при наличии запускающего стимула без контроля сознания.
- 19. Внимание как механизм осознавания, сокращения всего воспринимаемого мозгом до осознаваемого значимого, как механизм «коллапсирования», сворачивания многовариантного возможного до единственного реального.
- 20. Основные действия организма, его поведение (в том числе и мышление) в своей основе рефлекторны. Рефлекторно настраиваются рецепторы, поддерживается гомеостаз, реализуются заученные последовательности движений, принимаются решения и др. Развитие процесс пополнения и усложнения рефлексов и автоматизмов поведения.



<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Частные проявления ПМ: принцип наименьшего действия Мопертюи, принцип инерции Галилея, электромагнитная инерция (правило Ленца), принцип Ле Шателье Брауна.

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Аналогия: стандартная электронная микросхема и ПЛИС.

<sup>15</sup> Интеллект – «сверхалгоритм по порождению алгоритмов».

- 21. Рефлексы и автоматизмы имеют иерархическую структуру и являются базовым способом реагирования на происходящее, демонстрируя ассоциативный (близость в пространстве и (или) времени) характер формирования и реализации. Любой организм содержит иерархическую систему автоматизмов, контролируемых рефлексами выживания. Автоматическое задействование автоматизмов как функциональных систем при наличии запускающего паттерна внешней среды.
- 22. Цель как системообразующий фактор. Процесс достижение цели поведения (действий) как реализация «терминального наведения».
- 23. Ключевая операция интеллекта распознавание: объекта, состояния, ситуации, процесса в настоящем, прошлом и, главное, в будущем. Любое распознавание имеет иерархическую природу и основано на одновременном понимании на нескольких иерархических уровнях.
- 24. Предвидение распознавание (предсказание) будущего как главное предназначение интеллекта имеет в своей основе повторяемость, цикличность происходящих процессов существования. Глубина интеллекта определяется глубиной предвидения.
- 25. Ассоциация и самоассоциация в пространстве-времени как механизмы распознавания при неполной информации.
- 26. Пространственно-временное существование и восприятие мира (пространство координата, расстояние, направление; время одновременность, последовательность, длительность) на основе пространственно-временной регистрации и анализа ощущений. Движение как пространственно-временная характеристика объектов, как их неотъемлемое свойство и условие правильного и экономичного восприятия.
- 27. Одновременное в мозгу строится из последовательного (одновременно воспринимаемая пространственная структура строится из последовательного временного ряда [2]). Настоящее некоторый промежуток времени от уже находящегося в прошлом до текущего момента времени. Величина этого промежутка носит видовой характер, конкретизируемый возможностями индивида 16.
- 28. Восходящие (сигнализирующие о частичном распознавании) и нисходящие (указывающие на наиболее вероятный образ) связи между нейронными модулями-распознавателями различных иерархических уровней.

- 29. Временная интеграция как условие появления и проявления сознания.
- 30. Прагматичность (экономичность) осознаваемого восприятия. В сознании формируются такие образы объектов внешнего мира, которые полезны для реализации текущего эффективного поведения в нем. Целесообразность восприятия (посредством внимания как механизма «отсечения» ненужного), его зависимость от ожидаемого: воспринимается и осознается то и так, что и как нужно сейчас, остальное игнорируется.
- 31. Интегрированность перцепта, объединение в нем всех его характеристик (пространственно-временных, модальных и интенсивностных).
- 32. Переход от сенсорного образа к перцептивному: выделение объекта из фона, его опознание, адекватное восприятие. Особая роль формы в организации перцептивного образа. Приоритет целого над частным при восприятии. Факторы объединения элементов в целое при восприятии: близость элементов друг к другу (в пространстве и времени), участие в создании замкнутых поверхностей и (или) симметричных форм, однородность, совместное перемещение в пространстве.
- 33. Инвариантность как результат обобщения признаков, учитывающая диапазонность существования свойств объектов<sup>17</sup>. Повышение полимодальности, обобщенности и степени инвариантности психического с ростом уровня иерархии.
- 34. Речь как интегратор человеческой психики, переводящий ее на уровень сознания.
- 35. Обязательность наличия контактной сенсорной оболочки на внешней поверхности тела, обеспечивающей отделение субъекта от объектов внешней среды.
- 36. Ощущения как регулятор движений и их специфичность, способность отражать как реально существующие качества объектов внешнего мира (например, их твердость или шероховатость), так и такие, которые формируются в мозгу (например, в процессе зрения мы видим предметы и их цвет, а не создающие эти образы электромагнитные поля). В мозгу информация о внешнем мире отображается наиболее полезным для выживания субъекта образом.
- 37. Особая роль осязания, представляющего первый опыт восприятия мира с формированием тактильных образов. Приоритетность роли тактильно-кинестетической модальности в развитии психики.
- <sup>16</sup> Сенсоры воспринимают и с большой частотой отправляют по одному и тому же каналу на обработку последовательный ряд «картинок», а мозг объединяет это все и с меньшей частотой отправляет в сознание обновляемую общую картину «настоящего». Временной интервал «настоящего» у человека составляет несколько секунд (в [7] говорится о 5 секундах).
  - <sup>17</sup> Например, вода является жидкостью при температуре в диапазоне от 0 до 100 градусов.



- 38. Язык как средство мышления и коммуникации. Начало мышления правильная постановка вопроса о непонимаемом. Сравнение, анализ, синтез, абстрагирование и обобщение, конкретизация как основные мыслительные операции. Понятия как результат взаимодействия представлений и суждений.
- 39. Мысленное оперирование объектами как реальное оперирование их образами, понятиями или символами. Мысль как иерархическая система.
- 40. Мышление как процесс взаимопереходов с языка образов разного уровня обобщенности на язык символов (речь). Предметное, образное и понятийное мышления.
- 41. Обобщенный ряд Фурье как универсальная модель структур и функций мозга, представления существующего (на текущем иерархическом уровне), формирования нового (с переходом на более высокий иерархический уровень), задания и реализации сложных действий. Любое новое по-иному (с иными весовыми коэффициентами) объединенное старое: новое рождается в результате установления новых отношений между старыми элементами. Обеспечение полноты базиса и задание коэффициентов базисных элементов.
- 42. Вероятностное принятие решений в условиях неполной информации на всех иерархических уровнях распознавания. Байесовский подход. Иерархические скрытые модели Маркова.
- 43. Социальное созревание как обязательное и параллельное дополнение созревания биологического. Подражание как способ социализации, приобретения опыта. Ускоренная социализация носителей ИИ в специальных образовательных учреждениях.
- 44. Диапазонность существования и пороговость (по амплитуде и по длительности) взаимодействия, трансформации, восприятия. Различие порогов осознаваемого и неосознаваемого восприятия (порог осознаваемого – выше). Влияние неосознанно воспринятого на сознательное принятие решений.
- 45. Память: образная, словесно-логическая, эмоциональная и двигательная. Вариативность траекторий достижения цели. Эмоции как оперативные реакции-оценки-настройки организма на текущую ситуацию.
- 46. Полярность и нечеткость для диапазонного представления качеств (свойств, признаков) объектов в условиях неопределенности.
- 47. Векторное квантование и вероятностная принадлежность как экономичное представления образов.
  - 48. Расширенная специфичная мультимодаль-

ность носителей ИИ под выполняемую функцию в конкретной среде функционирования.

- 49. Дружественность как генетическая загрузка ценностей, закрепленная воспитанием.
- 50. Соединение возможностей нейронных сетей глубокого обучения с символьным подходом (самоорганизации с логикой) эффективный путь создания обладающего пониманием настоящего ИИ. Универсальная технология интеллектуализации робототехники.

#### Литература

- 1. Сеченов И.М. Рефлексы головного мозга. СПб: Типография А. Головачева, 1866. 186 с.
- 2. Анохин П.К. Опережающее отражение действительности. // Вопросы философии, 1962. № 7.
- 3. Брунер Дж. Психология познания. За пределами непосредственной информации. Пер. с англ. М.: Прогресс, 1977. 413 с.
- 4. Дубровский Д.И. Проблема идеального. М.: Мысль, 1983. 228 с.
- 5. Розов А.И. (Розет И.М.) Проблемы категоризации: теория и практика // Вопросы психологии, 1986. №3. С.90-97.
- 6. Гаазе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А. От амебы до робота: модели поведения. М.: Наука. 1987.
- 7. Веккер Л.М. Психика и реальность. Единая теория психических процессов. М.: Смысл, 1998.
- 8. Бугаков И.А. Информация: появление, существование, восприятие // Датчики и системы: 2001. №2. С.41-47 часть 1; 2001. №3. С.61-68 часть 2.
- 9. Матурана У., Варело Ф. Древо познания. Биологические корни человеческого понимания. Пер. с англ. Ю.А. Данилова. М.: ПрогрессТрадиция, 2001. 224 с.
- 10. Хакен Г. Принципы работы головного мозга: Синергетический подход к активности мозга, поведению и когнитивной деятельности. М.: ПЕР СЭ, 2001. 351 с.
- 11. Лоренц Конрад. Оборотная сторона зеркала. Сборник трудов. // Пер. А.И. Фет, 2016. Philosophical arkiv, Sweden, 2016. 633 с.
- 12. Пенроуз Р. Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики: Пер. с англ. Общ. ред. В.О. Малышенко. М.: Едиториал, УРСС, 2003. 384 с.
- 13. Бугаков И.А. Обобщенный ряд Фурье как универсальный образ действия // Сборник трудов XXV Межрегиональной научно-технической конференции «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем», часть 2. Серпухов, 2006. С.261-267.
- 14. Хокинс Д., Блексли С. Об интеллекте: Пер. с англ. М.: ООО «И.д. Вильямс», 2007. 240 с.



- 15. Хомский Н. О природе и языке: Пер. с англ. М.: КомКнига, 2005. 288с.
- 16. Курцвейл Р. Эволюция разума / Пер. с англ. М.: Издательство «Э», 2015. 352 с.
- 17. Рамачандран В.С. Мозг рассказывает. Что делает нас людьми. Пер.с англ. М.: Карьера Пресс, 2012. 422 с.
- 18. Бугаков И.А. Принцип минимальности и деятельность мозга // Сб. научных трудов юбилейного симпозиума, посвященного 150-летию издания статьи И.М. Сеченова «Рефлексы головного мозга. М.: ИИнтелл, 2013. С.252-275.
- 19. Баррат Дж. Последнее изобретение человечества: Искусственный интеллект и конец эры HomoSapiens. Пер. с англ. М.: Альпина нон фикшн, 2015. 304с.
- 20. Бугаков И.А. Минимальность как «кредо» мозга //Нейрокомпьютеры. Разработка и применение, 2014. №4. С.13-15.
- 21. Бугаков И.А. Царьков А.Н. Базовая универсальная технология интеллектуализации ВВСТ: концептуальные идеи // Известия Института инженерной физики, 2015. №2(36). С.65-72.
- 22. Бугаков И.А. Базисные структуры интеллектуальной робототехники (бионический подход). Часть 1. Интеллект и поведение // Сборник трудов участников V Всероссийской научно-практической конференции «Современное непрерывное образование и инновационное развитие» // Под редакцией профессора А.Н. Царькова и профессора И.А. Бугакова. Серпухов: МОУ «ИИФ», 2015. С.102-109.
- 23. Бугаков А.И., Бугаков И.А., Котов А.А., Умников Е.В., Царьков А.Н. Принцип минимальности и интеллектуализация робототехники: на пути к универсальной технологии // Материалы Десятой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». Ростов-на Дону: Изд-во Южного федерального университета. 2015. Т.2. С.133-146. 24. Бугаков И.А. О необходимости разработки методологии, теории и универсальной технологии интеллектуализации робототехники военного и специального назначения // Труды военно-научной конференции «Роботизация ВС РФ». М., 2016. С.87-89.
- 25. Бугаков И.А., Царьков А.Н. Универсальная технология интеллектуализации робототехники: основания интеллектуального поведения // Материалы Одиннадцатой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». Ростов-на-Дону. Т.2, 2016. С.303-316.

- 26. Бугаков И.А. Базисный подход как универсальный механизм реализации поведения интеллектуальных антропоморфных роботов // Сб. трудов участников VI Всероссийской научнопрактической конференции «Современное непрерывное образование и инновационное развитие» // Под редакцией проф. А.Н. Царькова и проф. И.А. Бугакова. Серпухов: МОУ «ИИФ», 2016. С.135-138.
- 27. Бугаков И.А. Царьков А.Н. Интеллектуализация военной робототехники: терминологическая и технологическая проблемы // Известия Института инженерной физики, 2017. №3(45). С.87-93.
- 28. Бугаков И.А., Царьков А.Н. Искусственный интеллект в военной робототехнике: возможности, риски, пути реализации // Перспективные системы и задачи управления: материалы Двенадцатой Всероссийской научно-практической конференции. Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2017. С.250-260.
- 29. Бугаков И.А., Царьков А.Н. О когнитивном моделировании, искусственном интеллекте и психике роботов // Известия Института инженерной физики, 2018 №2(48). С.100-105.
- 30. Бугаков А.И., Бугаков И.А. Категоризация как основа восприятия в системах естественного и искусственного интеллекта. Сборник трудов участников VIII Всероссийской научно-практической конференции «Современное непрерывное образование и инновационное развитие» // Под редакцией проф. А.Н. Царькова и проф. И.А. Бугакова. Серпухов: МОУ «ИИФ», 2018. Т.1. С.150-157.
- 31. Бугаков И.А. О нервной системе и психике роботов // Сборник трудов участников VIII Всероссийской научно-практической конференции «Современное непрерывное образование и инновационное развитие» // Под редакцией проф. А.Н. Царькова и проф. И.А. Бугакова. Серпухов: МОУ «ИИФ», 2018. Т.1. С.158-171.
- 32. Бугаков И.А. Принцип минимальности и категоризация в естественном и искусственном интеллекте // Экстремальная робототехника и конверсионные тенденции. Труды Международной научно-технической конференции. СПб: 2018. С.380-385.
- 33. Бугаков И.А., Царьков А.Н. О «настоящем» искусственном интеллекте для освоения Арктики // Известия Института инженерной физики, 2019. №2(52). С.93-100.
- 34. Бугаков И.А. Как создать дружественный искусственный интеллект. // Известия Института инженерной физики, 2019, N04(54). С.116-121.



УДК 615.2, 615.31

К ВОПРОСУ ОБ АНТИОКСИДАНТНОЙ АКТИВНОСТИ ПРЕПАРАТА «ТАМЕРОН»

ON THE ANTIOXIDANT ACTIVITY OF THE DRUG "TAMERON"

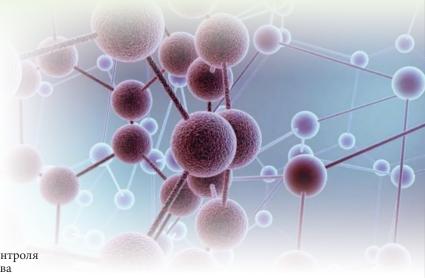


кандидат биологических наук заместитель начальника отдела контроля фармацевтической службы качества МОУ «ИИФ»

старший научный сотрудник Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН Адрес: 142210 Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: +7(4967) 35-31-93

E-mail: ao\_ermakovy@rambler.ru



Елена Александровна Царькова

советник Генерального директора АО «Столетика»

Адрес: 142210, Московская область, г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: +7 (4967) 12-84-88 E-mail: info@stoletika.ru

#### Аннотация

В статье проведены исследования прямой антиоксидантной активности препарата «ТАМЕРОН», который разработан на основе активной фармацевтической субстанции аминодигидрофталазиндион натрия. С помощью метода регистрации хемилюминисценции прибором Биотокс 10М было показано, что данное вещество способно в физиологических условиях взаимодействовать и нейтрализовать активные формы кислорода, которые являются индукторами воспалительных процессов и выработки провоспалительных цитокинов. Таким образом, препарат «ТАМЕРОН» можно рекомендовать для купирования быстротекущих и массированных воспалительных процессов при лечении острого респираторного дистресс-синдрома, вызванного коронавирусной инфекцией COVID-19.

**Ключевые слова:** «ТАМЕРОН», аминодигидрофталазиндин натрия, антиоксидант, активные формы кислорода, хемилюминесценция.

#### Summary

The article studies the direct antioxidant activity of the drug «TAMERON», which was developed on the basis of the active pharmaceutical substance aminodihydrophthalazinedione sodium salt. Using the method of registration of chemiluminescence with the Biotox 10M device, it was shown that this substance is capable of interacting under physiological conditions and neutralizing reactive oxygen species, which are inducers of inflammatory processes and the production of pro-inflammatory cytokines. Thus, the drug «TAMERON» can be recommended for the relief of rapid and massive inflammatory processes in the treatment of acute respiratory distress syndrome caused by coronavirus infection COVID-19.

**Keywords:** «TAMERON», aminodihydrophthalazindine sodium salt, antioxidant, reactive oxygen species, chemiluminescence.

В МОУ «Институт инженерной физики» с 2015 года ведется разработка новой лекарственной формы препарата в виде лиофилизата на основе аминодигидрофталазиндиона натрия под торговой маркой «ТАМЕРОН» [1,2]. Данный препарат обладает мощным иммунотропным действием, в частности регулирует биологическую активность иммунных клеток, нормализует избыточный синтез провоспалительных цитокинов – TNF- $\alpha$ , ИЛ-1, ИЛ-6 гиперактивированны-

ми макрофагами [3,4]. Как показывают исследования, все биологические свойства аминодигидрофталазиндиона натрия преимущественно связаны с его антиоксидантной активностью. Причем в литературе описывается механизм опосредованной активация антиоксидантных систем препаратом за счет стабилизации транскрипционного фактора Nrf2. Этот белок влияет на экспрессию генов, связанных с регуляцией окислительно-восстановительного баланса



клетки [5]. Но есть данные о том, что аминодигидрофталазигдион натрия способен быстро подавлять окислительный стресс, развиваемый макрофагами в модельных экспериментах [3]. Очевидно, что в данном случае захват активных форм кислорода (АФК) препарат осуществляет напрямую, путем химического взаимодействия с радикалами.

Поэтому целью данного исследования являлось изучение прямой антиоксидантной активности препарата «ТАМЕРОН» в биологическом образце – крови и плазме человека в норме и при воздействии индуктора окислительного стресса – пероксида водорода.

#### Материалы и методы

Работу выполняли на образцах крови, взятой и вены у здоровых доноров непосредственно перед экспериментом (общий объем – порядка 10 мл). В кровь, для предотвращения свертывания, добавляли антикоагулянт – натриевую соль ЭДТА (Sigma, США). Далее образец разделяли на 2 части (по 5 мл), одну из которых центрифугировали с помощью центрифуги MiniSpin (Eppendorf, Германия) при ускорении 5000g для отделения форменных элементов крови и получения плазмы крови. Образец крови перед измерением разбавляли физиологическим раствором (0,9% раствор хлорида натрия) в пропорции (кровь:физраствор) 1:3 для придания меньшей вязкости жидкости. В работе при измерении сигналов хемилюминесценции использовали 1 мл разбавленной крови или 1 мл плазмы крови. В качестве контрольного образца использовали 1 мл физраствора.

Раствор изучаемого препарата «ТАМЕРОН» готовили из образца опытной партии лекарственного средства, изготовленного на производственной площадке МОУ «Институт инженерной физики». Для этого содержимое флакона с препаратом растворяли в 1 мл дистиллированной воды. При измерении сигнала хемилюминесценции в исследуемый образец вносили 10 мкл препарата «ТАМЕРОН» (конечная концентрация около 0,01 мг/мл). Это обеспечивало концентрацию препарата, в которой он находится при введении в организм человека. Для моделирования условий окислительного стресса использовали пероксид водорода. Рабочий раствор пероксида водорода (Реахим, Россия) готовили путем разбавления 30% исходного раствора вещества в дистиллированной воде до финальной концентрации 3% (эта концентрация соответствует раствору с молярностью 1 М). Пероксид водорода из рабочего раствора вносили в образец в объеме 100 мкл, что обеспечивало его финальную концентрацию 100 мкМ. Эта концентрация пероксида водорода используется в биологических исследованиях в качестве индуктора окислительного стресса [6]. Для усиления эффекта генерации АФК пероксидом водорода использовали хлорид железа (II) (Реахим, Россия), который вносили в испытуемый образец в объеме 10 мкл (из исходного раствора в концентрации 1 М, приготовленного на дистиллированной воде) до финальной концентрации FeCl<sub>9</sub> 10 мкМ.

Для измерения хемилюминесценции аминодигидрофталазиндиона натрия использовали прибор «Биотокс 10М» (ООО «НЕРА-С», Россия). Данный прибор позволяет производить измерение слабого свечения (хемилюминесценции) с помощью фотоумножителя. Полученные данные записывали с помощью программы, прилагаемой к устройству.

Процедура измерения хемилюминесценции пробы осуществлялась следующим образом. Образец (физраствор, кровь или плазма крови) в стеклянной пробирке (прилагаемой к прибору) помещался в кюветное отделение и далее в течение 5 минут проводили запись количества импульсов в секунду. После этого последовательно в образец добавляли раствор препарата «ТАМЕРОН», раствор пероксида водорода и раствор хлорида железа. Для этого, не останавливая записи показаний с прибора, открывали кюветное отделение и в образец вносили 10 мкл препарата «ТАМЕРОН». Далее записывали сигнал хемилюминесценции в течение 5 мин, затем в образец вносили 100 мкл раствора пероксида водорода и продолжали запись сигнала еще 5 мин. В раствор на финальной стадии измерений вносили 10 мкл FeCl<sub>9</sub> и продолжали запись еще 5 мин. Каждую серию измерений проводили не менее 3-х раз. Обработку полученных результатов проводили с помощью программы Sigma Plot 10 (CIIIA).

#### Результаты и обсуждения

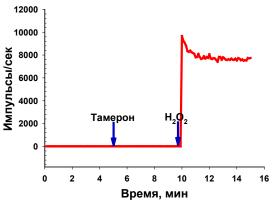
На рисунке 1 представлены типичные результаты измерения хемилюминесценции образца физиологического раствора. Видно, что сам по себе раствор и раствор после добавления препарата «ТАМЕРОН» не обладает способностью к хемилюминесценции. При добавлении пероксида водорода к этой смеси наблюдался резкий всплеск регистрируемого сигнала, который затем не затухал в течение длительного времени (вплоть до 20 мин наблюдений).

При изучении сигнала, поступающего от образца крови или плазмы, наблюдалась несколько другая картина (рисунки 2 и 3). Как видно из



рисунка 2, сам образец разбавленной крови человека не обладал регистрируемой прибором собственной хемилюминесценцией. Добавление препарата «ТАМЕРОН» не приводило к изменениям в интенсивности регистрируемого сигнала и в отличие от физиологического раствора, последующее внесение пероксида водорода также не сопровождалось сколь-нибудь значимыми изменениями в интенсивности наблюдаемого сигнала. Напротив, добавление хлорида железа (II) приводило к настолько интенсивным сигналам, что по сути это были предельно-измеряемые значения светового излучения фотоумножителем прибора.

Аналогичные результаты были получены и при изучении образцов плазмы крови человека (рисунок 3). Внесение препарата «ТАМЕРОН» и пероксида водорода в исследуемый образец плазмы крови не сопровождалось изменением сигнала. Образцы плазмы крови человека начи-



**Рис. 1.** Хемилюминесценция физиологического раствора, измеренная люминометром. Стрелками показано добавление препарата «ТАМЕРОН» (аминодигидрофталазиндиона натрия) и пероксида водорода (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

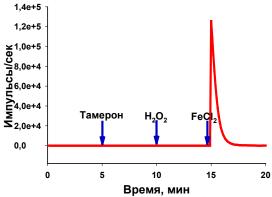
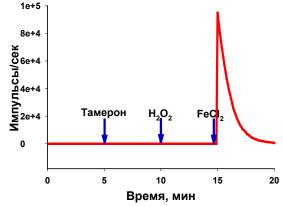


Рис. 2. Хемилюминесценция разбавленной физиологическим раствором крови человека, измеренная люминометром. Стрелками показано добавление препарата «ТАМЕРОН» (аминодигидрофталазиндиона натрия), пероксида водорода (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) и хлорида железа (II) (FeCl<sub>2</sub>)

нали испускать кванты света только после добавления хлорида железа (II).

Известно, что хемилюминесценция люминола обусловлена его химическим взаимодействием с АФК (рисунок 4) [7]. В частности депротонированный ион люминола в растворе взаимодействует с одно или двух электронным окислителем, что приводит к образованию радикала люминола. Далее он превращается либо в азахинон, который переходит в окисленное промежуточное перекисное соединение, или при взаимодействии с гидропероксильным радикалом, или при непосредственном взаимодействии с супероксид радикалом. Последнее вещество нестабильно и претерпевает превращение в 3-аминофталевый дианион, причем электроны здесь находятся в триплетном состоянии, которое затем переходит в синглетное состояние. Возвращение электронов 3-аминофталевого дианиона из возбужденного состояния в нормальное сопровождается испусканием квантов света с длиной волны 425 нм. Описанная реакция люминола широко используется в криминалистике для обнаружения следов крови, а также в качестве для обнаружения различных аналитов в люминометрических тест системах [8].

Важно отметить, что в случае люминола, реакция может происходить только в достаточно сильнощелочных условиях (при рН 8-10), которые клетке, межклеточной среде или крови не свойственны. Тогда как натриевая соль люминола, являющейся активной фармацевтической субстанцией препарата «ТАМЕРОН», способна диссоциировать с образованием аниона и при более низких значениях рН, близких к физиологическим. Из представленной схемы видно, что аминодигидрофталазиндион натрия напрямую взаимодействует с различными формами АФК.



**Рис. 3**. Хемилюминесценция плазмы крови человека, измеренная люминометром. Стрелками показано добавление препарата «ТАМЕРОН» (аминодигидрофталазиндиона натрия), пероксида водорода (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) и хлорида железа (II) (FeCl<sub>2</sub>)



Как показывают полученные в работе экспериментальные данные, в норме «ТАМЕРОН» в биологических жидкостях не проявляет реакционной способности, но при добавлении индуктора окислительного стресса - пероксида водорода, распад которого катализирован ионами двухвалентного железа (реакция Фентона), люминол натрия мгновенно вступает в химическую реакцию с выделением квантов света. Это указывает на то, что «ТАМЕРОН» может длительное время, не подвергаясь химическим изменениям, циркулировать в организме. При появлении же свободных АФК либо в локальных зонах (например, в очагах воспаления) или в системном кровотоке препарат способен их незамедлительно нейтрализовать. Стоит отметить, что «ТАМЕ-РОН» взаимодействует с наиболее токсичными для клетки радикалами – супероксид и гидропероксид анионами. Именно эти радикалы отвечают за дальнейшее развитие свободнорадикальной цепи и процессы перекисного окисления липидов мембран клеток, белков, других биологических структур и развитие окислительного стресса в целом [9].

#### Заключение

Таким образом, проведенные в работе экспериментальные исследования показывают, что помимо описываемых в литературе механизмов антиоксидантной активности аминдигидрофталазиндиона натрия за счет опосредованной регуляции им экспрессии генов системы антиоксидантной защиты он способен непосредственно

$$NH_2$$
  $NH_2$   $NH_2$ 

Рис. 4. Схема химического превращения люминола при взаимодействии со свободными радикалами (объяснение см. в тексте) [7]

участвовать в подавлении развития окислительного стресса. Учитывая химические свойства препарата «ТАМЕРОН», а также то, что ионизированая форма этого вещества способна образовываться и в физиологических условиях можно сделать вывод о том, что этот препарат способен напрямую, за счет химической реакции нейтрализовать активные формы кислорода, которые являются индукторами воспалительных процессов и выработки провоспалительных цитокинов. Это свойство препарата может быть важным для купирования быстротекущих и массированных воспалительных процессов. Например, «ТАМЕ-РОН» может с успехом применятся для лечения острого респираторного дистресс-синдрома, вызванного окислительным стрессом и цитокиновым штормом при тяжелом течении коронавирусной инфекции COVID-19.

#### Литература

- 1. Царьков А.Н., Царькова Е.А. Инновационный препарат «ТАМЕРОН» // Известия Института инженерной физики, 2019. №4(54). С.111-115. 2. Царьков А.Н., Краснова Ю.В., Царькова Е.А. Технология производства иммунотропного инновационного препарата «ТАМЕРОН» // Известия Института инженерной физики, 2020. №2(56). С.82-86.
- 3. Мрикаев Б.М. Разработка физико-химических, клеточных и молекулярных моделей изучения эффектов нового отечественного иммуномодулятора «Галавит» (Экспериментальное исследование): дисс. канд. мед. наук. М., 2005. 138 с.
- 4. Сологуб Т.В., Осиновец О.Ю. Применение иммуномодулирующего препарата «Галавит» в комплексной терапии гриппа // Клиницист, 2012. №2. С.76-81.
- 5. Scofield V.L., Yan M., Kuang X., Kim S.J., Wong P.K. The drug monosodium luminol (GVT) preserves crypt-villus epithelial organization and allows survival of intestinal T cells in mice infected with the ts1 retrovirus // Immunol Lett., 2009. 122(2). P.150-158.
- 6. Sies H. Hydrogen peroxide as a central redox signaling molecule in physiological oxidative stress: Oxidative eustress // Redox Biol., 2017. 11. P.613-619.
- 7. Barni F., Lewis S.W., Berti A., Miskelly G.M., Lago G. Forensic application of the luminol reaction as a presumptive test for latent blood detection // Talanta, 2007. 72(3). P.896-913.
- 8. Khan P., Idrees D., Moxley M.A., Corbett J.A., Ahmad F., von Figura G., Sly W.S., Waheed A., Hassan M.I. Luminol-based chemiluminescent signals: clinical and non-clinical application and future uses // Appl Biochem Biotechnol., 2014. 173(2). P.333-55. 9. Sies H., Berndt C., Jones D.P. Oxidative Stress // Annu Rev Biochem., 2017. 86. P.715-748.





**Alatortsev Alexey I.** Doctor of technical Sciences. Head of department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Alatortsev Igor I.** Vice-President of the Institute of Engineering Physics for General issues and social policy. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Atakishchev Oleg I.** Doctor of Technical Sciences, professor. Deputy General Director for Special Projects. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

**Bugakov Igor A.** Honoured devisor of Russia. Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation. Doctor of Technical Sciences, professor. Vice-President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Chernousov Maxim S.** Adjunct. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forse. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Deniskina Antonina R.** Candidate of Technical Sciences, associate Professor. FSBEI of HE MAI (NRU). Moscow, Volokolamsk Highway, 4.

Ermakov Artem M. Candidate of biological sciences. Deputy Head of the Control Department pharmaceutical quality service. Institute of Engineering Physics. Senior Researcher Institute for Theoretical and Experimental Biophysics RAS. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

**Fedorova Veronica A.** Candidate of Technical Sciences, associate Professor. Bauman Moscow State Technical University. Moscow, 2-nd Baumanskaya St., 5-1.

**Fedulin Andrei M.** Software Director, «KT – Robotics System» JSC. St. Petersburg, Maly prospect V.O., 54, bldg. 4, lit. P.

**Gudaev Roman A.** Candidate of Technical Sciences. Head of laboratory. Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

**Karane Maria Magdalina S.** Undergraduate of the Mathematics and Cybernetics Department «Moscow Aviation Institute» (National Research University) Moscow, Volokolamskoe shosse, 4.

**Kolyagina Irina A.** Student. Bauman Moscow State Technical University. Moscow, 2-nd Baumanskaya St., 5-1.

**Korobkov Alexey A.** Candidate of Technical Sciences, associate Professor, head of scientific and methodological Department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Kulik Maksim V.** Head of the Department of planning of scientific work and training of scientific and scientific-pedagogical personnel of the Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forse. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Kurguzov Valery V.** Lecturer. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Kuzin Alexander V.** Department head strategic weapons, space and special means, electronic components base Directorate of military representations of the RF Ministry of Defense. Moscow, Komsomolsky pr-t, 18, build. 3.

**Linets Gennadiy I.** Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor. Head of infocommunication department. North-Caucasus Federal University. Stavropol, Kulakova ave., 2a, build. 9.

**Mazin Anatoly V.** Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of «Information Security», Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

**Melnikov Sergey V.** Post-graduated student, department of infocommunication. North-Caucasus Federal University. Stavropol, Kulakova ave., 2a, build. 9.

**Miroshnichenko Pavel V.** Candidate of Technical Sciences, associate Professor. FSBEI of HE MAI (NRU). Moscow, Volokolamsk Highway, 4.

**Mukhin Anatoly I.** Candidate of Technical Sciences, lecturer. Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

**Nakonechny Boris M.** Candidate of Technical Sciences. Director. Department for the formation of the state defense order Government of the Russian Federation.

**Panteleev Andrei V.** Doctor of physical and mathematical sciences, professor. Head of the Department «Mathematical Cybernetics» FSBEI of HE «Moscow Aviation Institute» (National Research University). Moscow, Volokolamsk Highway, 4.

**Remizov Sergey L.** Candidate of Technical Sciences. Head of the Military Training Center. FGOBU VPO «Siberian State University telecommunications and informatics». Novosibirsk, st. Kirov, 86.





**Russak Dmitry A.** Student. Bauman Moscow State Technical University. Moscow, 2-nd Baumanskaya St., 5-1.

**Ryasniy Yuri V.** Doctor of Technical Sciences, Professor. Professor of the department of theory of electrical circuits. FGOBU VPO «Siberian State University telecommunications and informatics». Novosibirsk, st. Kirov, 86.

**Sadekov Rinat N.** Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Research Department, Military Innovative Technopolis «ERA». Krasnodar region, Anapa, Pioneer Ave., 28.

**Sergeev Stepan S.** Head of engineering calculation group, Public Joint Stock Company «Cryogenmash». Moscow region, Balashikha, Lenin Ave., 67.

**Shevchenko Vyatchaslav A.** Candidate of Technical Sciences. Head of Division – Deputy Head of the Main Directorate for the Development of Information and Telecommunication Technologies of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Moscow, Znamenka Str., 19.

**Shmyrin Evgeny V.** Candidate of Technical Sciences. Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Smirnov Anton N.** Adjunct. Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

**Smirnov Daniil N.** Engineer. Military Space Academy. A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

Smirnov Dmitriy V. Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, associate professor. Full member of the Academy of Engineering Sciences. Professor of the Department FSBEI of HE MAI (NRU). General director – First Vice-President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Smorodin Anatoly I.** Honorary worker of science and technology of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor. Professor of the E-4 Department of the Moscow state technical University N. E. Bauman. Moscow, st. 2-nd Baumanskaya, d. 5.

Smurov Sergey V. Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, professor. First Vice President of the Institute – Chief Designer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Stolbov Sergey N.** General manager. «Protyus» LLC. Moscow, Zelenograd, Shokin Square, 2, building 4.

**Tzar'kov Alexey N.** Honoured scientist of Russia, Doctor of Technical Sciences, professor. President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Tzar'kova Elena A.** CEO's councelor, JSC «Stoletika». Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Vasiliev Vladimir A.** Candidate of Technical Sciences. Senior Researcher. Military Academy of the Strategic Missile Forse. Moscow Reg., Balashikha, Karbysheva st., 8.

**Vershinin Evgeny V.** Candidate of Physical and Mathematical sciences, docent. Head of «Information processing systems» Department. Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

**Vershinin Vladislav E.** Graduate student. Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

**Volkov Gennadiy G.** Doctor of Physical and Mathematical sciences, professor. Senior Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Zakharov Vladimir L.** Doctor of Military Sciences, professor. Full member of the Academy of Military Sciences. Professor. FSBEI of HE MAI (NRU). Moscow, Volokolamsk Highway, 4.

**Zelenevsky Anatoly V.** Candidate of Technical Sciences. Deputy Head of Department. CJSC «Firm of Scientific and Technical Center «KAMI». Moscow, Heroes Panfilovtsev st., 10.

**Zelenevsky Vladimir V.** Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation Doctor of Technical Sciences, Professor, professor of the department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forse. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.





Редакционный совет и редакционная коллегия научно-технического журнала «Известия Института инженерной физики» придерживаются принятых международным сообществом принципов публикационной этики, отраженных, в частности, в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics).

Все статьи, предоставленные для публикации в журнале «Известия Института инженерной физики», проходят рецензирование на оригинальность, этичность и значимость. Соблюдение стандартов этического поведения важно для всех сторон, принимающих участие в публикации: авторов, редакторов журнала, рецензентов, издателя.

#### ОБЯЗАННОСТИ РЕДАКТОРА

#### Редактор в своей деятельности обязуется:

- постоянно совершенствовать журнал;
- следовать принципу свободы мнений;
- стремиться к удовлетворению потребностей читателей и авторов журнала;
- исключать влияние интересов бизнеса или политики на принятие решений об опубликовании материалов;
- принимать решения на основании принципа справедливости и беспристрастности, обеспечивать прозрачность редакционной деятельности на всех ее этапах;
- не раскрывать информацию о предоставленных материалах никому, кроме соответствующих авторов, рецензентов, других редакционных консультантов;
- оценивать рукописи исключительно по их научному содержанию;
- принимать решение о публикации материалов, руководствуясь следующими главными критериями: соответствие рукописи тематике журнала; актуальность, новизна и научная значимость представленной статьи; ясность изложения; достоверность результатов и законченность выводов. Качество исследования и его актуальность являются основой для решения о публикации;
- принимать меры для обеспечения высокого качества публикуемых материалов и защиты конфиденциальности персональной информации. При обнаружении содержательных, грамматических, стилистических и иных ошибок редакция обязуется предпринимать все меры для их устранения;
- обосновать свое решение в случае принятия или отклонения статьи;
- предоставить автору рецензируемого материала возможность для обоснования своей исследовательской позиции;
- поощрять дискуссии и предоставлять возможность для изложения точки зрения оппонентов;
- не использовать в собственных исследованиях информацию из неопубликованных материалов.

# ОБЯЗАННОСТИ ЧЛЕНОВ РЕДСОВЕТА (РЕДКОЛЛЕГИИ)

#### Решение о публикации.

Редсовет (редколлегия) журнала «Известия Института инженерной физики» являются ответственными за принятие решения о том, какие статьи будут опубликованы в журнале. Решение принимается на основании представляемых на статью рецензий

Редсовет (редколлегия) придерживаются политики журнала и действуют в рамках законных требований, поскольку несут ответственность за нарушение авторских прав.

# **ЭТИКА** НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

#### Конфиденциальность.

Рецензенты или кто-либо из сотрудников редакции не должны разглашать никакую информацию о предоставленной рукописи кому-либо, кроме самого автора, рецензентов, потенциальных рецензентов, членов редакционного совета (коллегии) и издателя, поскольку она является конфиденциальной.

#### Раскрытие информации и конфликт интересов.

Неопубликованные материалы, находящиеся в предоставленной статье, не должны быть использованы в собственном исследовании научного редактора и рецензентов без специального письменного разрешения автора.

#### ОБЯЗАННОСТИ РЕЦЕНЗЕНТОВ

Рецензенты оказывают помощь членам редакционного совета (редколлегии) при принятии редакционного решения, а также помогают автору усовершенствовать работу.

#### Конфиденциальность.

Любые рукописи, полученные для рецензирования, должны восприниматься как конфиденциальные документы. Они не могут быть показаны либо обговорены с другими лицами, кроме тех, которые уполномочены редакцией.

#### Подтверждение источников.

Рецензенты должны идентифицировать опубликованную работу, которая не была процитирована автором. Любое утверждение, что наблюдение, происхождение либо аргумент ранее были сообщены, необходимо сопровождать соответствующей ссылкой. Рецензент должен также донести до сведения редакции о любой существенной схожести или частичном совпадении между рукописью, которая рецензируется, и другой уже опубликованной работой, которая ему знакома.

#### Раскрытие информации и конфликт интересов.

Приватная информация или идеи, возникшие в процессе рецензирования, должны остаться конфиденциальными и не могут быть использованы в личных интересах. Рецензент не должен рассматривать рукопись, если имеет место конфликт интересов в результате его конкурентых, партнерских либо других отношений или связей с кем-либо из авторов, компаний или организаций, связанных с материалом публикации.

#### ОБЯЗАННОСТИ АВТОРОВ

#### Оригинальность и плагиат.

Авторы должны гарантировать, что они написали полностью оригинальную работу. Если авторы использовали работу и/или слова других авторов, это должно быть соответственно указано и процитировано.

#### Доступ к данным и сохранность.

Автор должен быть готов обеспечить доступ к данным, связанными с материалом публикации, если таковой возможен. Во всяком случае, автор должен быть готов сохранять такие данные на протяжении разумного периода времени после опубликования.

#### Многоразовая, избыточная или конкурирующая публикация.

Автор не должен публиковать работы, которые описывают по сути одно и то же исследование, более чем один раз или более чем в одном журнале.

Предоставление рукописи более чем в один журнал одновременно означает неэтичное издательское поведение и является недопустимым.



#### Подтверждение источников.

Необходимо предоставлять должное подтверждение работ других авторов. Авторы должны процитировать публикации, которые имели значение при создании заявленной работы.

#### Авторство материала.

Авторство необходимо ограничить теми лицами, которые внесли ощутимый вклад в концепцию, проект, исполнение или интерпретацию заявленной работы. Всех, кто внес ощутимый вклад, следует внести в список соавторов.

Автор должен гарантировать, что список авторов содержит только действительных авторов и в него не внесены те, кто не имеет отношения к данной работе, а также то, что все соавторы ознакомились и одобрили окончательную версию статьи и дали согласие на ее публикацию.

#### Раскрытие информации и конфликт интересов.

Все авторы должны сообщать, если в их работе имеется финансовый либо другой конфликт интересов, который может повлиять на результаты или интерпретацию их рукописи.

#### Ошибки в опубликованных работах.

Если автор обнаружит существенную ошибку или неточность в своей опубликованной работе, его обязанность - незамедлительно сообщить об этом в редакцию журнала или издателю и сотрудничать с редакцией при исправлении ошибок.

#### **НАРУШЕНИЯ**

При возникновении ситуации, связанной с нарушением публикационной этики со стороны редактора, автора или рецензента, требуется ее обязательное рассмотрение. Редакционный совет (редколлегия) обязана потребовать разъяснения, без привлечения лиц, которые могут иметь конфликт интересов с одной из сторон.

Если материал, содержащий значительные неточности, был опубликован, он должен быть незамедлительно исправлен в форме, доступной для читателей и систем индексирования.

# ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕИ

Для публикации принимаются статьи на русском языке. Рекомендуемый объем статьи – 0,2-0,4 п.л. (8000-16000 знаков).

**Тексты** должны быть представлены:

О в электронном виде (Word 2003). Иллюстративный материал (сложные формулы, рисунки, фотографии и т.д.) кроме размещения в тексте обязательно должны предоставляться отдельными файлами!

на бумажном носителе формата A4.

Текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала (гарнитура «Times New Roman»), кегль 14.

Простые символы и формулы не набирать в математическом редакторе!

Напечатанный текст должен иметь поля: верхнее и левое – 2,5 см, правое и нижнее – 2 см.

Вверху первой страницы статьи размещаются:

- О рубрика журнала (см. *Приложение 1*); О УДК;
- О название статьи с переводом на английский язык;
- О имя, отчество, фамилия автора (авторов), ученая степень, ученое звание, должность и место работы.

Список литературы (Литература) размещается в конце статьи.

После литературы помещаются:

О список ключевых слов, краткая аннотация (на русском и английском языках).

Завершает рукопись полная информация об авторе (авторах):

О ФИО:

О ученая степень, ученое звание, должность и место работы с переводом на английский язык;

О адрес места работы, контактные телефоны, электронный адрес (по желанию автора – домашний адрес

#### Обращаем особое внимание на:

О точность и правильность библиографического оформления списка литературы (в соответствии с ΓΟCT P 7.0.5-2008);

О выверенность статьи в компьютерном наборе;

О полное соответствие файла на электронном носителе и бумажного варианта.

Редакционная коллегия оставляет за собой право на редактирование статей, при этом с точки зрения научного содержания авторский вариант сохраняется.



Статьи, не принятые к публикации, не возвращаются. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается!

#### Приложение 1

#### РУБРИКАЦИЯ ЖУРНАЛА «Известия Института инженерной физики»

#### Постоянные рубрики

- Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы.
- Радиотехника и связь.
- Информатика, вычислительная техника и управление.

#### Разовые рубрики

- Техника специального назначения.
- Инновационные проекты.
- Техническое регулирование.
- Профессиональное образование.
- Искусственный интеллект и робототехника.
- Медицина и фармацевтика.
- Диагностические системы.
- Научные обзоры. Научные рецензии. Отзывы.

В соответствии с Решением Межведомственной комиссии РФ по защите государственной тайны №69 от 26 февраля 2001 г., требованиями законов №5485-1 «О государственной тайне» от 21 июля 1993 г., №149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и защите информации» от 27 июля 2006 г. статьи для публикации принимаются только при наличии экспертного заключения с разрешением на открытое опубликование.





# INTERREGIONAL PUBLIC INSTITUTION "INSTITUTE OF ENGINEERING PHYSICS"

(SCIENTIFIC, EDUCATIONAL AND INDUSTRIAL INSTITUTION)

#### **CONTENTS**

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND SYSTEMS	INFORMATION SCIENCE, COMPUTING AND MANAGEMENT
Smorodin A.I., Sergeev S.S., Kulik M.V., Korobkov A.A.	Vershinin V.E., Vershinin E.V., Mazin A.V.
Scientific-methodical apparatus for calculating the expander-compressor unit of the structural-technological scheme of the adsorption-cryogenic installation	Use of basic recursive units to provide a high level of recursion parallelism 69 Fedorova V.A., Kolyagina I.A., Russak D.A.
Smirnov D.V., Alatortsev I.I., Alatortsev A.I.	Concepts and implementation of the Operational Security Center
Features of parametric synthesis of piecewise continuous programs of the pitch angle of the spacecraft on the active part of the trajectory taking into account the time pauses between the operation of the propulsion systems	Parametric synthesis of optimal program control based on the spectral method and multi-agent optimization algorithms
of its stages	Fedulin A.M., Sadekov R.N.
	Algorithm for unmanned aerial vehicles navigation based on the location of ai defense equipment
RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION	Smurov S.V., Volkov G.G., Stolbov S.N., Tzar'kov A.N.
Zelenevsky V.V., Zelenevsky A.V., Kurguzov V.V., Chernousov M.S., Nakonechny B.M.	New symmetries of multidimensional geometry in quantum physics and quantum information
Statistical analysis and methods for evaluating the reliability of radio channels for noise immunity in the presence of signal fading	quartam mornation
Zelenevsky V.V., Zelenevsky A.V., Shmyrin E.V., Chernousov M.S.	ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND ROBOTICS
Noise immunity of encoded data transmission systems with an extended radio	Bugakov I.A.
signal spectrum	From deep learning to deep understanding95
Atakishchev O.I., Mukhin A.I., Smirnov A.N., Smirnov D.N.	
Methods for detecting changes in the operation modes of the REM when processing the results of remote sensing Earth23	MODERN MEDICINE AND PHARMACEUTICS
Linets G.I., Melnikov S.V.	Ermakov A.M., Tzar'kova E.A.
Optimization of classification thresholds for the state of transionospheric communication channels described by the Nakagami distribution	On the antioxidant activity of the drug «TAMERON»
Ryasniy Y.V., Remizov S.L.	AUTHORS
Modeling the transfer function of telecommunication devices by a recursive discrete circuit based on the working function	THE ETHICS OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS109
Shevchenko V.A.	REQUIREMENTS TO AUTHORS110
A union bound on error probability in the communication channel under the influence of random impulse noise and block fading	
Zakharov V.L., Smirnov D.V., Deniskina A.R., Miroshnichenko P.V.	
Current status and development prospects of domestic space communication systems	
Atakishchev O.I., Gudaev R.A., Mukhin A.I., Kuzin A.V.	
The technique of identifying informative regions of spectral portraits of emitting	

objects and determining weighting coefficients in the interests of solving the

Methodology for calculating the maximum range of a radar station for detecting 

recognition problem ...

Zakharov V.L., Smirnov D.V., Vasiliev V.A.

л. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а. Тел: +7(4967)35-31-93, 35-13-71 Факс: +7(4967)35-44-20 http://www.iifrf.ru E-mail: info@iifmail.ru



Межрегиональное общественное учреждение

«Институт инженерной физики»

(МОУ «ИИФ»)

научное, образовательное и производственное учреждение