

№ 1 +0
2021 [59]

ИЗВЕСТИЯ

научно-технический журнал
ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ



8 февраля

День российской науки



ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- 2 Коломбет В.А., Лесных В.Н., Елистратов А.В.**
Спектр универсальной системы утраивающихся периодов в оптической области
- 8 Устинов В.В.**
Методика выбора цифровой карты для коррекции системы наземной навигации по характерным точкам автомобильных дорог
- 12 Нижниковский Е.А., Вологодина А.А., Деменков М.Ю., Григорьев А.И., Салько А.Е.**
Использование перовскитных структур в фотоэлектрохимических преобразователях
- 17 Хаматов А.А., Широков С.Е., Дубинин Д.П.**
К вопросу ликвидации последствий вооруженных конфликтов с использованием робототехнических систем
- 20 Захаров В.Л., Смирнов Д.В., Казаков Р.Р.**
Модель закона распределения координат точек падения отделяющихся частей перспективных средств выведения

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

- 24 Розганов М.В., Бродский М.С., Уткин Д.Р.**
Обоснование технических требований к земным станциям спутниковых связных комплексов на основе модели функционирования активных фазированных антенных решеток
- 29 Выкрест А.Ю., Батенков К.А., Катков О.Н., Афанасьев А.А.**
Анализ прохождения сигналов по фантомной линии
- 33 Зеленевский В.В., Черноусов М.С., Зеленевский Ю.В., Зеленевский А.В., Егоров В.В.**
Методика оценки энергетической эффективности двоичных сверточных и блочных кодов при мягком и жестком декодировании
- 38 Козориз Д.А.**
Исследование доступности системы связи при сетевом варианте ее построения

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- 42 Квашенников В.В.**
Сравнительный анализ запоминания информации в биологических системах и в устройствах электронной памяти
- 48 Бут Г.С., Сеницын С.В.**
Математическое моделирование процесса аккумуляции тепловой энергии в системах управления оборотным водоснабжением предприятий
- 53 Вершинин Е.В., Лаковщиков И.В., Никулин А.С.**
Применение логистической регрессии для задачи бинарной классификации текстов
- 56 Петрин Д.А., Гришунов С.С., Белов Ю.С.**
Улучшение качества моделей машинного обучения в задачах классификации изображений на основе метода аугментации данных

- 61 Вершинин Е.В., Ткаченко А.В., Гуркина Е.Д.**
Разработка модели прогнозирования сердечно-сосудистых заболеваний с использованием ИНС
- 66 Умников Е.В., Атакищев О.И., Ванюшин В.М., Грачёв В.А.**
Особенности обеспечения информационной безопасности при моделировании РТК с помощью виртуального полигона
- 73 Волков Г.Г., Смуров С.В., Царьков А.Н.**
О проективных алгебраических многообразиях в торической геометрии и квантовой физике
- 87 Захаров В.Л., Смирнов Д.В., Бурмистров В.В., Миронов В.И.**
Алгоритм расчета импульсной программы автономного управления сближением космического робота с орбитальным объектом за заданное время

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

- 92 Антохин Е.А.**
Проблемные вопросы реализации группового применения наземных робототехнических комплексов военного назначения

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

- 98 Тищенко В.Н., Руг А.В., Грачёв В.А., Умников Е.В.**
Проблемы повышения эффективности подготовки (переподготовки) специалистов для ВС РФ и предприятий ОПК в условиях изменяющихся подходов в организации прохождения военной службы

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ • НАУЧНЫЕ РЕЦЕНЗИИ • ОТЗЫВЫ

- 103 Лесных В.В.**
Теорема Пифагора. Ретроспектива формирования доказательства

105 AUTHORS

107 ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

108 ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ

Научно-технический журнал

ИЗВЕСТИЯ Института инженерной физики №1 (59) 2021

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 ЦНИИ МО РФ»
заслуженный деятель науки РФ, заслуженный
изобретатель РФ, лауреат Государственной
премии РФ, лауреат премии Правительства РФ,
доктор технических наук, профессор

Сергей Владимирович Дворянин
начальник департамента Государственной
корпорации «РОСТЕХ» 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 Шерemet

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 Зеленецкий
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



Сергей Владимирович Смуров

Первый Вице-президент МОУ «ИИФ» –
Главный конструктор
почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, профессор

Дорогие друзья, уважаемые коллеги и партнеры!

День российской науки, который мы отмечаем 8 февраля – это прекрасный повод привлечь внимание общественности, деловых кругов, молодежи, обучающихся к огромным возможностям науки.

Во все времена наука являлась мощным ресурсом экономических преобразований, важнейшей составляющей национального богатства, движущей силой технического прогресса.

Российская наука имеет замечательную историю. Выдающиеся российские ученые способствовали прогрессу во всех сферах нашей жизни, чем заслужили широкую известность и признание мировой общественности.

Среди основных направлений фундаментальных исследований – актуальные проблемы оптики и лазерной физики; вопросы системного анализа сложных технических систем и рисков их эксплуатации, а также информационной безопасности и технологий ее обеспечения с использованием компьютерных, инструментальных и квантовых технологий обработки информации, новые задачи в астрономо-геодезическом, навигационном и геоинформационном обеспечении, системный анализ и искусственный интеллект в контурах управления потенциально-опасными объектами; современные проблемы создания защищенных телекоммуникационных информационно-аналитических систем; химические проблемы создания фармакологически активных веществ нового поколения.

В России всегда было достаточно людей, для которых заниматься серьезной наукой – настоящее призвание.

Современное поколение научных деятелей Межрегионального общественного учреждения «Институт инженерной физики» без малого 28 лет успешно продолжает славные традиции своих предшественников. Наши ученые отличаются изобретательностью, трудолюбием, целеустремленностью.

Всех, кто давно служит науке, и кто только вступает на этот нелегкий путь, хочется поздравить с профессиональным праздником – Днем российской науки! Желаю и в дальнейшем дарить обществу свои удивительные открытия и восхищать великими достижениями!

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК: 53.023; 53.06; 159.953;
514.8; 628.971; 628.972

СПЕКТР УНИВЕРСАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УТРАИВАЮЩИХСЯ ПЕРИОДОВ В ОПТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ

SPECTRUM OF UNIVERSAL PERIOD-TRIPLING SYSTEM IN OPTICAL REGION



Валерий Александрович Коломбет
кандидат физико-математических наук
заведующий лабораторией
Институт теоретической
и экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел.: +7(4967)73-94-64
E-mail: kolombet@iteb.ru

Вадим Николаевич Лесных
младший научный сотрудник
Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел.: +7(4967)73-94-64
E-mail: 1253vadim@mail.ru

Александр Владимирович Елистратов
ведущий инженер
Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел.: +7(4967)73-94-64
E-mail: unenlagia@yandex.ru

Аннотация

Статья посвящена обсуждению результата эволюционной подстройки фотоприемников сетчатки глаза человека к частотам УСУП (т.н. универсальной системы утраивающихся периодов). Это достаточно новое научное направление в исследовании сложных систем. В статье предлагается исследователям вопросов зрительного восприятия, ознакомиться с феноменом УСУП. К настоящему моменту накоплен экспериментальный исследовательский материал и получены достаточные теоретические основания для формулировки предположения, что УСУП и ее основной параметр $T_{k,m}$ проявляются практически во всех масштабах. Значения $T_{k,m}$ с большой точностью описаны посредством эмпирической формулы. В зрении человека УСУП проявляется в форме девяти периодов $T_{k,m}$, отвечающих случаям $m=-11, -8, -5, -3, 0, 3, 5, 8$ и 11 , где доминируют пять центральных: $-5, -3, 0, 3$ и 5 , отвечающие палочкам, а также В- и R-колбочкам. К G-колбочкам и к клеткам *ipRGC*, которые отвечают крайним, «ослабленным» значениям индекса $m=-11, -8, 8$ и 11 , остаются некоторые вопросы. Определение предлагаемых расчетных значений длин волн света, соответствующих максимумам спектральной чувствительности фотоприемников сетчатки глаза, важно для специалистов в области зрительного восприятия, медицины, оптики, а также при применениях в ряде технических приложений.

Ключевые слова: окно прозрачности атмосферы, сетчатка глаза, фотоприемники, спектральная чувствительность, универсальная система утраивающихся периодов.

Summary

The article is devoted to the discussion of the evolutionary adjustment of photodetectors of the human retina to the frequencies of the UPTS (the so-called the universal period-tripling system). This is a fairly new scientific direction in the study of complex systems. In this article, lighting engineers who study the issues of visual perception are invited to get acquainted with the phenomenon of the UPTS. To date, experimental research material has already been accumulated and sufficient theoretical grounds have been obtained for the formulation of the assumption that the UPTS and its main parameter $T_{k,m}$ are manifested in almost all scales. The values of $T_{k,m}$ are described with great accuracy by means of the empirical Puetz's formula. In human vision, the UPTS manifests itself in the form of nine periods, $T_{k,m}$ corresponding to the cases of $m=-11, -8, -5, -3, 0, 3, 5, 8$ and 11 , where the five central ones dominate: $-5, -3, 0, 3$ and 5 , corresponding to the rods, as well as B- and R-cones. Some questions remain about G-cones and *ipRGC*-cells, which respond to the extreme, «weakened» values of the index $m=-11, -8, 8$ and 11 . Determining the exact values of light wavelengths corresponding to the maxima of spectral sensitivity of retinal photodetectors is important for specialists in the field of visual perception, medicine, optics, as well as for applications in a number of technical systems.

Keywords: atmospheric transparency window, retina, photodetectors, spectral sensitivity, universal period-tripling system.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Введение

Сегодня проявляется значительный интерес к использованию в технических, биологических, социальных, геофизических, астрофизических и иных приложениях ранее не учитывавшегося подхода, основанного на использовании свойств фракталов – специфических объектов, обладающих свойством математической инвариантности. В частности, это так называемая универсальная система утраивающихся периодов (УСУП) [1,2], к которой мы обратились с начала 2015 года, опираясь на работы [1-4]. Согласно идеям применения УСУП [2,3] С.Петца (*Stephen Joseph Puetz*) и его соавторов [4-7], значения этих периодов задаются эмпирической формулой:

$$T_{k,m}/T_0 = 3^k/2^m.$$

Здесь период $T_0 = 114,6$ лет, параметр $m = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$, а целочисленный параметр k , как можно предположить из наших работ, принимает значения в интервале приблизительно от -110 до +15 (см. [1-11]).

Физический смысл эмпирических индексов k и m можно интерпретировать лишь в рамках соответствующей физической модели. Материала, накопленного по теме УСУП, достаточно для того, чтобы построить пару таких моделей. Первая основывается на гипотезе, что утроения возникают в ставшим уже тривиальным сценарии перехода к хаосу через каскад бифуркаций [12]; в статье [13] математическая основа сценария утроений представлена достаточно подробно. Однако, нами выбрана другая модель, где рассматривается сценарий активности дискретного самовоспроизводящегося автомата [14], возникшего спонтанно в ультра-микромасштабе и проявившего себя в том, что он утраивает периоды. Эта гипотеза о природе УСУП изложена в работе [11]: мы предположили, что УСУП является одним из частных следствий работы автомата, формирующего при этом известный фрактальный объект – треугольник Серпинского [15] с фрактальной размерностью 1,585. Этот утраивающийся автомат получил название трипликатора. Его активность является близким аналогом активности биосферы; главное отличие УСУП

от нее состоит в смене автомата-дубликатора на автомат-трипликатор, причем, если дубликатор работает в молекулярном хаосе при температуре, близкой к комнатной, то гипотетический ультра-микро-масштабный трипликатор должен работать в хаосе т.н. околопланковской температуры. Общность картины проявлений УСУП в наблюдаемом широком диапазоне масштабов предполагает особую фундаментальность (и в то же время в некотором плане почти тривиальность) физики этого феномена. В этом сценарии параметр m характеризует характер и количество мутаций накопившихся ходе работы автомата.

На рисунке 1 приведены серии обнаруженных периодов УСУП при $m=0$ и $m=1$, т.е. при минимуме мутаций. Это:

a – область периодов $T_{k,m}$ «темпорального фрактала» Петца [1,2], ограниченная сверху космологическими масштабами, а снизу, по меньшей мере, периодами приблизительно равными 50÷60 лет;

b – область экспериментально найденных в Институте биологической физики РАН около 40 лет назад колебаний характерных времен эффективности работы памяти человека [8, 9];

и серия недавно найденных нами в ИТЭБ РАН областей более коротких периодов [11, 16-22], а именно:

c – периодов, выявленных при исследовании слуха человека;

d – периодов, используемых в физиотерапии;

e – периодов, к которым тяготеют тактовые частоты компьютерных процессоров;

f – периода, на который настроено сумеречное (палочковое) зрение человека.

Таким образом, в наших первых работах, совпавших с заключительной фазой начального этапа исследований С.Петца [3] и С.Петца с соавторами [6,7], были описаны фрагменты УСУП в области существенно меньших периодов (т.е. меньших значений k), чем исходные периоды УСУП астрономических масштабов, заявленные группой С.Петца в работе [6].

Принципиальное сходство периодов УСУП в

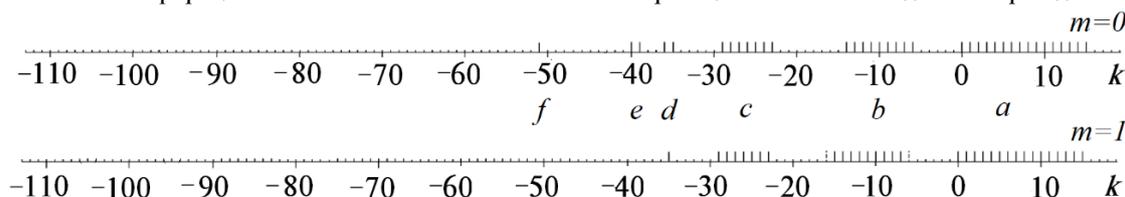


Рис. 1. Значения периодов УСУП, найденные различными группами исследователей для частных значений параметра $m=0$ и 1 в области от $\sim 10^{-15}$ сек до $\sim 10^{15}$ сек. В пионерской работе [6] периоду 114,6 лет присвоены значения $k=0$ и $m=0$, т.е. $T_{0,0} = 114,6$ лет, а серия с параметрами $k=0$ и $m=1$ начинается с $T_{0,1} = 57,3$ лет, т.е. значения вдвое меньше соответствующих периодов, попавших на верхнюю шкалу. В этой статье мы иллюстрируем ниже существование также и других шкал, в том числе шкал с отрицательными значениями индекса m

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

самых различных диапазонах позволило, изучая свойства любой области этих периодов, строить предположения о свойствах процессов в других, в том числе в сильно удаленных областях периодов [5-11, 16-20].

Целью этой работы является демонстрация практического совпадения длин волн в максимумах спектральной чувствительности фотоприемников сетчатки, сформировавшихся в процессе эволюционного развития человека, с длинами волн, полученными по формуле С.Петца. Этим мы также иллюстрируем универсальный характер УСУП, возможности ее использования в широком диапазоне применений.

В научном и практическом плане результаты этой работы могут служить основой для теоретического обоснования достоверности и, возможно, уточнения используемых в настоящее время значений длин волн в максимумах функций, описывающих спектральные характеристики фоторецепторов сетчатки.

Результаты

Общепринятые, используемые в настоящее время и введенные в нормативные документы Международной комиссии по освещению (CIE) значения длин волн λ_{max} , соответствующих максимумам спектральной чувствительности R- и G-колбочек, палочек и B-колбочек составляют ~590 нм, ~545 нм, ~505 нм, ~445 нм [21]. Для B-колбочек в литературе, (в частности, в Википедии, ссылающейся на высокорейтинговый научный источник), встречается также резко отличающееся значение ~420 нм. Палочки и колбочки содержат, соответственно, родопсин и тройку его эволюционных потомков – три йодопсина. Содержащие меланопсин клетки *ipRGC* имеют значения λ_{max} , по разным источникам лежащие в окрестностях 465 нм и 481 нм [22]. По одним данным клетки *ipRGC* составляют 1÷2 процента от всех нервных клеток сетчатки, по другим источникам их в сетчатке всего ~2000 шт.

В филогенезе глаз человека подвергался воздействию солнечного излучения в спектральной области, соответствующей спектру излучения Солнца (это излучение черного тела), изменяющемуся в соответствии с изменениями термодинамической температуры излучения в диапазоне от 5480 К до 5780 К и распространяющегося в спектральном окне прозрачности атмосферы (300 нм $<\lambda < 1200$ нм). В качестве примера на рисунке 2 показан фрагмент спектра поглощения оптического излучения наиболее активной поглощающей компоненты земной атмосферы – парами воды и аэрозолями, образованными с водой [23-25]. Вклад иных компонент земной ат-

мосферы (азота, кислорода и углекислого газа) в видимой области пренебрежимо мал.

Пары частот УСУП при $m=0$ и 1 (пары наиболее важных линии спектра УСУП) располагаются, в частности, в области, приходящейся на спектральное окно прозрачности атмосферы. В центр области оптического спектра попадает частота $1/T_{-51;0}$ и соответствующая ей длина волны $\lambda_{max} = 503,5$ нм. Значению $T_{-50;1}$ отвечает длина волны 755 нм, находящаяся уже вне видимого диапазона оптического спектра. Таким образом, в центре видимой области оптического спектра находится период $T_{-51;0}$, соответствующий длине волны $\lambda_{max} = 503,5$ нм.

Обнаруженная настройка максимума чувствительности палочкового аппарата сетчатки глаза на эту частоту УСУП означает, что возможные изменения положения максимума интенсивности в спектре излучения Солнца и положение окна прозрачности атмосферы (рисунком 2) определили в ходе эволюции лишь грубую настройку спектральной чувствительности палочек сетчатки глаза человека с максимумом чувствительности $\lambda_{max} \approx 505$ нм, а более тонкую настройку задает частота УСУП $1/T_{-51;0}$ с длиной волны около $\lambda_{max} = 503,5$ нм. Спектральные линии УСУП с другими небольшими абсолютными величинами индекса m будут представлены далее на рисунке 3 и в таблице 1.

В наших работах [26,27] уже показано, что максимумы длин волн λ_{max} спектральной чувствительности фотоприемников глаза человека, рекомендованные в настоящее время к широ-

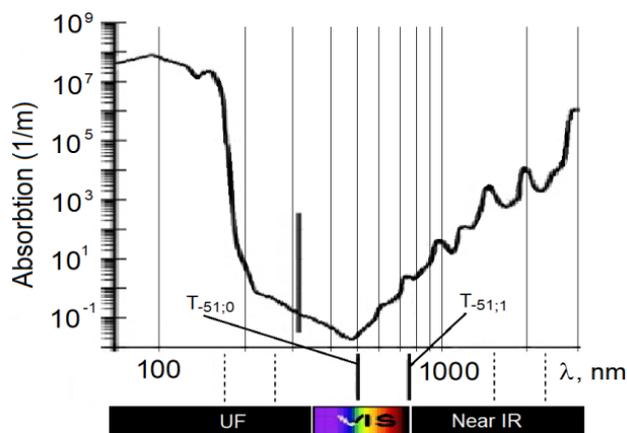


Рис. 2. Положение оптического спектра (VIS) и его близких окрестностей в спектральном окне прозрачности атмосферы (по [23]). Вертикальная черта в окрестности 300 нм показывает верхнюю границу поглощения ультрафиолета озоном атмосферы. Вдоль горизонтальной оси изображены пары длин волн, отвечающие $m=0$ и 1, при $k=-52$ (в ультрафиолете), -51 (в видимой области) и -50 (в ближнем инфракрасном диапазоне). В центре оптического спектра расположен свет с периодом УСУП $T_{-51;0}$

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

кому использованию, достаточно близки к значениям λ , вычисленным на базе УСУП. В этой статье мы дополнительно учли область отрицательных значений индекса m , обнаруженную нами относительно недавно. Это значительно уточнило предсказания спектра значений λ_{max} в зрении человека.

Если раньше положения λ_{max} определялись с неизбежной экспериментальной погрешностью, то при использовании нашего подхода положения максимумов вычисляются с большей точностью по формуле для $T_{k,m}$. В целом малость отличий предсказанных с помощью УСУП значений λ от экспериментальных λ_{max} фотоприемников сетчатки (см. рисунок 3 и таблицу 1) позволяет предположить, что эти отличия в значениях λ_{max} являются следствием погрешности экспериментов и вариабельности индивидуальных свойств зрения испытуемых. Эти отличия могут быть частично устранены в процессе дальнейших исследований спектральных характеристик глаза.

На рисунке 3, построенном в координатах «длина волны света λ – параметр m формулы

Петца», приведены значения λ , полученные по формуле для $T_{k,m}$. Затем в таблице мы сравним с этими значениями λ значения длин волн в максимумах спектральной чувствительности фотоприемников сетчатки, т.е. используемые в настоящее время значения λ_{max} .

Из таблицы видно, что рассогласование экспериментальных и расчетных значений λ_{max} слегка увеличивается к краям оптического диапазона, что естественно. Наилучшее совпадение достигается в ультрамариновой, голубой и синей областях. Отклонение, которое выглядит несколько аномальным, приходится на область зеленого цвета. Возможно, это т.н. эффект желтого пятна, иногда упоминающийся в специальной литературе.

Известно (см. работы [28,29]), что функция спектральной чувствительности светочувствительных клеток *ipRGC* представляет собой функцию относительной спектральной циркадианной эффективности, образованную путем суперпозиции функций спектральной чувствительности палочек и известных *B*-колбочек сетчатки.

Таблица 1

Сравнение рекомендованных экспериментальных и предлагаемых расчетных значений максимумов спектральной чувствительности λ_{max} фоточувствительных клеток глаза человека

Период, сек на рисунке 3	0,875	0,922	0,971	0,984	1,037	1,092	1,107	1,167	1,229
Индекс m на рисунке 3	5	-3	-11	8	0	-8	11	3	-5
λ_{max} , нм по Петцу	425	448	471	478	503,5	530	538	567	597
Средние по дублетам λ_{max}			474			534		582	
Опыт, нм	~420	~445	~465	~481	~505	~545		~590	
$\Delta \lambda_{max}$, нм	~-5	~-3	~-3		~1,5	~11		~8	

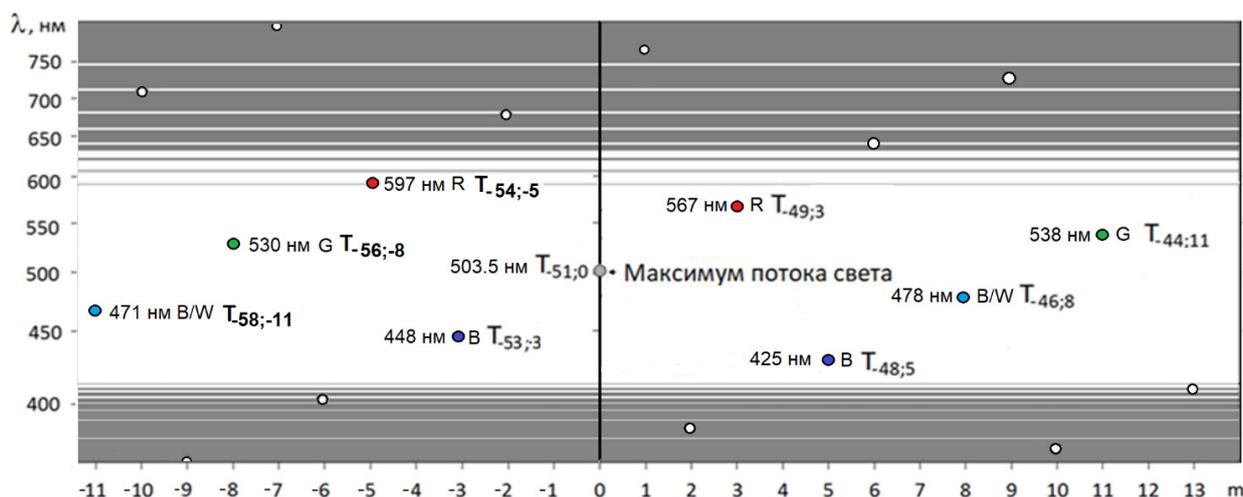


Рис. 3. Предполагаемые значения максимумов спектральной чувствительности всех вариантов фотоприемников глаза человека λ_{max} , вычисленные по формуле для самых важных периодов $T_{k,m}$, попавших в оптический диапазон длин волн. По вертикальной оси – длина волны. По горизонтальной – параметр m , отвечающий за роль λ_{max} быстро падающую с ростом $|m|$. Значению при $m=0$, т.е. главной частоте $1/T_{k,m}$ видимого диапазона отвечает родопсин палочек и сумеречное зрение, парам значений $m=(3$ и $-5)$ и $(5$ и $-3)$ – соответственно, красный и синий йодопсины колбочек, а «самым слабым» значениям $m=(-8$ и $11)$ – зеленый йодопсин колбочек и $m=(-11$ и $8)$ меланопсин, обнаруженный в *ipRGC*

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Вполне вероятно, что в данном случае наблюдается пример синергизма: палочки и В-колбочки сетчатки могли проэволюционировать так, чтобы теперь они совместно способствовали клеткам *ipRGC* выполнять их функцию. Аналогией этого предполагаемого синергизма может быть помощь, которую оказывают среагировавшей на «свой цвет» колбочке невозбужденные клетки ее рецептивного поля. Они реагируют вместе с ней, т.е. тем самым существенно усиливают эффективность цветовосприятия глаза.

Обсуждение

Полученные результаты свидетельствуют об объективно существующем феномене УСУП, имеющем отношение к фундаментальным законам природы и определяющем многочисленные природные процессы эволюционного развития. Частоты УСУП попадают в самые различные масштабы, в том числе в масштаб частот спектрального окна прозрачности атмосферы и его видимой части – оптического спектра. Долгое время трудность обнаружения УСУП была обусловлена тем, что периоды УСУП в их естественном логарифмическом масштабе времени распределены равномерно, а не локализованы; тогда их было бы значительно легче выявить. Независимость от природы периодического процесса, формирующего УСУП, можно считать следствием весьма общих природных закономерностей, обеспечивающих самоорганизацию и синхронизацию множества физических и биологических систем; (см., например, работы [30-33]).

Проиллюстрированные проявления УСУП в зрении человека, а конкретно, в значениях длин волн, соответствующих максимумам спектральной чувствительности фотоприемников в сетчатке глаза человека (они найдены нами также и в зрении животных, например, в тетрахроматическом зрении птиц) позволяют говорить о перспективности детального изучения природы этого весьма общего феномена с целью, например, усовершенствования технических характеристик различных биологических и технических сенсоров и т.п.

К опирающимся на УСУП биофизическим феноменам осцилляций эффективности памятного следа у человека и специфической настройки у человека слухового анализатора [8,9] мы в свое время уже добавили опирающийся на УСУП биофизический феномен специфической настройки зрительного анализатора человека и других животных. Это заставляет уверенно предполагать существование настроек на частоты УСУП во многих других системах человеческого организма и возможность бионического

применения тех же принципов в технических системах [16, 17, 26, 27]. Все это обещает дать широкий спектр новых приложений, относящихся к разнообразным открытым (в термодинамическом смысле) диссипативным динамическим системам (природным, биологическим и техническим), в которых может быть применен аппарат УСУП.

Следует отметить, что дискретное развитие в ходе биологической эволюции фоточувствительных элементов глаза человека недавно в точности повторилось в ходе технической эволюции компьютерных мониторов. Сначала широко распространились «черно-белые» мониторы, работавшие в однобитовом режиме «да/нет», в биологической аналогии они соответствовали «третьему глазу», отличавшему день от ночи, свет от тьмы. Затем широко распространились дешевые офисные мониторы, представлявшие однобайтовые изображения в градациях серого; в нашей аналогии они отвечают палочковому зрению и родопсину. Аналогом последовавших затем RGB-мониторам с их R-байтом, G-байтом и B-байтом является уже цветное зрение и обеспечивавшие его йодопсины. Три байта на пиксель у этих мониторов потому, что мониторы подстроены под человека, который обычно – трихромат.

Заключение

К настоящему времени накоплены данные, позволяющие считать, что периоды $T_{k,m}$ покрывают широкий диапазон масштабов. Значения $T_{k,m}$, описанные посредством эмпирической формулы Петца, вычисляются с большой точностью. В этой статье мы проиллюстрировали закономерность проявления УСУП на частном примере зрения человека. Результаты этого исследования могут быть использованы при решении актуальной задачи дальнейшего уточнения различных характеристик зрительного восприятия и, возможно, также улучшения качества цветных экранов телевизоров, компьютерных мониторов, а также искусственного освещения, потребность в высоком качестве которого постоянно возрастает.

Литература

1. Muller H. Fractal scaling models of resonant oscillations in chain systems of harmonic oscillators// Progress in physics 2009, iss. 2, P. 72-76.
2. Puetz S.J. The Unified Cycle Theory: How Cycles Dominate the Structure of the Universe and Influence Life on Earth. (2009) Outskirts Press, Denver, Colorado; ISBN: 978-1-4327-1216-7.
3. Puetz S.J. Unified Cycle Theory: Introduction & Data. (2010) Proceedings of the NPA, Long Beach 2010 Annual Conference.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

4. Puetz S.J., Borchardt G. Quasi-periodic fractal patterns in geomagnetic reversals, geological activity, and astronomical events// *Chaos, Solitons and Fractals* 81 (2015) 246-270.
5. Puetz S.J., Prokoph A., Borchardt G. Evaluating alternatives to the Milankovitch theory// *Journal of Statistical Planning and Inference* DOI: 10.1016/j.jspi.2015.10.006-October 2015.
6. Puetz S.J., Prokoph A., Borchardt G., Mason E.W. Evidence of synchronous, decadal to billion year cycles in geological, genetic, and astronomical events// *Chaos, Solitons & Fractals* 2014, 62-63, P. 55-75.
7. Prokoph A., Puetz S.J. Period-Tripling and Fractal Features in Multi-Billion Year Geological Records *Mathematical geosciences* DOI: 10.1007/s11004-015-9593-y-April 2015.
8. Бондарь А.Т. О закономерностях воспроизведения памятного следа во времени. *ДАН СССР*, 1977. 236. № 6. С.1503.
9. Бондарь А.Т., Федоров М.В., Коломбет В.А. Утраивающиеся периоды в мультимасштабных физических и биологических явлениях// *Биофизика*, 2015, №60(6). С.1208-1215.
10. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В., Федоров М.В. Обнаружение в технических устройствах фрактальной системы утраивающихся периодов, известной по своим физическим геофизическим, биофизическим и биологическим манифестациям// *Биофизика*, 2016, №61(3). С.615-624.
11. Коломбет В.А., Коломбет Е.В., Лесных В.Н. О перспективе применения фундаментальной системы утраивающихся периодов в мультимасштабных технических устройствах// *Известия Института инженерной физики*, 2016. №1(39). С.8-11.
12. Feigenbaum, M. Quantitative universality for a class of nonlinear transformations. *J. Stat. Phys.* 1978, 19. Pp.25-52.
13. Гольберг А.И., Синай Я.Г., Ханин К.М. Универсальные свойства для последовательностей бифуркаций утращения периода// *Успехи математических наук*, 1983. №1(229). С.159-160.
14. Нейман Дж. Теория самовоспроизводящихся автоматов. М.: Мир. 1971. 326 с.
15. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Елистратов А.В. Трипликатор как механизм формирования универсальной системы утраивающихся периодов// *Известия Института инженерной физики*, 2020. №4(58). С.5-10.
16. Коломбет Е.В., Лесных В.Н., Скавуляк А.Н., Коломбет В.А., Бондарь А.Т. Проявление универсальной системы утраивающихся периодов в УВЧ терапии// *Известия Института инженерной физики*, 2017. №2(44). С.70-73.
17. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Предсказание тактовой частоты процессора будущего поколения компьютеров как пример эффективности использования в технике свойств фрактальной системы утраивающихся периодов// *Известия Института инженерной физики*, 2016. №2(40). С.55-58.
18. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Соответствие сумеречного зрения универсальной системе утраивающихся периодов// *Известия Института инженерной физики*, 2020. №1(55). С.11-15.
19. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Универсальная система утраивающихся периодов и музыкальный строй// *Известия Института инженерной физики*, 2018. №3(49). С.8-11.
20. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Елистратов А.В., Коломбет Е.В., Федоров М.В., Шноль С.Э. Экспериментальный подход к исследованию универсальной системы утраивающихся периодов// *Биофизика*, 2019. №2(64). С.396-408.
21. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники. Учебн. пособие для вузов. В 2-х ч. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1989. 432 с.
22. Берман С.М., Клиер Р.Д. Недавно открытый фоторецептор человека и предыдущие исследования в области зрения// *Светотехника*, 2008. № 3. С.49-53.
23. Segelstein, D.J. The complex refractive index of water M.S. Thesis. University of Missouri, Kansas City (1981).
24. Bernath P. F. The spectroscopy of water vapour: Experiment, theory and applications *Phys. Chem. Chem. Phys.* 4,1501 (2002).
25. Matsumi Y., Kawasaki M. Photolysis of Atmospheric Ozone in the Ultraviolet Region *Chem. Rev.* 103(12), 4767 (2003).
26. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Учет существования сети Петца как новый путь к повышению эффективности распознавания целей// *Известия Института инженерной физики*, 2017. №3(45). С.37-39.
27. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Определение перспективных частот РЛС// *Известия Института инженерной физики*, 2017. №4(46). С.18-21.
28. Леонидов А.В. О приемниках оптического излучения в тракте управления циркадианной активностью организма человека// *Биофизика*, 2016. №6(61). С.1208-1218.
29. Леонидов А.В. Методика определения эффективных режимов воздействия оптического излучения при управлении циркадианной активностью организма человека// *Светотехника*, 2020. №5, С.44-51.
30. Буданов В.Г. В сб. Синергетика времени / Под ред. В.И. Аршинова. М., 2007. С.46-72.
31. Аршинов В.И., Буданов В.Г. В сб. Самоорганизация и наука: опыт философского осмысления. Арго, ИФ РАН, 1994.
32. Буданов В.Г. В кн.: Леонардо да Винчи XX-го века. К столетию А.А. Чижевского. Тезисы Юбилейной сессии РАЕН. М.: РАЕН, 1997. С.34-35.
33. Кулинкович А.Е. В кн. Вернадскианская революция в системе научного мировоззрения – поиск ноосферной модели будущего человечества в XXI веке (коллективная монография). Под науч. ред. Субетто А.И. СПб.: Астерион, 2003. 352 с.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 527

МЕТОДИКА ВЫБОРА ЦИФРОВОЙ КАРТЫ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ СИСТЕМЫ НАЗЕМНОЙ НАВИГАЦИИ ПО ХАРАКТЕРНЫМ ТОЧКАМ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

METHOD OF SELECTING A DIGITAL MAP FOR CORRECTING THE GROUND NAVIGATION SYSTEM BY CHARACTERISTIC POINTS OF HIGHWAYS

Владимир Владимирович Устинов
адъюнкт
филиал ВА РВСН им. Петра Великого
(г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: 8 (964) 563-22-69
E-mail: uvv_88@mail.ru

Аннотация

В статье рассматривается методика оценки среднеквадратичных отклонений координат при движении по автодорогам различных цифровых карт для коррекции системы наземной навигации, имеющей различные тактико-технические характеристики и модели функционирования.

Ключевые слова: среднеквадратичные отклонения, максимум функции правдоподобия, алгоритм Дейкстры, ковариационный канал.

Summary

The article discusses the methodology for assessing the root-mean-square deviations of coordinates when driving on the roads of various digital maps for correcting the ground navigation system, which has different tactical and technical characteristics and functioning models.

Keywords: root-mean-square deviations, maximum likelihood function, Dijkstra's algorithm, covariance channel.

Введение

К одной из особенностей решения навигационной задачи для наземных подвижных объектов относится принципиальная возможность использования траекторных навигационных полей, представляемых цифровыми картами дорог (ЦКД) и их специализированными слоями. В основу использования траекторных навигационных полей положен принцип коррекции автономных навигационных систем счисления пути по информации, представляемой ЦКД [1,2].

Данная информация может быть непосредственно применена для коррекции систем наземной навигации, а также для оценки эффективности коррекции системы с заданными параметрами точности и на определенных участках местности, путем многократного моделирования движения подвижного объекта и оценки

СКО координат без коррекции и с таковой.

В известных работах по коррекции систем наземной навигации (СНН) по цифровой карте в основном рассмотрены и обоснованы потенциально достижимые точности, те или иные алгоритмы коррекции. В меньшей степени исследованы элементы, обеспечивающие оптимальное оценивание погрешностей координат. В курсоодометрической системе навигации погрешности нарастают медленно (на коротких участках практически постоянны), в связи с этим в данной статье в основном речь идет о выборе элементов содержащихся в ЦКД, в целях применения их для коррекции СНН: отдельные прямолинейные отрезки, повороты, отдельные контрольные точки и др. В статье основное внимание уделено обоснованию методики выбора элементов ЦКД, обеспечивающей снижение вероятности грубых

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

промахов в оценках погрешностей координат. Приводится пример оценки характеристик точности координат курсо-одометрической системы, скорректированных по реальным маршрутам цифровой карты, характеризующейся точностями близкими существующим СНН.

Постановка задачи

Будем считать известной цифровую карту местности определенного масштаба, который определяет максимальную протяженность маршрутов, имеющая СКО определения: $\sigma_{x,k}$, $\sigma_{y,k}$ – координат, $\sigma_{\alpha,k}$ – дирекционного угла, $\sigma_{h,k}$ – высоты, систему наземной навигации счисления пути курсо-одометрического типа [3]. Вероятностные характеристики погрешностей основных приборов СНН (паспортные значения) заданы. Подвижный объект (автомобиль, шасси специального назначения и т.д.), на котором установлена СНН, имеет определенный критерий к точности выработки координат.

Необходимо разработать методику выбора цифровой карты для коррекции системы наземной навигации по характерным точкам автомобильных дорог.

Формирование случайных маршрутов движения

Для формирования слоя дорог необходимо воспользоваться «графом дорог». Перед вызовом задачи «Построение графа» на исходной карте должны быть выделены дороги, участвующие в построении сети.

После составления списка выделенных объектов отображается диалог построения графа. В программе представлена возможность выбора различных типов дорог по их кодам. Так же в программе представлены широкие возможности для редактирования созданного графа, например, удаление или добавления узлов карты, создание съездов, разворотов, дорожных развязок. После создания дорожной сети необходимо сохранить ее в txf-формате.

Помимо координат X и Y для определения положения точки в пространстве необходимо знать ее высоту H . Матрица высот – регулярный массив значений абсолютных высот на прямоугольный участок местности. Элемент матрицы соответствует квадратному участку местности, размер стороны которого называется точностью матрицы. Матрица высот может содержать абсолютный рельеф местности или сумму абсолютного рельефа и относительных высот объектов.

Матрица высот может быть получена различными способами: построена по векторной карте в ГИС Карта; создана на фотограмметрических

приборах; загружена из других ГИС. При создании матрицы в ГИС Карта 2011, определение значений элементов базируется на анализе объектов карты, имеющих информацию о рельефе (объекты, имеющие характеристику «абсолютная высота»; объекты, имеющие трехмерную метрику; объекты гидрографии; структурные линии рельефа). При создании матрицы слоев, информация о рельефе местности берется только из точек пикетажа, что понижает точность передачи форм рельефа. Для получения более точной информации о рельефе земной поверхности необходимо, при построении матрицы слоев, использовать матрицу высот [7].

Чтобы начать формирование случайных маршрутов задается их число $N=50$, протяженность $S=70-100$ км, максимальная протяженность отрезков, на которые разделяется длинный маршрут $S_{max}=25$ км, коэффициент марша $k_{ij}=1,2$, коэффициент, показывающий во сколько раз путь по бездорожью «длиннее», чем по дороге $k_r=5$.

После чтения файлов, содержащих граф дорог и матрицу высот, случайным образом, в зависимости от заданной протяженности маршрута, формируются N – пар точек, одна из которых задана началом, а другая концом маршрута. Если протяженность заданного маршрута превышает диагональ загруженной карты, то в программе формируется ошибка с сообщением оператору, что маршрут превышает размер карты. После формирования точек применяется алгоритм Дейкстры для нахождения кратчайшего пути по графу автодорог между парами точек. На выходе из программы формируются N – случайных маршрутов, представленных на рисунке 1.

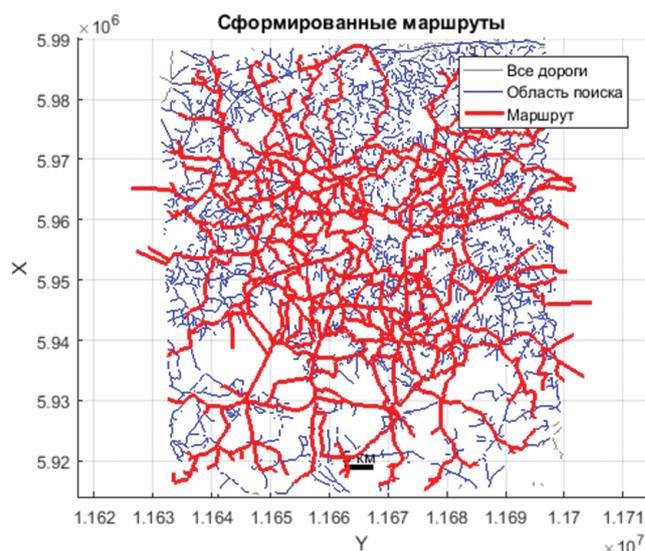


Рис. 1. Случайно сформированные маршруты

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Методика выбора цифровой карты при движении по N случайно сформированным маршрутам автомобильных дорог

После формирования N случайных маршрутов становится доступен массив данных, состоящий из координат и высот узловых точек, которыми являются точки поворота.

Применяя модель идеального функционирования курсо-одометрической системы [3], строится идеальная траектория движения

$$\dot{x} = v \cdot \cos \alpha \cdot \cos \theta, \dot{y} = v \cdot \sin \alpha \cdot \cos \theta, \dot{h} = v \cdot \sin \theta \quad (1)$$

Далее формируется модель погрешностей, строится приборная траектория движения, а из ковариационного канала на каждом такте работы СНН формируется зависимость СКО координат от пройденного пути.

В данной статье рассматривается методика коррекции системы навигации по характерным точкам (ХТ) маршрута движения. В ней сопоставление точек приборной траектории и точек карты происходит по критерию максимума функции правдоподобия [6]

$$\rho_i = \exp \left[-0,5(\bar{z}_{np\ i} - \bar{z}_M)^T (P_M + P_{np})^{-1} (\bar{z}_{np\ i} - \bar{z}_M) \right] \rightarrow \max \quad (2)$$

где \bar{z}_M – вектор параметров характерной точки маршрута;

$\bar{z}_{np\ i}$ – вектор приборных навигационных параметров;

P_M и P_{np} – ковариационные матрицы погрешностей определения параметров векторов \bar{z}_M и $\bar{z}_{np\ i}$.

После сопоставления точек необходимо по максимальному приращению угла поворота на интервале коррекции (5 км) выбрать по одной точке коррекции. Сопоставив точки, появляется избыточная информация, как следствие – возможность применения оптимального фильтра



Рис. 2. Зависимость СКО координат от протяженности маршрута (утолщенные линии – средние значения СКО)

Калмана (ОФК). В выбранных точках проводится коррекция СНН, а из ковариационного канала сформируется зависимость СКО координат от пройденного пути

$$\sigma_{x,y} = f(S) \quad (3)$$

Чтобы представить наглядно картину зависимости СКО координат от пройденного пути необходимо построить зависимости всех маршрутов, а для оценки взять средние значения СКО координат без коррекции и скорректированных по ОФК (рисунк 2).

Из графика видно, что средние значения СКО без коррекции ($\sigma_x = 104,5$ м, $\sigma_y = 98,5$ м) значительно превышают скорректированные значения ($\sigma_x = 15,7$ м, $\sigma_y = 14,5$ м). Основным параметром, определяющим значения скорректированного СКО, помимо самих тактико-технических характеристик СНН, являются СКО определения параметров точек карты, которые в данной работе были приняты по 11 метров. В современных цифровых картах данные параметры уменьшаются в несколько раз.

Основные этапы методики выбора цифровой карты при движении по случайно сформированным маршрутам автомобильных дорог

Итак, для начала формируется слой необходимых автодорог (класс, категория) из ГИС карты, также на этом этапе из карты выгружается матрица высот.

Для формирования заданного количества случайных маршрутов необходимы исходные данные ($N, S, S_{max}, k_r, k_{lp}$), чтение слоя автодорог и матрицы высот.

Далее программой производится:

- автоматический выбор $2N$ – случайных точек на карте, учитывая заданную протяженность маршрутов;
- построение кратчайшего пути между каждой парой точек, применяя алгоритм Дейкстры;
- сохранение результатов в текстовом формате.

В программу оценки СКО координат вводятся данные о случайно сформированных маршрутах (X, Y, H), точностные характеристики СНН, ГИС карты, и параметры движения подвижного объекта, проводится расчет СКО координат для каждого маршрута:

- формирование геометрического вида маршрута движения, построенного по данным сформированных маршрутов из ЦКД;
- формирование приборного маршрута и зависимости СКО от пройденного пути из ковариационной (дисперсионной) матрицы параметров состояния СНН по модели погрешностей;

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- расчет приращений дирекционных углов da на маршруте движения, построенном по данным карты, выбор максимальных;

- выбор функционала сопоставления выбранных точек карты с приборными точками (X, Y, H, da) ;

- расчет соответствия характерных точек карты точкам приборного маршрута по критерию максимальности функции правдоподобия;

- апостериорная коррекция координат приборного маршрута путем применения ОФК в характерных точках карты;

- формирование зависимости СКО от пройденного пути из ковариационной (дисперсионной) матрицы параметров состояния скорректированного маршрута;

- построение зависимости СКО по координатам приборного и скорректированного маршрутов от их протяженности.

После проведения математического моделирования проводится сравнение среднего значения СКО координат приборного и скорректированного маршрутов движения, вывод об эффективности применения данной карты ГИС.

Заключение

В условиях, когда заданы параметры карты, точности СНН и способ коррекции СНН, разработанная методика позволяет принимать решение по рассчитанному среднему значению СКО координат о совместном применении вышеуказанных исходных параметров. Если же точность СКО не удовлетворяет заданному уровню, то необходимо: либо применение другой карты, либо СНН с лучшими точностными характеристиками. Сама методика является универсальной, если говорить о коррекции по траекторным полям. Она предоставляет широкие возможности изменения исходных данных:

- применяя различные карты, делать вывод об их информативности для определенного способа коррекции;

- изменять сам способ коррекции;

- применять СНН с различными точностями;

- применять разные типы СНН, со своими моделями погрешностей.

Литература

1. Дмитриев С.П., Степанов О.А. Оптимальное решение задачи автомобильной навигации с использованием карт дорог// Гироскопия и навигация, 2007. № 2 (29). С.57-62.

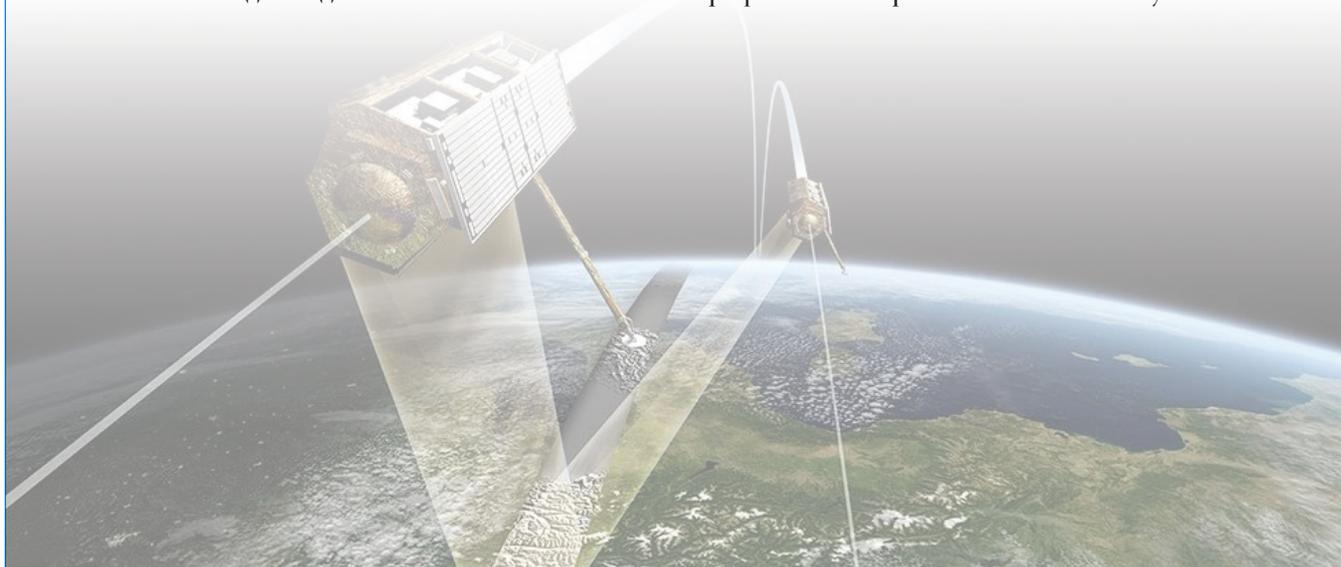
2. Шолохов А.В., Ливенцев В.А. Сравнительный анализ способов построения алгоритмов коррекции наземных навигационных систем по цифровым картам дорог// Метрология, 2007. №1. С.19-28.

3. Шолохов А.В., Котов Н.И. Военные системы навигации. Учебное пособие. М.: ВА РВСН имени Петра Великого (филиал в г. Серпухове), 2016. 216 с.

4. Котов Н.И. Коррекция автономных наземных навигационных систем в движении по отдельным точкам ЦКД / Беркович С.Б., Котов Н.И., Шолохов А.В. и др.// 13-я С.-Петербургская межд. конф. по интегрированным навиг. системам, 29-31 мая 2006 г. СПб: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2006. С.154-156.

5. Устинов В.В. Методика коррекции системы наземной навигации подвижного грунтового ракетного комплекса по характерным точкам маршрута движения при их безостановочном проезде// Тр. XXXIX Всерос. НТК «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем». М.: ВА РВСН имени Петра Великого (филиал в г. Серпухове), 2020. Ч.12. С.134-141.

6. ГОСТ Р 51608-2000. Карты цифровые топографические. Требования к качеству.



ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



УДК 541.138

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРОВСКИТНЫХ СТРУКТУР В ФОТОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

USE OF PEROVSKITE STRUCTURES IN PHOTOELECTROCHEMICAL CONVERTERS

Евгений Александрович Нижниковский
доктор технических наук, профессор
действительный член РАЕН
заместитель руководителя
Межведомственного научного совета
по комплексным проблемам
физики, химии и биологии при Президиуме РАН
Адрес: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3
Тел.: 8 (985) 928-23-39
E-mail: nizhnikovsky@mail.ru

Анастасия Алексеевна Вологодина
ученый секретарь секции
Межведомственного научного совета
по комплексным проблемам
физики, химии и биологии при Президиуме РАН
Адрес: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3
Тел.: 8 (499) 135-02-36

Максим Юрьевич Деменков
ученый секретарь секции
Межведомственного научного совета
по комплексным проблемам
физики, химии и биологии при Президиуме РАН
Адрес: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3
Тел.: 8 (926) 606-12-54
E-mail: maksim_demenkov@mail.ru

Андрей Иванович Григорьев
доктор технических наук, профессор
генеральный директор
Российского фонда перспективных исследований
Адрес: 121059, Москва, Бережковская наб., д. 22
Тел. 8 (499) 418-00-25
E-mail: fpi@fpi.gov.ru

Андрей Евгеньевич Салько
Лауреат премии правительства РФ
в области науки и техники
доктор технических наук, профессор
заместитель генерального директора
по научно-технической политике
и межструктурным коммуникациям
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (985) 923-42-09

Аннотация

Рассмотрены особенности конструкции, технические параметры и перспективы использования для автономного электропитания радиоэлектронной аппаратуры солнечных элементов на основе гибридных органико-неорганических полупроводниковых материалов с перовскитной структурой.

Ключевые слова: солнечные элементы, перовскиты, автономное электропитание радиоэлектронной аппаратуры.

Summary

The design features, technical parameters and prospects of using solar cells based on hybrid organic-inorganic semiconductor materials with perovskite structure for Autonomous power supply of radioelectronic equipment are considered.

Keywords: solar cells, perovskites, Autonomous power supply of electronic equipment.

Надежное бесперебойное электропитание является важнейшим требованием автономной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) гражданского и военного назначения [1].

Солнечные элементы на основе кремния давно известны и широко применяются для автономного электропитания различных классов РЭА. Однако дефицитность кремния и его специфические физико-механические свойства давно привели к необходимости поиска других материалов для солнечных элементов. В [2] рассмотрена перспективность использования для автономного электропитания РЭА фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на базе цветосенсибилизированных широкозонных полупроводников.

Цветосенсибилизированные фотоэлектрохимические ячейки (ФЭХЯ) имеют заметные преимущества перед кремниевыми солнечными элементами [2,3]. Однако они содержат жидкий электролит, что заметно снижает их надежность и долговечность.

Предложены солнечные элементы на основе гибридных органико-неорганических полупроводниковых материалов с перовскитной структурой, таких как $(\text{CH}_3\text{NH}_3)\text{PbX}_3$ ($X=\text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) и их аналогов. Гибридные органико-неорганические перовскиты (ГОНП) состоят из недорогих и доступных материалов и позволяют использовать при формировании солнечных элементов низкотемпературные мокрые технологии, в том числе методы печати.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

В течение 2012-2014 годов удалось повысить КПД преобразования энергии солнечных элементов на основе ГОНП с 7,2% до 15,9% [4,5]. К настоящему времени коэффициент преобразования превысил 20%.

В основе работы ГОНП в составе фотоэлектрического преобразования лежат следующие физические механизмы. Технические параметры ФЭП определяются композицией и физическими свойствами трех материалов, составляющих фотовольтаическое устройство. Между различными по химическому составу материалами – буферами, образующими с абсорбером два различных интерфейса (гетероперехода), помещают фотоабсорбер из гибридного органо-неорганического перовскита в виде тонкого слоя (или наночастичного конгломерата). Транспорт фотоиндуцированных электронов осуществляется через интерфейс с электрон-проводящим материалом (ЭПМ). Противоположную функцию выполняет Второй интерфейс с дырочно-проводящим материалом (ДПМ). Буферные слои сопряжены с внешними токоотводами.

С учетом геометрической архитектуры трех указанных составляющих в перовскитном ФЭП необходимо различать мезо- (или нано-) структурированную объемную и тонко-пленочную планарную архитектуру, обозначаемые как объемные и планарные гетероструктурные ФЭП.

К числу наиболее важных физических характеристик гибридных перовскитов следует отнести, прежде всего, ширину запрещенной зоны $E_g = E_c - E_v$, диффузионные длины L_e и L_h транспорта свободных электронов и дырок, а также максимальную энергию связи E_{ex} экситонного возбуждения. В наиболее часто используемом перовските тригалогенид метиламмоний свинца $CH_3NH_3PbX_3$ величина E_g варьируется от ~1,5 эВ до ~3,1 эВ при замене галогена в ряду $X = I, Br, Cl$ [4], либо замещением [6] метиламмония $[CH_3NH_3]^+$ на другой органический катион (например, на катион формамидиниума, $[NH_2CH=NH_2]^+$) с близким эффективным ионным радиусом. Недавно установлено, что транспорт фотоносителей в гибридных перовскитах осуществляется преимущественно посредством свободных электронов и дырок.

КПД солнечного элемента определяется следующим образом:

$$КПД = J_{sc} V_{oc} F_F / P_0$$

где J_{sc} – ток короткого замыкания;

V_{oc} – напряжение холостого хода;

F_F – фактор заполнения;

P_0 – мощность падающего излучения.

Согласно [7] максимальная плотность фототока $J_{sc} = 28$ мА/см² может быть достигнута при

полном преобразовании солнечного излучения в интервале длин волн 280-820 нм, где 820 нм отвечает минимальной ширине запрещенной зоны 1,5 эВ. С учетом отражения ~20% солнечного излучения от стандартного верхнего прозрачного проводящего контакта, нанесенного на прозрачную подложку, плотность тока уменьшается до 22 мА/см².

Согласно [5] рост КПД до значений около 20% может быть достигнут дальнейшей оптимизацией следующих факторов:

(а) увеличением фактора заполнения, от 0,7 до 0,75, за счет увеличения шунтирующего сопротивления и уменьшения последовательного сопротивления во всем устройстве;

(б) уменьшением фундаментальных потерь напряжения на гетеропереходах за счет более удачного выбора ЭПМ и ДПМ, либо исключением одного из гетеропереходов;

(в) применением антиотражающей или плазмонной технологии для просветления верхнего проводящего контакта.

Возможность создавать высокоэффективные образцы с простой планарной тонкопленочной архитектурой перовскитных ФЭП связывают, прежде всего, с сопоставимыми величинами длины оптического поглощения и длины диффузии носителей заряда, превосходящих традиционные ограничения для полупроводников, полученных из растворов.

Гибридные органо-неорганические перовскитные материалы представляют собой растворимые в воде и полярных органических растворителях двойные соли. Термин «перовскит» в данном случае отражает тип кристаллической решетки материалов ABX_3 , характерный для структуры природного минерала перовскита $CaTiO_3$, названного в честь российского минеролога Л.А. Перовского.

В фотовольтаике нашли применения ГОНП материалы подобные фторидным неорганическим перовскитам, в кристаллической решетке которых катион F^+ замещен на катион органического аммониевого основания. Синтетические гибридные перовскиты считаются лучшими для солнечных батарей. Это объясняется их высокой стойкостью и термической стабильностью, функциональной универсальностью, механической гибкостью и низкой стоимостью. Структура исходных кубических перовскитов ABX_3 состоит из BX_6 октаэдров, соединенных по вершинам в трехмерный перовскитный каркас (рисунком 1), и катионов А, которые находятся в кубооктаэдрических полостях между октаэдрами и скоординированы с 12-тью лигандами. Октаэдр BX_6 включает в себя катион металла ($B = Sn^{2+}, Pb^{2+}, Ge^{2+}, Cu^{2+}$)

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

и анионные лиганды ($X=Cl, Br, I$). Успешно были синтезированы ГОНП, содержащие катионы $A=[CH_3NH_3]^+, [NH_2CHNH_2]^+$.

Гибридные перовскиты впервые были использованы в солнечных элементах в 2009 году [4]. Эти перовскит-сенсibilизированные TiO_2 солнечные элементы использовали жидкие электролиты на основе йодида и бромида и имели эффективность преобразования энергии 3,8%. В них тонкий слой перовскита наносился на мезопористый каркас из ЭПМ TiO_2 , который использовался в качестве коллектора электронов. В 2012 году жидкий электролит в ФЭП был заменен твердым электролитом, *spiro-MeOTAD*, что обеспечило КПД устройства ~9,7%. Замена жидкого электролита твердым в значительной мере замедлило процессы деградации. Разработанная в [8] двухступенчатая технология нанесения растворов перовскитов в процессе формирования ГОНП значительно увеличила воспроизводимость характеристик ФЭП и позволила достичь КПД 15%. В 2014 году КПД таких систем была доведена до 20,1% [9].

Оказалось, что для перовскитных ячеек для транспортировки электронов вообще не требуется слой ЭПМ [10]. Так если в композиции (рисунк 2а)

с твердотельным ДПМ и мезопористым ЭПМ каркасом TiO_2 сенсibilизированным перовскитом была зафиксирована эффективность устройства ниже 10%, то при замене полупроводника TiO_2 на изолятор Al_2O_3 (рисунк 2б) эффективность не только не упала, но и превысила 10%.

Наиболее типичные архитектуры гибридных органо-неорганических перовскитных ФЭП представлены на рисунке 3.

Альтернативой мезопористому металлоксидному каркасу (рисунк 3а) могут служить упорядоченные вертикальные наноструктуры - нанопроволочная (NW) или нанотрубчатая (NT) структуры (рисунк 3б). NW и NT структуры увеличивают плотность покрытия и снижают процессы рекомбинации, и по этой причине становятся выгоднее каркасной мезоструктуры [11].

Реализованы еще несколько видов архитектуры перовскитных ФЭП, которые показали перспективность данного научно-технического направления.

Целенаправленное изменение химического состава перовскитного фотоабсорбера, в совокупности с оптимальным выбором сопряженных с ним буферных материалов, контролем качества и баланса интерфейсов в гетероструктуре

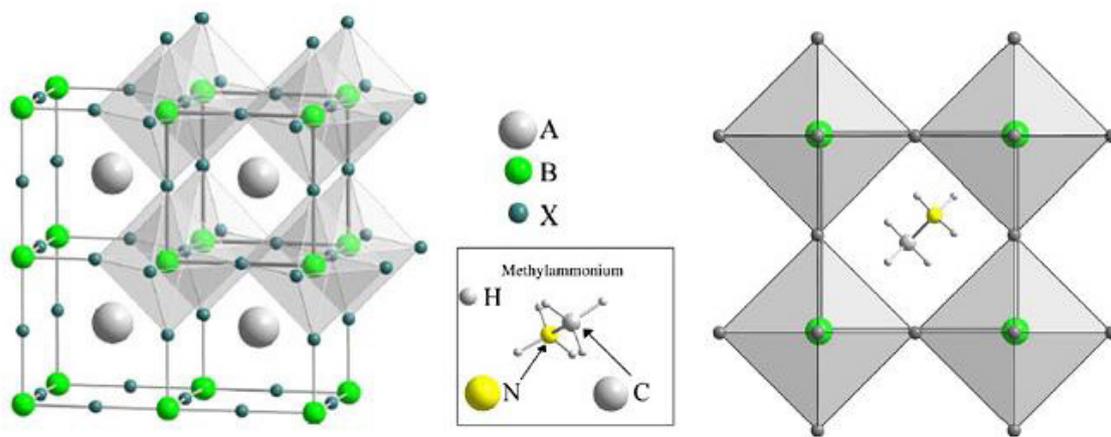


Рис. 1. Кристаллический фрагмент перовскита ABX_3 и сетевая структура, образованная BX_6 октаэдрами с общими вершинами

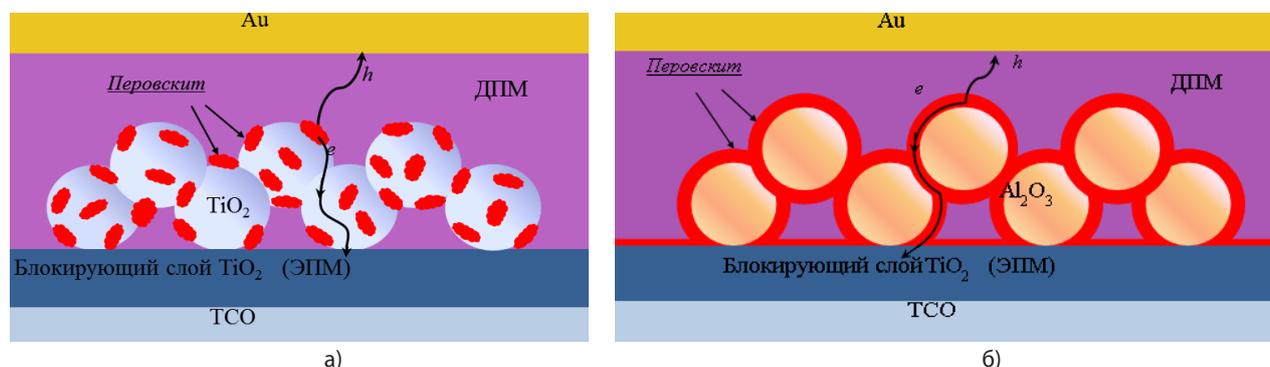


Рис. 2. Архитектурные композиции (а) сенсibilизированного (DSSC) и (б) мезо-суперструктурированного (MSSC) солнечных элементов на основе гибридных органо-неорганических перовскитов [10]. Обе композиции отвечают объемным гетеропереходным структурам

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ФЭП, открывают дополнительные возможности управления характеристиками перовскитных солнечных элементов. Важно, что перовскитная технология совместима с современными технологиями, что может способствовать быстрому решению проблемы стабильности солнечных батарей и достижению промышленного масштаба при их производстве.

Органо-неорганические перовскитные материалы могут быть изготовлены простыми методами мокрой химии. В частности, тригалогениды метиламмоний (или формамидиниум) свинца были созданы с использованием растворителей и паровой депозиции.

При использовании мокрых технологий иодид свинца и галогенид метиламмония могут быть растворены в подходящем растворителе и нанесены на подложку методом центрифугирования. После испарения получают плотные слои кристаллического ГОНП.

Тригалогенид метиламмоний свинца $M_A PbX_3$ ($M_A = CH_3NH_3$, $X = \text{галогенид}$) и его смешанные галогенидные составы, соответствующие 3D структуре перовскита, успешно используются в качестве абсорбера в солнечных батареях. При разработке способов получения перовскитных тонких пленок, были предложены мокрые технологии, в которых для формирования абсорбера используется смесь двух прекурсоров. В связи с этим была разработана технология формирования пленки ГОНП в два этапа [12]. Вначале наносится слой галогенида свинца, например, PbI_2 , с последующим погружением полученной пленки в раствор соли в органическом растворителе. Этот метод был использован для изготовления твердотельных мезоскопических солнечных элементов, что значительно увеличило воспроизводимость КПД ФЭП до уровня 15% [8].



Рис. 3. Типичные архитектуры гибридных органо-неорганических перовскитных солнечных элементов: (а) с объемным гетеропереходом и мезопористым TiO_2 , ZrO_2 анодным материалом n-типа; (б) с объемным гетеропереходом с упорядоченным наноструктурированным TiO_2 или ZnO анодным материалом n-типа; (в) с классическим планарными гетеропереходами

Ключевым шагом является выращивание пленки с помощью реакции предварительно осажденной пленки PbI_2 с паром CH_3NH_3I . При этом используются преимущества кинетической активности CH_3NH_3I и термодинамической стабильности перовскита во время процесса роста. ФЭП, сформированные на основе планарных $CH_3NH_3PbI_3$ пленок с помощью модифицированной технологии двухступенчатого осаждения, достигли КПД 12,1%.

Помимо приведенных выше методов, рассматривается вакуумное испарение как технология роста ориентированных тонких пленок слоистого перовскита с точным контролем свойств пленок [13]. С использованием двойного источника паровой депозиции были разработаны органо-неорганические тригалогенидные перовскитные солнечные элементы с тонкопленочной архитектурой, которые продемонстрировали КПД более 15%.

Функция анодных материалов в ГОНП ФЭП состоит в селективном сборе электронов, генерируемых в перовскитном абсорбере с дальнейшим их транспортом к внешнему токоотводу. С этой целью на ЭПМ буферный слой формируется из полупроводникового материала n-типа. К настоящему времени в качестве основного материала фотоанода использовались, как правило, полупроводниковые оксиды металлов.

Существенно реже создаются системы с прозрачным катодом, собирающим фотоиндуцированные носители заряда p-типа [14]. В этом случае можно говорить о фотокатоде.

Было изучено влияние $spiro-MeOTAD$, РЗНТ и 4-(диэтиламино)-бензальдегиддифенилгидронон (ДЕН) в качестве ДПМ на эффективность перовскитных солнечных батарей [1]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что скорость рекомбинация зарядов в ФЭП на основе $spiro-MeOTAD$ более чем в 10 раз ниже по сравнению с устройством с РЗНТ, и более чем в 100 раз ниже, чем в устройстве с ДЕН.

Перспективно применение в ГОНП ФЭП более простых и стабильных неорганических полупроводников p-типа. Были продемонстрированы $CH_3NH_3PbI_3$ перовскитные сенсibilизированные солнечные батареи с использованием получаемого из раствора неорганического CuI в качестве проводника дырок. Поиск оптимальных ДПМ продолжается [15-17].

Текущее состояние исследований в области солнечных элементов на основе гибридных органо-неорганических перовскитов демонстрирует их перспективность для автономного электропитания РЭА. Новый класс солнечных ячеек отличается, прежде всего, сравнительной

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

простотой применяемых для их изготовления технологий, использованием широко распространенных компонентов и, как следствие, потенциально низкой стоимостью их производства. Высокая эффективность фотопреобразования характерна для перовскитных ФЭП. Низкие потери напряжения позволяют обеспечить высокое значение напряжения холостого хода, $V_{oc} > 1,1$ В, на уровне кристаллических кремниевых солнечных элементов.

Возможность целенаправленного изменения химического состава перовскитного фотоабсорбера для управления его оптическими и транспортными характеристиками, в сочетании с оптимальным выбором сопряженных с перовскитом буферных материалов предполагают дальнейшее повышение эффективности перовскитных солнечных элементов.

Однако для практической реализации перовскитных ячеек предстоит решить ряд научных и технологических задач. Речь идет о повышении механической прочности и снижении стоимости. Перспективна реализация их на гибкой подложке, так, что они смогут даже сворачиваться в рулоны. Их КПД пока составляет 10-20%. Однако теоретическое значение КПД составляет 30%. Для дальнейшего прогресса в технических параметрах требуются научные и технологические исследования, а также скрупулёзный поиск оптимальных материалов и оптимальных конструкторско-технологических решений.

Перовскитные ФЭП могут быть успешно использованы для многочисленных бытовых приборов, таких как наручные, настольные и настенные часы, смартфоны, планшеты, плееры, видео- и фотокамеры и др.

Литература

1. Нижниковский Е.А. Современные электрохимические источники тока. М.: Радиотехника, 2015. 296 с.
2. Гринберг В.А., Медведько А.В., Емец В.В., Курзеев С.А., Козюхин С.А., Баранчиков А.Е., Иванов В.К., Андреев В.Н., Нижниковский Е.А. Циклометаллированный комплекс рутения как перспективный сенсibilизатор фотоэлектрохимических преобразователей// *Электрохимия*, 2014. Т.50. №6. С.563-569.
3. O'Regan B. and Grätzel M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films // *Nature* 1991. Vol. 353. Pp.737-740.
4. Kojima A., Teshima K., Shirai Y., and Miyasaka T. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells // *J. Am. Chem. Soc.* 2009. Vol. 131. Pp.6050-6051.
5. Park N. G. Organometal perovskite light absorbers toward a 20% efficiency low-cost solid-state mesoscopic solar cell // *J. Phys. Chem. Lett.* 2013. Vol. 4. Pp.2423-2430.
6. Eperon G. E., Stranks S. D., Menelaou C., Johnston M. B., Herz L. M., Snaith H. J. Formamidinium lead trihalide: a broadly tunable perovskite for efficient planar heterojunction solar cells // *Energy Environ. Sci.* 2014. Vol. 7. Pp.982-988.
7. Editorial. Reporting Solar Cell Efficiencies in Solar Energy Materials and Solar Cells // *Solar Energy Mat. Solar Cells.* 2008. Vol.92. Pp.371-373.
8. Kim H.-S., Lee C.-R., Im J.-H., Lee K.-B., Moehl T., Marchioro A., Moon S.-J., Humphry-Baker R., Yum J.-H., Moser J. E., Grätzel M., Park N.-G. Lead Iodide Perovskite Sensitized All-Solid-State Submicron Thin Film Mesoscopic Solar Cell with Efficiency Exceeding 9% // *Scientific Reports.* 2012. 2:591. doi:10.1038/srep00591.
9. Burschka J., Pellet N., Moon S.-J., Humphry-Baker R., Gao P., Nazeeruddin M.K., Grätzel M. Sequential deposition as a route to high performance perovskite-sensitized solar cells // *Nature.* 2013. Vol. 499. Pp.316-319.
10. Perovskite solar cell. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Perovskite_solar_cell.
11. Lee M. M., Teuscher J., Miyasaka T., Murakami T. N., Snaith H. J. *Science* 2012. Vol. 338. Pp.643-647.
12. González-Vázquez J. P., Morales-Florez V., and Anta J. A. How important is working with an ordered electrode to improve the charge collection efficiency in nanostructured solar cells? // *J. Phys. Chem. Lett.* 2012. Vol. 3. Pp.386-393.
13. Liang K. N., Mitzi D. B., and Prikas M. T. Synthesis and characterization of organic-inorganic perovskite thin films prepared using a versatile two-step dipping technique // *Chem. Mater.* 1998. Vol. 10. Pp.403-411.
14. Saliba M., Tan K., Sai H., Moore D. T., Scott T., Zhang W., Estroff L.A., Wiesner U., Snaith H. J. Influence of Thermal Processing Protocol upon the Crystallization and Photovoltaic Performance of Organic-Inorganic Lead Trihalide Perovskites // *J. Phys. Chem. C.* 2014. Vol. 118 (30). Pp.17171-17177.
15. Bi D., Xub B., Gao P., Sun L., Grätzel M., Hagfeldt A. Facile synthesized organic hole transporting material for perovskite solar cell with efficiency of 19.8%. *Nano Energy* 23 (2016). Pp.138-144.
16. Lin Y-H. et al. A piperidinium salt stabilizes efficient metal-halide perovskite solar cells. *Science* 369, Pp. 96-102 (2020).
17. Jost M., Kohnen E., Belen Morales-Vilches A., Lipovsek B., Jager K., Macco B., Al-Ashouri A. Textured interfaces in monolithic perovskite/silicon tandem solar cells: advanced light management for improved efficiency and energy yield. *Energy Environ. Sci.*, 2018. №11. Pp.3511-3523.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.865

К ВОПРОСУ ЛИКВИДАЦИЙ ПОСЛЕДСТВИЙ ВООРУЖЕННЫХ КОНФЛИКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ON THE ISSUE OF ELIMINATING THE CONSEQUENCES OF ARMED CONFLICTS USING ROBOTIC SYSTEMS

Андрей Анатольевич Хаматов

кандидат технических наук
преподаватель кафедры
«Бортовых информационных
и измерительных комплексов»
ВКА имени А.Ф. Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, д. 13
Тел.: 8 (911) 256-89-82
E-mail: hamatoff2010@yandex.ru

Сергей Евгеньевич Широков

начальник 252 лаборатории
кафедры «Бортовых информационных и
измерительных комплексов»
ВКА имени А.Ф. Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13
Тел.: +7 (962) 689-72-03
E-mail: shirokov_sergei@mail.ru

Дмитрий Павлович Дубинин

преподаватель кафедры РВСН
ВУЦ при МАИ (НИУ)
Адрес: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4
Тел.: +7 (985) 758-51-24
E-mail: dubinindp@yandex.ru

Аннотация

В работе представлена модель робототехнической системы, предназначенной для обнаружения пострадавших, а также проведения аварийно-спасательных и эвакуационных работ. Предложена и рассмотрена структура этой системы и взаимосвязь между ее подсистемами.

Ключевые слова: робототехническая система, вооруженный конфликт, модель системы.

Summary

The paper presents a model of a robotic system designed to detect victims, as well as conduct rescue and evacuation operations. The structure of this system and the relationship between its subsystems are proposed and considered.

Keywords: robotic system, emergency, system model.

Введение

Борьба за ресурсы продолжается на протяжении всего существования человечества. Иногда политические разногласия не находят решения путем ведения переговоров. В таких случаях в действие вступает разрешение политических конфликтов посредством силы [1].

Несмотря на то, что в современной истории вооруженные конфликты в основном представляют собой локальные войны, это не исключает большого количества жертв, в том числе из числа мирного населения. Использование высокоточного оружия, гранатометов и мобильных ракетных установок в ходе боевых операций приводит к серьезным разрушениям жилых, технических и вспомогательных сооружений.

В связи с этим актуальным является вопрос

о поиске и спасении пострадавших из-под завалов. Наилучшим средством для выполнения этой задачи являются различные робототехнические системы на базе гусеничного шасси.

К спасательным работам относятся:

- разведка маршрутов движения и участков (объектов) работ;
- расчистка проходов (проездов) в завалах;
- укрепление несущих конструкций;
- локализация и тушение пожаров;
- розыск и спасение пострадавших;
- вскрытие заваленных защитных сооружений и извлечение пострадавших;
- оказание первой медицинской помощи пострадавшим и эвакуация их в лечебные учреждения.

Опыт работы последних лет показал, что

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

применение робототехнических систем (РТС) при локализации конфликтов и последствий ЧС позволяет уменьшить число пострадавших и повысить вероятность успеха выполняемой операции по спасению раненых. В результате возникает объективная необходимость в применении автоматизированных робототехнических средств для транспортировки пострадавших, а отсутствие соответствующего научно-методического и программно-алгоритмического инструментария обуславливает необходимость разработки и моделирования указанных средств [2], что подтверждает актуальность исследований, проводимых в данном направлении.

Структура и состав РТС

При проектировании РТС характерно ее разбиение на отдельные взаимодействующие подсистемы (узлы), аналогично методикам, используемым в системном анализе.

Структура РТС в зависимости от возлагаемых на нее функций различна, однако можно выделить ряд составных частей, которые будут неизменны практически во всех случаях.

РТС по функциональному признаку можно разделить на основные подсистемы (узлы):

- система технического зрения;
- информационно-измерительная система;

- система хранения и обработки данных;
- двигательная система;
- система связи;
- система электроснабжения;
- система управления.

Помимо рассмотренных выше систем необходимо обеспечить РТС качественной защитой корпуса и находящихся в нем вычислительных устройств [2] в случае необходимости ее применения в условиях несовместимых с жизнью для человека.

Структурная схема РТС представлена на рисунке 1.

Управление РТС осуществляется через систему связи, которая за счет совместной работы модуля связи и протокола обмена данными организует обратную связь остальных систем с органами управления системы в целом. Питание всех систем осуществляется посредством системы электроснабжения.

Двигательная система обеспечивает перемещение РТС, в том числе в труднопроходимых местах, а системы технического зрения, информационно-измерительная система и система хранения и обработки данных отвечает за ориентацию в пространстве и обнаружение препятствий, а также расчет оптимальной траектории для их преодоления.

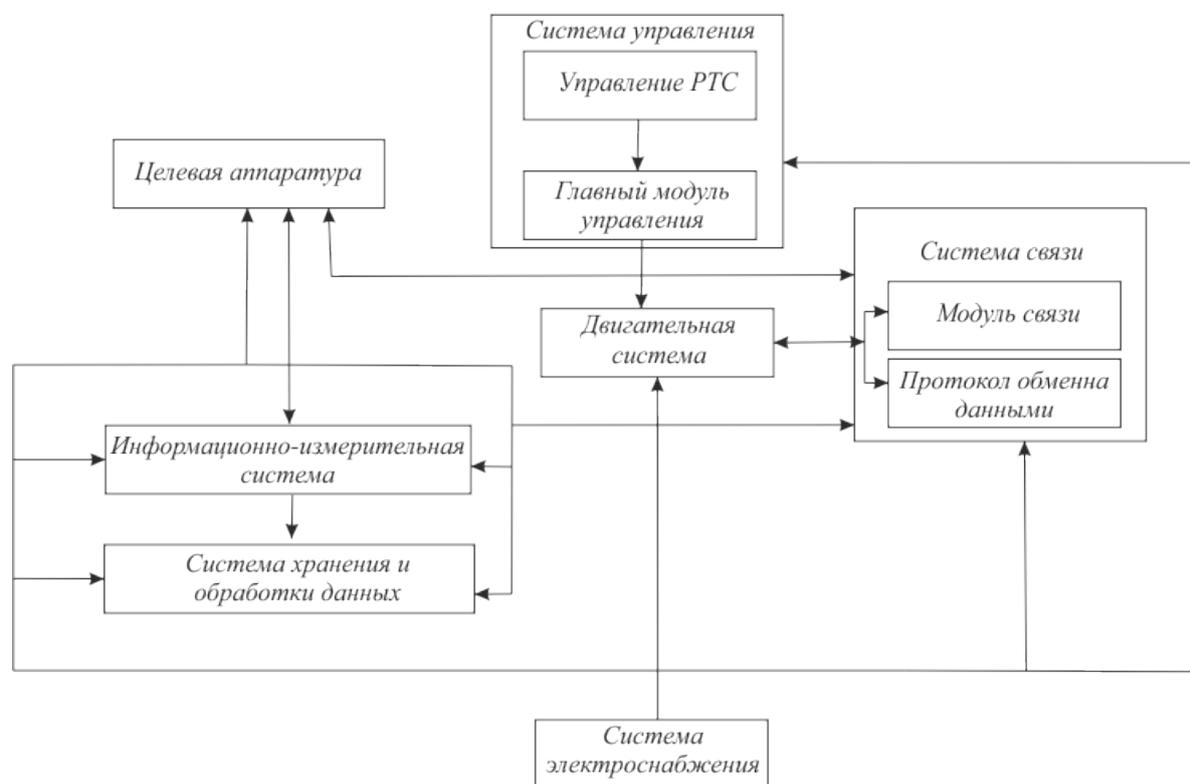


Рис. 1. Структурная схема работы и связи РТС

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Модель РТС для транспортировки пострадавшего

Модель РТС представляет собой комплексную систему (рисунки 1) состоящую из нескольких подсистем. В общем виде математическую модель РТС можно представить как систему уравнений в векторно-матричной форме:

$$\begin{cases} M\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}, \Delta\mathbf{a}, t) + \bar{\mathbf{v}}(t), \\ \hat{\mathbf{x}}(t_0) = \bar{\mathbf{x}}(t_0) + \Delta\hat{\mathbf{x}}. \end{cases}$$

где \mathbf{x} – вектор координат всей системы размерностью n ;

$$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T;$$

x_i – подвектор координат i -го тела;

$$\dot{\mathbf{x}}_i = (\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i, \omega_x, \omega_y, \omega_z)^T;$$

M – диагональная матрица;

$M_i = \text{diag}(m_i, m_i, m_i, J_{x_i}, J_{y_i}, J_{z_i})^T$, $\mathbf{f}(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}, \Delta\mathbf{a}, t)$ – вектор внешних возмущений;

$\bar{\mathbf{v}}(t)$ – вектор управляющих сил, действующих на систему;

$\bar{\mathbf{x}}_i(t_0)$ – номинальное или расчетное значение вектора параметров движения РТС;

t – время движения объекта РТС от начала t_0 до момента окончания выполнения целевой задачи;

$\hat{\mathbf{x}}(t_0)$ – значение вектора параметров движения РТС;

$\Delta\hat{\mathbf{x}}_0$ – случайный вектор разброса параметров движения РТС.

Как уже отмечалось выше, одним из основных требований, предъявляемых к РТС, является выполнение целевой задачи. В связи с этим

траектории движения РТС, а также функционирование системы в целом при выполнении задачи рассчитываются в виде некоторой совокупности, в результате чего траектория движения РТС может быть различной, и представлять собой множество точек в виде фигуры близкой к эллипсу. Размеры и центр фигуры могут меняться в зависимости от изменения случайных параметров внутри системы, а также в случае вариации внешних факторов. Их учет позволяет определить конечное местоположение РТС и вероятность выполнения целевой задачи.

Заключение

Использование модели, рассмотренной в статье, актуально при проектировании новых, а также модернизации существующих РТС отечественного производства. Важным преимуществом разработанной модели, является возможность ее доработки и дополнения, то есть в случае, если первоначальная структура модели была неполной, то имеется возможность улучшить модель за счет использования апостериорной информации.

Литература

1. Шахинпур М. Курс робототехники. М. Мир, 1990. 527 с.
2. Приказ Минздравсоцразвития РФ № 477н «Об утверждении перечня состояний, при которых оказывается первая помощь, и перечня мероприятий по оказанию первой помощи», 2012. 3 с.



ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 629.764

МОДЕЛЬ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ТОЧЕК ПАДЕНИЯ ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ЧАСТЕЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СРЕДСТВ ВЫВЕДЕНИЯ

MODEL OF THE LAW OF DISTRIBUTION OF THE COORDINATES OF THE POINTS OF INCIDENCE OF THE SEPARATING PARTS OF PROMISING LAUNCH VEHICLES

Владимир Леонидович Захаров

доктор военных наук, профессор
действительный член АВН
профессор кафедры
ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)
Адрес: 125993, Москва,
Волоколамское шоссе, д. 4
Тел.: +7 (905) 566-17-94
E-mail: varahas@yandex.ru

Дмитрий Вячеславович Смирнов

почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, доцент
действительный член АИИ
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

Рафаэль Рамисович Казаков

кандидат технических наук
старший преподаватель
кафедры бортовых информационных
и измерительных
комплексов космических аппаратов
ВКА имени А.Ф. Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, д. 13
Тел.: 8 (812) 237-12-49

Аннотация

В статье проведен анализ критериев согласия для определения закона распределения отклонения координат точек падения отделяющихся частей ракеты-носителя относительно центра рассеивания района падения. По результатам моделирования построены гистограммы и представлена модель закона распределения отклонений координат падения отработавших ступеней в боковом и продольном направлениях.

Ключевые слова: средство выведения, отделяющиеся части ракеты-носителя, координаты точек падения, центр рассеивания, критерии согласия.

Summary

The article analyzes the goodness-of-fit criteria for determining the distribution law of the deviation of the coordinates of the points of incidence of the separating parts of the launch vehicle relative to the center of dispersion of the area of impact. Based on the simulation results, histograms were constructed and a model for the distribution law of deviations of the coordinates of the fall of the spent stages in the lateral and longitudinal directions was presented.

Keywords: launch vehicle, detachable parts of the launch vehicle, coordinates of points of incidence, center of dispersion, criteria of agreement.

Введение

Освоение околоземного космического пространства является наиболее важным направлением развития ракетно-космической отрасли. Современные средства выведения (СВ) имеют различные характеристики и цели. Некоторые из них предназначены для выведения исследовательских космических аппаратов, а некоторые для выведения космических аппаратов в интересах Министерства Обороны Российской Федерации.

При проектировании СВ необходимо учиты-

вать процесс отделения отработавших ступеней и других частей конструкции РН который происходит на активном участке полета ракеты-носителя (РН). Вопрос выделения отчуждаемых земель для приема этих отделяющихся частей в последние годы стоит очень остро, поэтому возникает необходимость определения зависимости отклонения реальных точек падения ОЧ от заданных.

Для определения характера зависимости отклонений координат точек падения (КТП) ОЧ РН в продольном и боковом направлениях не-

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

обходимо: либо производить реальные запуски РН, либо разработать адекватную математическую модель, позволяющую анализировать влияние возмущающих факторов (ВФ) на рассеивание КТП ОЧ [1].

Поскольку натурные испытания сопровождаются большими финансовыми затратами, а так же в силу того, что в процессе пусков РН невозможно обеспечить полную идентичность условий их проведения из-за отличий точек старта, полезных нагрузок, алгоритмов управления, получаемая статистическая информация о рассеивании КТП ОЧ на местности является неоднородной. В связи с этим исследование будем проводить на основе моделирования возмущенного движения ОЧ РН на пассивном участке траектории.

Номинальная траектория подразумевает невозмущенное движение ОЧ и заканчивается в некоторой точке на плоскости. Данная точка называется центром рассеивания (ЦР) района падения (РП). При воздействии различных ВФ во время движения ОЧ на пассивном участке, КТП отклоняются от ЦР.

Вследствие того, что отклонения КТП ОЧ РН по дальности $\Delta \hat{b}$ и в боковом $\Delta \hat{b}$ направлении относительно ЦР являются результатом воздействия на ОЧ большого числа случайных ВФ, то закон распределения этих отклонений в соответствии с центральной предельной теоремой близок к нормальному. Между теоретическим и статистическим распределением неизбежны некоторые расхождения [3]. Для того чтобы понять, объясняются ли эти расхождения только случайными обстоятельствами, связанными с ограниченным числом наблюдений, или они являются существенными, необходимо воспользоваться критерием согласия.

Анализ существующих критериев согласия

Наиболее употребительными критериями согласия являются критерий Колмогорова, критерий χ^2 Пирсона и критерий ω^2 Мизеса.

Критерий Колмогорова наиболее прост, он выгодно отличается своей простотой, поэтому его весьма охотно применяют на практике. Однако этот критерий можно применять только в случае, когда гипотетическое распределение $F(x)$ полностью известно заранее из каких-либо теоретических соображений, т.е. когда известен не только вид функции распределения $F(x)$, но и все входящие в нее параметры, а такой случай на практике встречается сравнительно редко [3]. В других случаях целесообразно применение критерия χ^2 Пирсона.

Критерий χ^2 Пирсона широко распространен

на практике. В нем в качестве меры расхождения статистического и теоретического законов принимается величина:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - np_i)^2}{np_i}, \quad (1)$$

где χ^2 – мера расхождения хи-квадрат Пирсона;

m_i – число значений в i -м разряде;

n – число опытов;

p_i – теоретическая вероятность.

Этот критерий основан на предельном распределении меры расхождения ($n \rightarrow \infty$) и применим только в тех случаях, когда количество опытов n достаточно велико (порядка нескольких сотен). Так же при использовании критерия χ^2 , достаточно большим должно быть не только общее число опытов n , но и число наблюдений m_i в отдельных разрядах, в каждом из которых их должно быть не менее 5-10.

Для вычисления теоретической вероятности имеются специальные таблицы. Если при вычислениях эта вероятность оказывается малой, то выбранное теоретическое распределение является удовлетворительным. Для более точной оценки рассматриваемой статистической гипотезы можно воспользоваться либо коэффициентом точности H , либо критерием В.Н. Романовского R [2,3]:

$$H = \frac{\chi_0^2}{k-1}; R = \frac{|\chi_0^2 - r|}{\sqrt{2r}}. \quad (2)$$

Соответствие распределения опытным данным удовлетворительно, при $H \in [0; 2]$ и $R < 3$.

Основным недостатком критерия Пирсона является произвольное деление по интервалам группирования.

Эти обстоятельства заставляют проявлять некоторую осторожность и сопоставлять результаты проверки по критерию χ^2 с другими критериями.

От указанных недостатков в некоторой мере свободен критерий ω^2 Мизеса. Здесь в качестве меры расхождения используется значение

$$\omega_n^2 = \int [F^*(t) - F(t)]^2 dF(t), \quad (3)$$

которое вычисляется по формуле

$$\omega_n^2 = \frac{1}{12n^2} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[F(t_i) - \frac{i-0,5}{n} \right]^2. \quad (4)$$

Указанная выше гипотеза принимается при

$$n\omega^2 \leq \hat{u}(\alpha),$$

где \hat{u} – пороговое значение, соответствующее уровню значимости α .

Значения $\hat{u}(\alpha)$ приведены в таблице 1.

Этот критерий является более полным т.к.

Таблица 1
Значения $\hat{u}(\alpha)$

α	0,5	0,1	0,05	0,03	0,02	0,01	0,001
\hat{u}	0,118	0,347	0,464	0,549	0,620	0,744	1,168

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

исключает группирование выборочных значений случайных величин, но также не лишен недостатков. При использовании критерия Мизеса вычислительный процесс является более трудоемким, чем для других критериев.

Построение моделей законов распределения координат точек падения отделяющихся частей ракет-носителей

Из проведенного анализа основных критериев согласия можно сделать вывод, что наиболее удобным является критерий \hat{u} Пирсона, так как он подходит по количеству опытов в интервале и легко реализуем на современной вычислительной технике.

По результатам моделирования получены значения отклонений КТП ОЧ РН в продольном и боковом направлениях относительно ЦР. Они представлены в *таблицах 2-3*.

В *таблицах 2-3* приняты следующие обозначения:

l_i – интервалы отклонений координат по дальности и по боку;

m_i – число наблюдений в данном интервале;

p_i – произведение теоретической вероятности на количество опытов.

По данным *таблиц 2-3* построены гистограммы, представленные на *рисунках 1 и 2*.

На *рисунках 1-2* синим цветом обозначена вероятность попаданий в каждый интервал по результатам моделирования, а красным теоретическая вероятность попадания в каждый интервал. По гистограммам видно, что расхождение теоретического и практического значений незначительно, что подтверждает близость к нормальному закону распределения отклонений координат ОЧ РН по дальности и в боковом направлениях относительно ЦР. Для более точной оценки необходимо воспользоваться критерием согласия Пирсона.

Распределение χ^2 зависит от параметра r , называемого числом «степеней свободы» распределения,

$$r = k - 1 - s,$$

где r – число «степеней свободы»;

k – число разрядов;

s – число независимых условий («связей»).

Распределение χ^2 дает возможность оценить степень согласованности теоретического и статистического распределений.

Для расчета по (1), необходимо определить уровень значимости (вероятность ошибки первого рода), в нашем случае $\gamma = 0,05$.

По выбранному уровню значимости и количеству степеней свободы, определяется граничное значение меры хи-квадрат. Для этого необходимо в таблице по строке вероятностей найти значение 0,05 (уровень значимости), по столбцу степеней свободы – значение 6, а на их пересечении определить граничное значение χ^2 .

Граничные значения меры хи-квадрат для Δl и Δb :

$$\chi_{\gamma 1}^2 = 12,59 \text{ и } \chi_{\gamma 2}^2 = 12,59$$

Подставив значения из *таблиц 2-3* в выражение (1) получаем значения меры хи-квадрат, равные:

$$\chi_1^2 = 2,05 \text{ и } \chi_2^2 = 4,95$$

Т.к. рассчитанные значения χ_1^2 и χ_2^2 намного меньше граничных – $\chi_{\gamma 1}^2$ и $\chi_{\gamma 2}^2$, т.е. $\chi_1^2 \ll \chi_{\gamma 1}^2$ и $\chi_2^2 \ll \chi_{\gamma 2}^2$, то можно сделать вывод, что принятая гипотеза о законе распределения верна. Для более точной оценки подставим полученные значения χ^2 в выражения (2). Сначала определим значение коэффициента точности:

$$H_1 = 0,26 \text{ и } H_2 = 0,62.$$

Оба полученных результата удовлетворяют требованию $HE[0;2]$, что подтверждает правильность расчетов.

Так же для проверки можно воспользоваться критерием Романовского:

$$R_1 = 1,14 \text{ и } R_2 = 0,3.$$

Полученные значения удовлетворяют требованию $R < 3$.

Таким образом, по полученным результатам можно сделать вывод, что закон распределения отклонений КТП ОЧ РН по дальности и в боковом направлениях относительно ЦР близок к нормальному [2].

Модель закона распределения отклонений координат в боковом и продольном направле-

Таблица 2

Отклонения КТП ОЧ РН в продольном направлении от ЦР

l_i	[-14320;-7360]	[-7360;-3880]	[-3880;-400]	[-400;3080]	[3080;6560]	[6560;10040]	[10040;13520]	[13520;17000]	[17000;20480]
m_i	56	369	1407	2905	3067	1669	441	79	7
p_i	51	362	1425	2898	3053	1666	470	68	5

Таблица 3

Отклонения КТП ОЧ РН в боковом направлении от ЦР

l_i	[-3611;-3140]	[-3140;-2670]	[-2670;-2200]	[-2200;-1730]	[-1730;-1260]	[-1260;-790]	[-790;-320]	[-320;160]	[160;1100]
m_i	16	146	717	1892	2935	2613	1280	341	60
p_i	17	143	699	1918	2964	2582	1267	350	59

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ниях в таком случае имеет вид:

$$\varphi(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-r_{xy}^2}} e^{-\frac{1}{2(1-r_{xy}^2)}\left(\frac{(x-m_x)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-m_y)^2}{\sigma_y^2} - 2r_{xy}\frac{(x-m_x)(y-m_y)}{\sigma_x\sigma_y}\right)}, \quad (4)$$

где r_{xy} – коэффициент корреляции между отклонениями координат по дальности и в боковом направлениях;

σ_x – СКО отклонения координат по дальности;

σ_y – СКО отклонения координат по боку;

m_x – математическое ожидание отклонения координат по дальности;

m_y – математическое ожидание отклонения координат по боку.

Для большей наглядности полученную модель (4) представим в численном виде. Для этого необходимо рассчитать коэффициент корреляции. Для этого воспользуемся выражением:

$$r_{\Delta l, \Delta b} = \frac{\begin{bmatrix} 1 & \frac{K_{\Delta R_{12}}}{\sqrt{K_{\Delta R_{11}} K_{\Delta R_{22}}}} \\ \frac{K_{\Delta R_{21}}}{\sqrt{K_{\Delta R_{11}} K_{\Delta R_{22}}}} & 1 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 1.0000 & 0.2841 \\ 0.2841 & 1.0000 \end{bmatrix}},$$

где $K_{\Delta R_{11}}, K_{\Delta R_{12}}, K_{\Delta R_{21}}, K_{\Delta R_{22}}$ – соответствующие элементы ковариационной матрицы вектора $\Delta \hat{R}$ случайных отклонений КТП относительно ЦР.

Подставив численные значения в (4), получим:

$$\varphi(\Delta l, \Delta b) = 6,59 \cdot 10^{-8} \cdot e^{-1,09 \left(\frac{(b+1,37 \cdot 10^3)^2}{3,67 \cdot 10^7} + \frac{(l-3,36 \cdot 10^3)^2}{1,74 \cdot 10^7} - 0,6 \frac{(b+1,37 \cdot 10^3)(l-3,36 \cdot 10^3)}{2,53 \cdot 10^6} \right)}.$$

Заключение

Известно, что если две зависимые случайные величины имеют нормальные законы распределения, то связь между ними может быть только линейной. Случайные отклонения параметров движения ОЧ РН от их расчетных значений также являются результатом воздействия на них большого числа независимых возмущений и в соответствии с центральной предельной теоремой законы их распределения могут быть аппроксимированы нормальным законом [1]. В связи с этим можно использовать линейную модель, которая отражает функциональную связь между векторами вариаций фазовых координат и вектором случайных отклонений параметров от их расчетных значений, как близкую к реальной.

Разработанные модели применимы как для проведения исследования путей развития существующих СВ, так и для проектирования перспективных РН различного класса.

Литература

1. Сихарулидзе Ю.Г. Баллистика летательных аппаратов. М.: Наука, 1982. 352 с.
2. Миронов В.И. Эффективность, надежность и испытания систем управления: Учеб.пособие. МО СССР, 1981. 200 с.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.

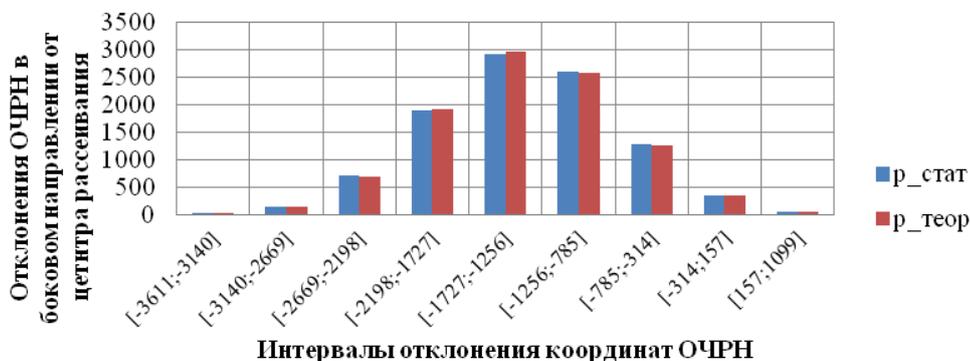


Рис. 1. Гистограмма отклонения по боку от центра рассеивания

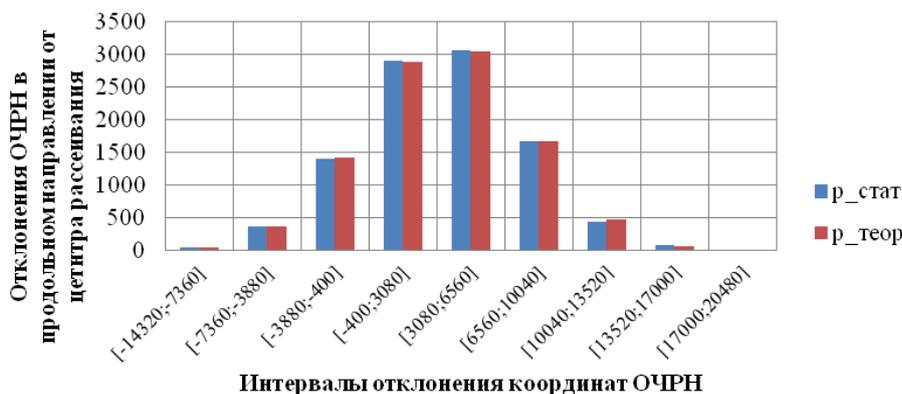


Рис. 2. Гистограмма отклонения по дальности от центра рассеивания

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 621.396

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К ЗЕМНЫМ СТАНЦИЯМ СПУТНИКОВЫХ СВЯЗНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АКТИВНЫХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

TECHNICAL REQUIREMENT FOUNDATION FOR SATELLITE COMMUNICATIONS SYSTEM EARTH STATIONS BASED ON THE ACTIVE PHASED ARRAY ANTENNAS FUNCTIONING MODEL

Максим Сергеевич Бродский

научный сотрудник
Военный институт (научно-исследовательский)
ВКА имени А.Ф.Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, д. 13
Тел.: +7 (981) 983-96-63
E-mail: vka@mil.ru

Дмитрий Романович Уткин

кандидат технических наук
научный сотрудник
Военный институт (научно-исследовательский)
ВКА имени А.Ф.Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, д. 13
Тел.: +7 (981) 958-05-44
E-mail: vka@mil.ru

Максим Валерьевич Розганов

старший научный сотрудник
Военный институт (научно-исследовательский)
ВКА имени А.Ф.Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, д. 13
Тел.: +7 (911) 167-06-31
E-mail: vka@mil.ru

Аннотация

В статье представлена модель процесса функционирования активных фазированных антенных решеток, а также порядок обоснования технических требований к земным станциям спутниковых связных комплексов для гарантированного решения целевых задач. Приведено математическое описание модели и последовательность определения энергетических характеристик антенных систем, используемых в спутниковых связных комплексах.

Ключевые слова: активные фазированные антенные решетки, спутниковый связной комплекс, диаграмма направленности.

Summary

The article presents a model of the process of functioning of active phased array antennas, as well as the procedure for justifying technical requirements for satellite communications system earth stations for guaranteed solution of target tasks. A mathematical description of the problem solution and the procedure for determining the energy characteristics of space complexes using the specified type of antenna systems are presented.

Keywords: active phased array antennas, satellite communications system, radiation pattern.

Введение

В настоящее время целевое применение земных станций (ЗС) спутниковых связных комплексов (ССК) тесно связано использованием активных фазированных антенных решеток (АФАР). В связи с ограничениями энергоресурсов ЗС вопросы поддержания высокого потенциала АФАР в секторе сканирования, связанные с минимизацией потерь, как в передающем тракте, так и на участке распространения радиоволн, являются актуальными.

Модель процесса функционирования АФАР

Для расчета числовых значений энергетических характеристик антенн в статье представлена модель процесса функционирования АФАР ЗС ССК.

Исходные данные.

Для определения числовых значений характеристик АФАР и энергопотенциала ЗС в целом используются следующие исходные данные, представленные в *таблице 1*:

Допущения и ограничения:

- коэффициент поляризации антенны прием-

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

ника КА ССК и ЗС ССК при условии, что различия по поляризации не установлены, принимает значения от 0 до 1;

- коэффициент непреднамеренной помехи на ЗС ССК, который принимает значение 1 при условии, что ширина спектра ΔF данной помехи ЗС меньше либо равна полосе пропускания приемника Δf . При $\Delta F > \Delta f$ коэффициент использования непреднамеренной помехи на ЗС будет равен $\Delta f / \Delta F$;

- элементы плоской антенной решетки возбуждаются равноамплитудно, но не синфазно. Сдвиг фаз между токами соседних вибраторов в азимутальной плоскости равен Ψ_1 , а сдвиг фаз между токами соседних вибраторов в угломестной плоскости равен Ψ_2 . Путем изменения Ψ_1 и Ψ_2 можно менять направление максимального излучения соответственно по углам θ и α , т.е. можно управлять диаграммой направленности в пространстве.

Предлагаемый подход позволит обосновать потенциально возможные технические характеристики АФАР для различных диапазонов частот в зависимости от габаритов антенно-фидерной системы, шага между элементами решетки. Структурная схема модели представлена на *рисунке 1*. При разработке модели учтены особенности (симметричность) конструкции АФАР, в связи с этим имеется совпадение диаграммы направленности в азимутальной и угломестной плоскостях. Верификация полученных результатов проводилась по имеющимся характеристикам АФАР размером

16x16 метров на частотах 10 ГГц, 20 ГГц [2].

Применение представленной модели позволит получить количественные оценки следующих характеристик АФАР и ЗС ССК:

- коэффициента направленного действия (КНД) антенной системы D_0 , Вт;
- коэффициента усиления антенны $G_{\text{пл}}$, Вт;
- суммарного потенциала всех единичных излучателей антенной решетки (АР) P_s , Вт;
- мощности единичного излучателя АФАР P_r , Вт;
- подводимой мощности к АФАР P_2 , Вт.

Пример амплитудной характеристики направленности (АХН) АФАР в полярной системе координат для рабочей частоты сигнала равной 20 ГГц и диаграмма направленности единичного вибратора в азимутальной плоскости представлены на *рисунке 2*.

Оценивание непреднамеренных помеховых воздействий на радиоэлектронные средства (РЭС) КА ССК реализуется в несколько этапов:

1. Определение числовых значений характеристик АФАР. При этом требуется последовательное решение следующих задач:

- расчет сдвига фаз между токами соседних вибраторов в азимутальной плоскости при заданных значениях азимута θ_0 и угла места АР α_0 :

$$\Psi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} d_1 \cdot \sin(\theta_0) \cdot \cos(\alpha_0) \quad (1)$$

- вычисление сдвига фаз между токами соседних вибраторов в угломестной плоскости при заданных значениях азимута θ_0 и угла места АР α_0 :

$$\Psi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} d_2 \cdot \sin(\theta_0) \cdot \sin(\alpha_0) \quad (2)$$

Таблица 1
Исходные данные

Обозначение	Физический смысл обозначения
$\lambda, \text{ м}$	– рабочая длина волны излучения
$d_r, \text{ м}$	– расстояние между излучателями в азимутальной плоскости (для нормального направления луча в синфазной решетке)
$d_z, \text{ м}$	– расстояние между излучателями в угломестной плоскости (для нормального направления луча в синфазной решетке)
$L, \text{ м}$	– длина плеча
n_2	– количество элементов антенной решетки в угломестной плоскости
n_1	– количество элементов антенной решетки в азимутальной плоскости
η	– коэффициент полезного действия ФАР
$P_{cl}, P_{cr}, \text{ Вт}$	– энергопотенциал передающего устройства на космическом аппарате (КА) ССК
$D_{\text{нр}}, \text{ м}$	– наклонная дальность между станцией помех и КА ССК
$D_{\text{нс}}, \text{ м}$	– наклонная дальность между передатчиком сигнала и КА ССК
K_n	– коэффициент подавления
γ	– коэффициент поляризации приемного устройства КА и ЗС ССК
β	– коэффициент использования специального сигнала ЗС ССК

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

- расчет нормированной АХН АР:

$$d_0(\theta, \alpha) = \frac{1}{n_1 \cdot n_2} \cdot \frac{\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} L \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\theta)\right] - \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} L\right)}{\sqrt{1 - \sin^2(\alpha) \cdot \sin^2(\theta)}},$$

$$\frac{\sin\left[\frac{n_1 \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} d_1 \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\alpha) - \Psi_1\right)}{2}\right]}{\sin\left[\frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda} d_1 \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\alpha) - \Psi_1\right)}{2}\right]} \cdot \frac{\sin\left[\frac{n_2 \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} d_2 \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\alpha) - \Psi_2\right)}{2}\right]}{\sin\left[\frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda} d_2 \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\alpha) - \Psi_2\right)}{2}\right]}, \quad (3)$$

где α – угол места;

θ – азимут. Углы α и θ характеризуют положение дифракционных максимумов ДН;

- вычисление амплитудной характеристики направленности вибратора $f_{10}(\theta, \alpha)$ при ориентации вибратора вдоль оси Y [1]:

$$f_{10}(\theta, \alpha) = \frac{\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} \cdot L \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\theta)\right] - \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot L\right)}{\sqrt{1 - \sin^2(\alpha) \cdot \sin^2(\theta)}}. \quad (4)$$

- расчет множителя системы $f_{20}(\theta, \alpha)$ в случае синфазного и равноамплитудного возбуждения вибраторов [1,2]:

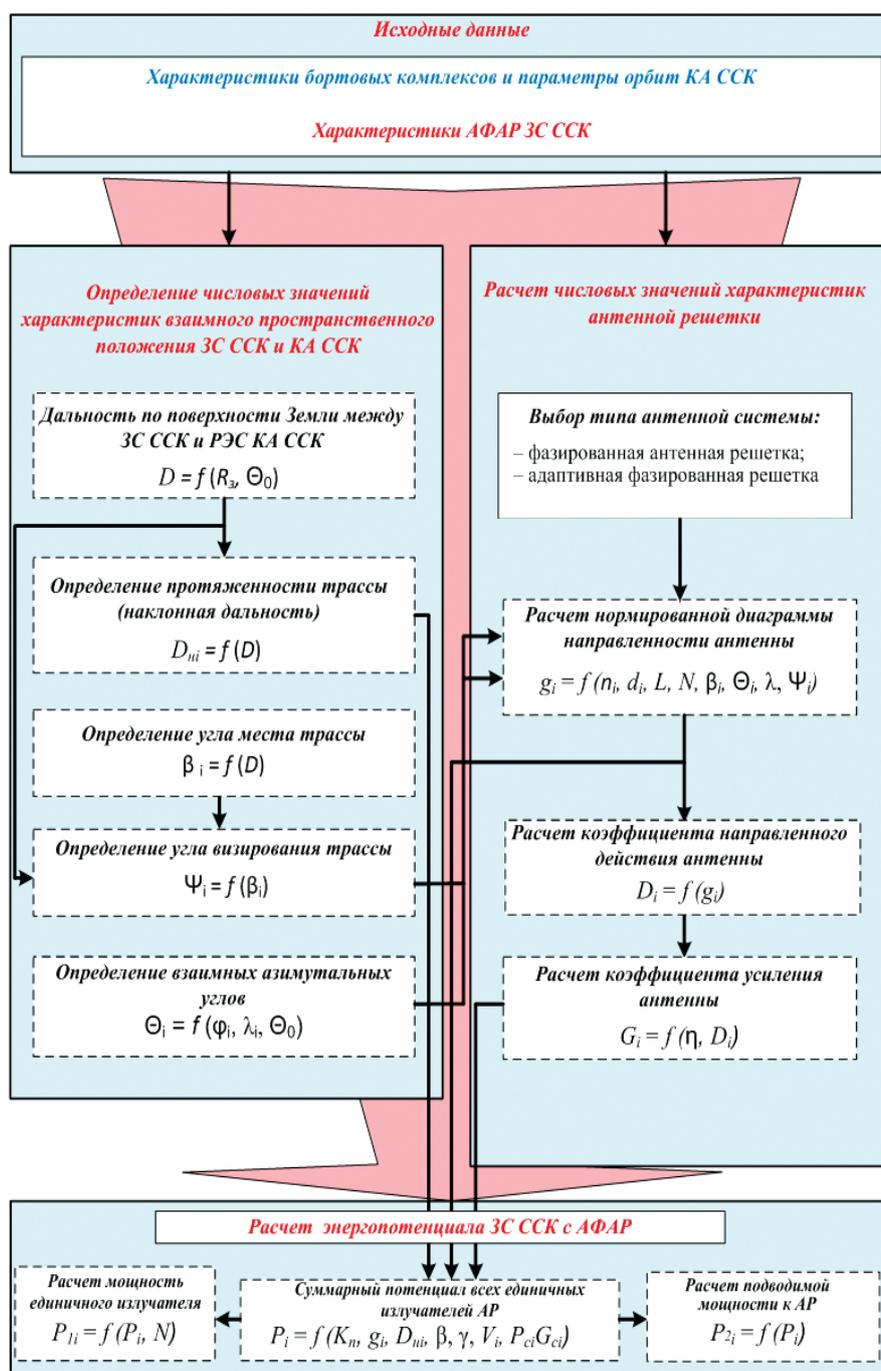


Рис. 1. Модель процесса функционирования АФАР ЗС ССК

$$f_{20}(\theta, \alpha) = \frac{\left| \frac{\sin \left[\frac{n_1 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot d_1 \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\alpha) - \Psi_1 \right)}{2} \right]}{\sin \left[\frac{\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot d_1 \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\alpha) - \Psi_1 \right)}{2} \right]} \cdot \frac{\sin \left[\frac{n_2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot d_2 \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\alpha) - \Psi_2 \right)}{2} \right]}{\sin \left[\frac{\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot d_2 \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\alpha) - \Psi_2 \right)}{2} \right]} \right|}{\left| \frac{\sin \left[\frac{n_1 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot d_1 \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\alpha) - \Psi_1 \right)}{2} \right]}{\sin \left[\frac{\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot d_1 \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\alpha) - \Psi_1 \right)}{2} \right]} \cdot \frac{\sin \left[\frac{n_2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot d_2 \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\alpha) - \Psi_2 \right)}{2} \right]}{\sin \left[\frac{\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot d_2 \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\alpha) - \Psi_2 \right)}{2} \right]} \right|} \quad (5)$$

- вычисление КНД в направлении максимального излучения ФАР [1]:

$$D_0 = \frac{4\pi \cdot (n_1 \cdot n_2)^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi (f_{10}(\theta, \alpha) \cdot f_{20}(\theta, \alpha))^2 \cdot \sin(\theta) \cdot d\theta \cdot d\alpha} \quad (6)$$

- расчет коэффициента усиления ФАР $G_{н1}$, Вт:

$$G_{н1} = \eta D_0,$$

где η – КПД фазированной антенной решетки.

2. Определение энергопотенциала АФАР ЗС ССК. При определении мощности непреднамеренных помех ЗС ССК на входе приемного устройства КА ССК $P_{\text{пвхсч}}$ необходимо учитывать отличия приема специального сигнала ЗС ССК по сравнению с приемом сигнала ЗС ССК.

Во-первых, прием сигнала осуществляется по основной лепестку диаграммы направленности бортовой антенны, а помеха поступает, как правило, по боковым лепесткам и ее ослабление учитывается коэффициентом $g_{bl}(\alpha, \theta)$, который определяет уровень боковых лепестков нормированной диаграммы направленности бортовой приемной антенны КА ССК [3].

Во-вторых, антенны приемного устройства

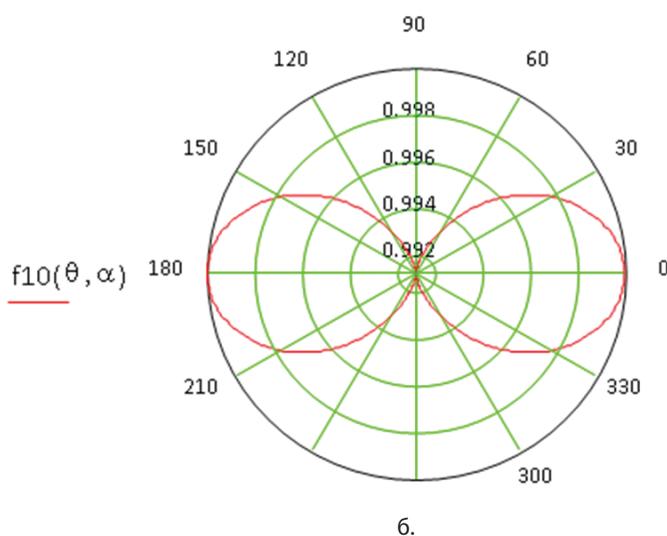
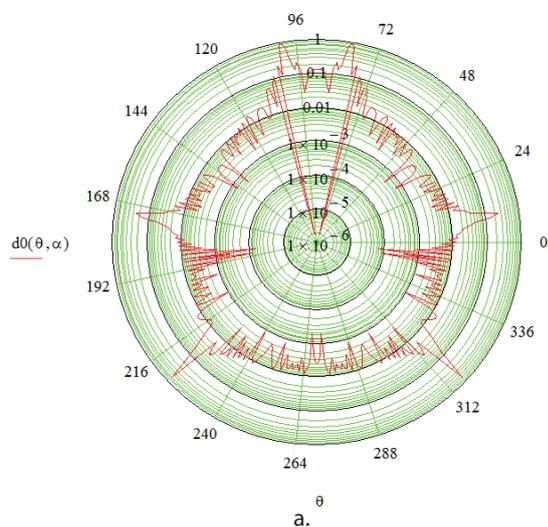


Рис. 2. а – диаграмма направленности единичного вибратора; б – нормированная амплитудная характеристика направленности АФАР в полярной системе координат

КА ССК и ЗС ССК могут различаться по поляризации. Степень этого различия определяется коэффициентом γ_{bl} , который принимает значения от 0 до 1. Если различия по поляризации не установлены, то принимают $\gamma_{bl} = 0,5$. Кроме того, непреднамеренные помехи воздействующие на ЗС ССК и сигнал КА ССК, могут различаться по частотному спектру, что учитывается коэффициентом использования сигнала ЗС ССК:

$$\beta = \begin{cases} \frac{\Delta f_{\text{прм}}}{\Delta f_{\text{п}}}, & (\Delta f_{\text{п}} \geq \Delta f_{\text{прм}}) \\ 1, & (\Delta f_{\text{п}} \leq \Delta f_{\text{прм}}) \end{cases} \quad (7)$$

где $\Delta f_{\text{прм}}$ – полоса частот приемника КА ССК; $\Delta f_{\text{п}}$ – полоса частот специального сигнала ЗС ССК.

Обоснование технических требований к ЗС ССК

На рисунке 3 представлено взаимное расположение ЗС ССК и КА ССК.

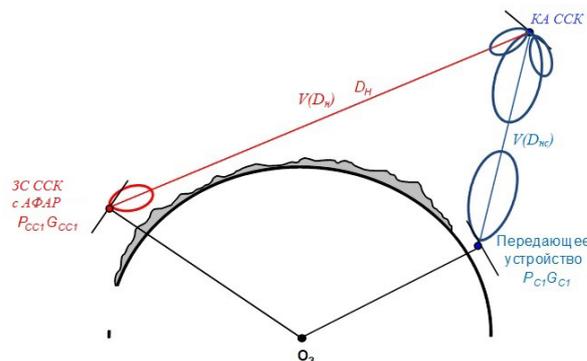


Рис. 3. Взаимное расположение ЗС ССК и КА ССК

Для КА ССК характерно свойство квазилинейности, которое сохраняет неизменным значение отношения помеха/сигнал на входе и вы-

ходе этих устройств. Исходя из этого, на входе приемного устройства КА ССК отношение мощности специального сигнала ЗС ССК к мощности сигнала ССК вычисляется по формуле:

$$\left\{ \frac{P_{cc}}{P_c} \right\}_{\text{вх сс1}} = K_n = \frac{P_{cc1} G_{cc1} g_{b1}(\alpha, \theta) D_{nc}^2 \gamma_{b1} \beta V(D_n)}{P_{c1} G_{c1} D_n^2 V(D_{nc})}, \quad (8)$$

где $P_{c1} G_{c1}$ – энергопотенциал передающего устройства на КА ССК, Вт;

$P_{cc1} G_{cc1}$ – энергопотенциал ЗС ССК, Вт;

D_n – наклонная дальность между ЗС ССК и КА ССК, м;

D_{nc} – наклонная дальность между устройством передачи и КА ССК, м;

$V(D_n)$ – коэффициент, учитывающий рассеяние электромагнитной энергии в пространстве на трассе распространения ЗС ССК и КА ССК, дБ;

$V(D_{nc})$ – коэффициент, учитывающий рассеяния электромагнитной энергии в пространстве на трассе распространения между передающим устройством и КА ССК, дБ;

K_n – коэффициент подавления.

Энергопотенциал ЗС ССК по формуле, Вт:

$$S_p = \frac{K_n \cdot P_{c1} G_{c1} D_n^2 V(D_{nc})}{g_{b1}(\alpha, \theta) D_{nc}^2 \gamma_{b1} \beta V(D_n)}, \quad (9)$$

Этапы определения подводимой мощности к АФАР ЗС ССК:

1. Расчет суммарного потенциал всех единичных излучателей [2] P_s , Вт:

$$P_s = \frac{S_p}{G_{\pi 1}} \quad (10)$$

2. Расчет мощности единичного излучателя P_1 , Вт:

$$P_1 = \frac{P_s}{N} \quad (11)$$

3. Расчет подводимой мощности к АФАР P_2 , с учетом КПД (равного ~40-50%) Вт:

$$P_2 = P_s \cdot \frac{100}{40} \quad (12)$$

Представленный порядок расчета подводимой мощности к АФАР позволяет определить энергетический бюджет перспективных антенн при обосновании технических требований к средствам радиоэлектронного оборудования КА и наземной инфраструктуры ССК.

Заключение

В статье представлена модель процесса функционирования АФАР. Использование модели этапе проектирования ССК позволит определить следующие характеристики оборудования:

- минимальную ширину основного луча, которая важна при формировании многолучевой диаграммы направленности;
- уровень боковых лепестков;
- направленные свойства АФАР.

Применение результатов моделирования позволит обосновать технические требования к ЗС ССК, при обеспечении значений энергетических и масса-габаритных характеристик антенн, такие как:

- количество и мощности единичных излучателей;
- шаг между излучателями;
- уровень потребляемой и подводимой мощности.

Литература

1. Кубанов В.П. Направленные свойства антенных решеток. Самара: ПГУТИ, 2015. 56 с.
2. Пантенков Д.Г., Гусаков Н.В. Компьютерное моделирование активной фазированной антенной решетки // Космическая техника и технологии, 2013. №1. С.32- 37.
3. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны. М.: Радиотехника, 2006. 376 с.



УДК 621.391

АНАЛИЗ ПРОХОЖДЕНИЯ СИГНАЛОВ ПО ФАНТОМНОЙ ЛИНИИ

ANALYSIS OF SIGNAL TRANSMISSION ALONG THE PHANTOM LINE



Александр Юрьевич Выкрест

сотрудник
ФГКВОУВО «Академия ФСО РФ»
Адрес: 302015, г. Орёл,
ул. Приборостроительная, д. 35
Тел.: +7 (953) 625-36-17
Email: suvorovvip@yandex.ru

Олег Николаевич Катков

кандидат технических наук
сотрудник
ФГКВОУВО «Академия ФСО РФ»

Кирилл Александрович Батенков

доктор технических наук, доцент
сотрудник
ФГКВОУВО «Академия ФСО РФ»

Андрей Алексеевич Афанасьев

доктор технических наук, доцент
сотрудник
ФГКВОУВО «Академия ФСО РФ»

Аннотация

В современных условиях развития телекоммуникационного оборудования появилась необходимость в увеличении скорости передачи данных на участке абонентской линии с использованием технологии передачи данных по медному кабелю. Это можно реализовать при помощи использования фантомной линии. Для обеспечения высокой скорости передачи на максимальные расстояния необходимо учитывать взаимные влияния между всеми цепями в линии. В данной работе рассмотрено, как параметры линии влияют на переходные помехи и, как следствие, на скорость передачи данных.

Ключевые слова: фантомная линия, переходные помехи, цифровые абонентские линии.

Summary

In modern conditions of development of telecommunication equipment, there is a need to increase the speed of data transmission on the subscriber line section using data transmission technology over copper cable. This can be done by using a phantom line. To ensure high transmission speeds over maximum distances, it is necessary to take into account the mutual influences between all the circuits in the line. In this paper, we consider how the line parameters affect transient interference and, as a result, the data transfer rate.

Keywords: phantom line, transition disturbance, digital subscriber lines.

В настоящее время все сети связи строятся на основе цифровых технологий, которые постоянно развиваются. Пользователи заинтересованы в использовании мультисервисных терминалов. Соответственно, это влечет к необходимости увеличения скорости передачи. Одновременно с этим решается вопрос минимизации затрат на использование той или иной технологии. Семейство технологий xDSL направлены на оптимальное использование абонентской цифровой линии. В качестве дополнения к данным технологиям с целью увеличения скорости исследуются различные способы, касающиеся как роста размерности пространства используемых сигналов, так и вариативности путей передачи. Одна из них – использование фантомной линии. Фантомная линия в проводной связи – электри-

ческая цепь, которая образует соединения какого-либо источника сигналов с их приемником по цепям, соединяющим другие источники и приемники сигналов, за счет включения в эти цепи электрических трансформаторов со средней точкой во вторичной обмотке. В ходе эксперимента удалось подтвердить пригодность фантомной линии для передачи сигналов, а также выявить зависимость рабочего затухания линии в целом от параметров фантомной линии.

Для создания имитационной модели используется программный продукт Multisim. Данный программный пакет способен корректно моделировать различные электрические схемы, проводить измерения основных электрических параметров сигналов, передаваемых по электрическим цепям.

В ходе проведения эксперимента была собрана элементарная фантомная линия (рисунк 1), состоящая из двух пар, каждая из которых представляется в виде витой пары [1]. За счет включения в средние точки трансформаторов T1, T2, T3, T4 образуется фантомная линия [2]. Для исследования прохождения сигналов по данной линии используется 4-х каналный осциллограф.

Рассмотрим работу данной линии. Для этого проанализируем сигналы на разных участках линии. Для примера возьмем участок длинной линии с распределенными параметрами, приведенный на рисунке 2. Для начала рассмотрим линию без моделирования взаимных помех между парами. Поэтому емкости между цепями зададим равными 0, а проводимость между цепями бесконечно большими значениями.

На вход данной системы подадим 3 сигнала одинаковых по амплитуде, среднеквадратичное значение которой равно 5В. Частоты подаваемых сигналов соответственно равны 50, 100 и 120 кГц. При помощи встроенного в программу Multisim осциллографа, можно наблюдать временное представление данных сигналов (рисунк 3). На графике представлены пиковые значения амплитуды.

$$U_{PK} = U_{RMS} \cdot \sqrt{2} = 5 \cdot \sqrt{2} = 7,07 \text{ В}$$

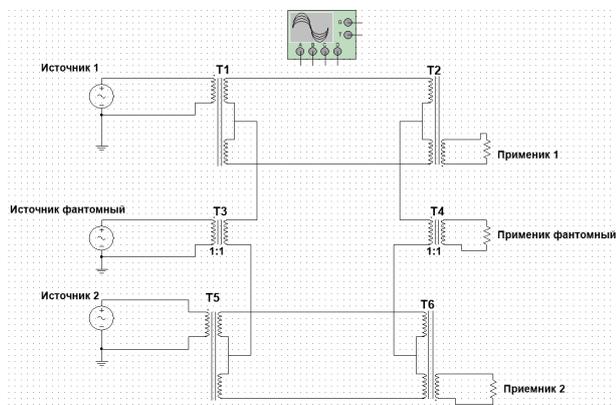


Рис. 1. Схема фантомной линии

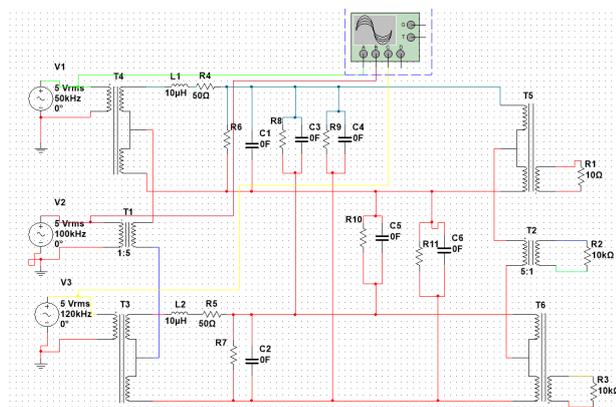


Рис. 2. Схема рассматриваемой длинной линии

Зеленым и желтым цветами на графике изображены сигналы с первого и третьего передатчика соответственно. Красным цветом выделен сигнал, вводимый передатчиком фантомной линии.

После прохождения сигналов через трансформаторы они суммируются в линии. В этом можно убедиться при помощи осциллограммы с участка длинной линии (рисунк 4).

На графике наблюдаются биения, что говорит о том, что в линии присутствует смесь нескольких сигналов, различной по частоте.

Затем данный суммарный сигнал проходит через линию с заданными параметрами и разделяется на трансформаторах, находящихся на приемной стороне. Сигналы, выделенные на приемной стороне, изображены на рисунке 5. При этом цвета, указывающие на конкретный приемник, аналогичны заданным на передающей стороне.

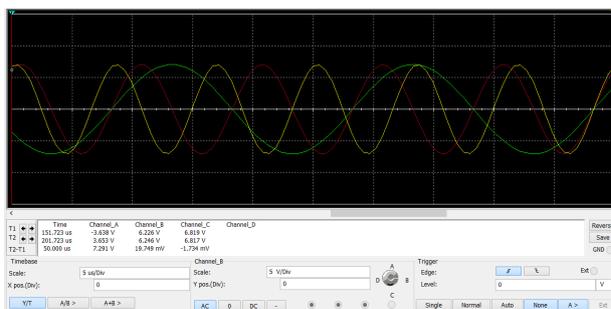


Рис. 3. Временное представление входных сигналов

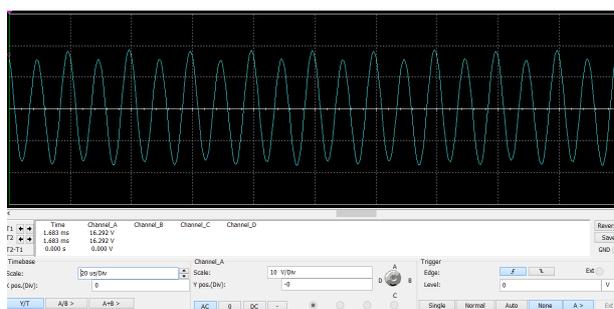


Рис. 4. Временное представление суммарного сигнала от трех передатчиков

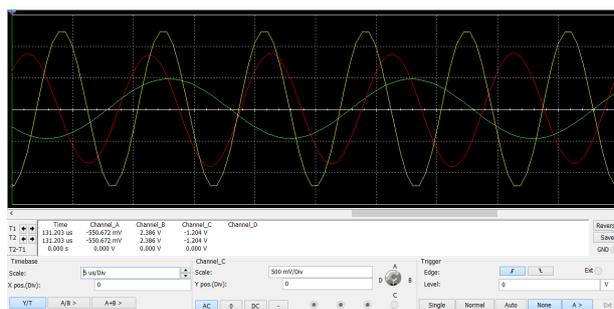


Рис. 5. Временное представление сигналов на приемной стороне

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Если их сравнить, то они будут идентичны по частоте. Различие будет лишь в амплитуде, из-за потерь на омическое сопротивление линии, а также в фазе сигнала из-за влияния индуктивной составляющей полного сопротивления линии.

Данный эксперимент демонстрирует возможность построения фантомной линии. Причем с использованием N физических каналов, можно получить $2N-1$ фантомных каналов.

Далее предлагается рассмотреть случай, когда в данной системе присутствуют взаимные влияния, которые в модели длинных линий моделируются, как колебательные контуры из емкости и проводимости.

Следующий этап исследования состоит в изучении изменений, происходящих с формой сигнала на разных участках фантомной линии при рассмотрении ее с учетом взаимных влияний между цепями. Ведь в реальном мире данная модель фантомной линии имеет много дополнительных характеристик, которые необходимо учитывать для обеспечения необходимого каче-

ства передачи. Итак, для того, чтобы учесть взаимные влияния между цепями, воспользуемся конденсаторами, которые как раз и показывают данные влияния, назначим значения их емкости отличными от нуля. При этом можно отметить, что с увеличением емкости конденсаторов, величина взаимного влияния будет увеличиваться. Рассмотрим данное явление на примере.

На вход нашей системы подадим те же сигналы, что и в первой части исследования.

Для простоты и наглядности рассмотрим случай, когда все емкости равны. Хотя на самом деле емкость, описывающая взаимные влияния между цепями будет напрямую зависеть от расстояния между ними, исходя из формулы емкости конденсатора. В данном эксперименте нас не интересуют сигналы, формируемые на передающей стороне, и смесь сигналов в канале, так как на них данные взаимные влияния не оказывают никакого воздействия. Большие изменения должны быть у сигналов на соответствующих приемниках, так как за счет взаимных влияний происходит проникновение дополнительных гармоник в суммарный сигнал, за счет чего его

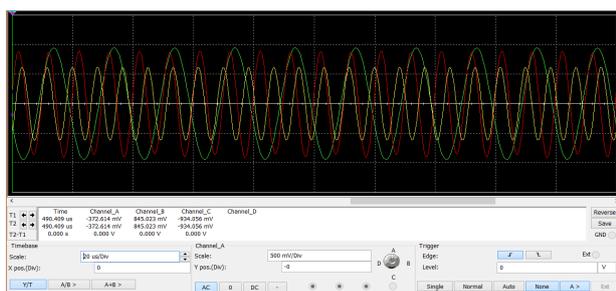


Рис. 6. Временное представление сигналов на приемной стороне

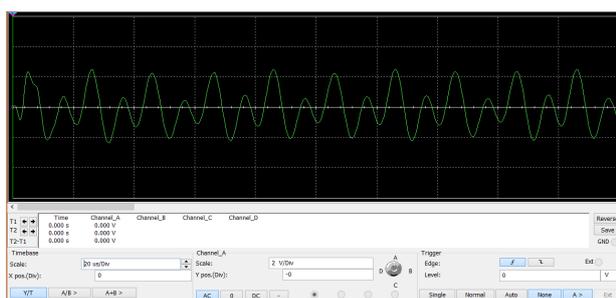


Рис. 7. Временное представление сигнала приемника №1

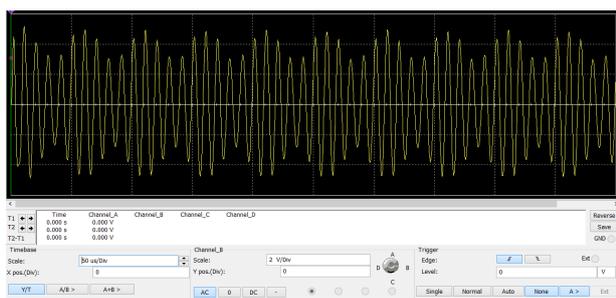


Рис. 8. Временное представление сигнала приемника №2

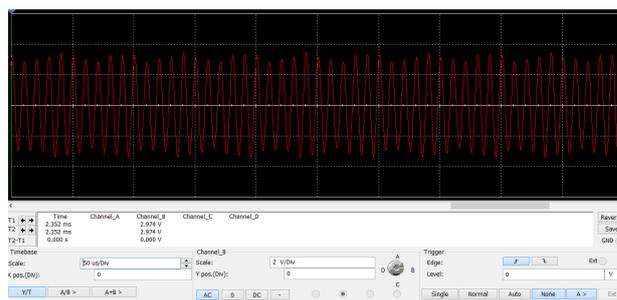


Рис. 9. Временное представление сигнала на приемнике фантомной линии

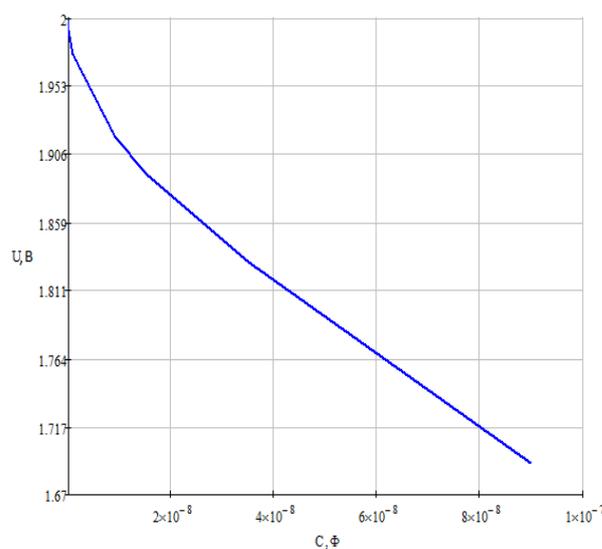


Рис. 10. Зависимость амплитуды биений на приеме от емкости цепи

разделение происходит не строго на те сигналы, которые были сложены на передающей стороне.

Результат представлен на *рисунке 6*.

На *рисунке 6* видно, что при значении емкости 10 пФ заметных изменений в сигнале не наблюдается. Заменим значение емкости на 10 нФ.

Исходя из временных диаграмм (*рисунки 7-9*) видно, что на приемной стороне на каждом приемнике наблюдаются биения. Это говорит о присутствии суммарного сигнала. Это нехорошее явление, помеха, так как это мешает качественному детектированию принятого сигнала.

Для оценки влияния переходных помех с одной цепи на другую можно воспользоваться выражением [1, 2]

$$\begin{bmatrix} U(L) \\ I(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{11}(L) & \phi_{12}(L) \\ \phi_{21}(L) & \phi_{22}(L) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U(0) \\ I(0) \end{bmatrix}$$

где $U(L)$, $I(L)$ и $U(0)$, $I(0)$ – напряжение и ток на выходе и входе цепи соответственно;

$\phi_{11}(L)$, $\phi_{12}(L)$, $\phi_{21}(L)$, $\phi_{22}(L)$ – матрицы, в которых заложены количественные характеристики переходных помех;

$\phi(L)$ зависит от коэффициента распространения γ , который и зависит от параметров цепи:

$$\gamma(\omega) = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

где R – сопротивление линии на исследуемом участке, которое характеризует омическое сопротивление электрической цепи.

L – индуктивность линии на исследуемом участке, характеризующая магнитное поле, возникающее вокруг провода.

G – проводимость линии на исследуемом участке, которая характеризует сопротивление изоляции.

C – емкость цепи, характеризующее возникающее электрическое поле, которое в данном исследовании и является основной причиной возникновения помех в соседних цепях.

Ω – циклическая частота, на которой производятся измерения.

Таким образом, выявлена зависимость выходного сигнала фантомной линии от входного через первичные параметры цепи [3-5].

В качестве наглядного демонстрация влияния переходных помех на принимаемый сигнал можно привести зависимость амплитуды биений на входе приемника от величины емкости, которая представляет из себя сами переходные помехи. Данная зависимость была рассчитана при помощи математического программного обеспечения Mathcad 14.0 для линии со следующими параметрами:

$$U_{\text{вх}} = 2\text{В}, L = 15\text{мкГн}, R = 400\text{Ом}, G = 10\text{МСм}, \\ F_1 = F_2 = F_3 = 50\text{кГц}$$

Исходя из графика (*рисунок 10*) видно, что

при увеличении емкости, а значит, при усилении взаимных влияний, сигнал на приемник приходит более ослабленный [6,7]. Это приводит к уменьшению соотношения амплитуд сигналов на входе и выходе, соответственно, следовательно, и к уменьшению значения передаточной функции, которая прямо пропорциональна пропускной способности канала.

Для увеличения пропускной способности на участке абонентской линии возможно использовать технологию фантомной линии за счет применения дифференциального включения (с помощью электрических трансформаторов со средней точкой во вторичной обмотке) дополнительного передатчика, так называемого, фантомного [3]. Однако в данной цепи на основе знаний из теории длинных линий можно наблюдать переходные помехи, которые приводят к искажениям сигналов, выражающимся в наличии биений на приеме. Установлено, что величина влияния данных помех на сигнал зависит от коэффициента распространения, который в свою очередь зависит от первичных характеристик самой линии. Данная зависимость очень важна и полезна для дальнейших исследований, а именно для расчета передаточной характеристики канала, которая позволит рассчитать пропускную способность.

Литература

1. Gabara T. «Phantom Mode Signaling in VLSI Systems». Conference on Advanced Research in VLSI, Mar. 2001.
2. Paul C.R. Analysis of Multiconductor Transmission Lines. Wiley-Interscience, NewYork, USA, 1994.
3. Shannon C.E. «A mathematical theory of communication». IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.
4. Батенков А.А., Богачев Г.В., Батенков К.А. Алгоритм синтеза базиса ортонормированных функций для многоканальной передачи данных// Цифровая обработка сигналов, 2007. №2. С.19-25.
5. Батенков А.А., Батенков К.А. Дискретизация линейного канала связи с памятью и аддитивным белым гауссовским шумом численным методом// Математическое моделирование, 2009. Т.1. №1. С.53-74.
6. Батенков К.А., Гусев В.В., Илюшин М.В., Катков О.Н., Мельников А.А., Стремоухов М.В. Границы вероятности символьной ошибки для канала связи с логнормальными замираниями при использовании предсказаний и помехоустойчивого кодирования // Телекоммуникации, 2018. №2. С.45-48.
7. Батенков К.А. Синтез детерминированных нелинейных дискретных отображений непрерывных каналов связи // Труды СПИИРАН, 2016. №2(45). С.75-101.

УДК 621.398.8

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВОИЧНЫХ СВЕРТОЧНЫХ И БЛОЧНЫХ КОДОВ ПРИ МЯГКОМ И ЖЕСТКОМ ДЕКОДИРОВАНИИ

METHOD FOR ASSESSING THE ENERGY EFFICIENCY OF BINARY CONVENTIONAL AND BLOCK CODES WITH SOFT AND HARD DECODING

Владимир Владимирович Зеленецкий
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

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: chernousov@mail.ru

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

Юрий Владимирович Зеленецкий
доктор технических наук, доцент
научный сотрудник
ВА РВСН имени Петра Великого
Адрес: 143900, Московская обл.,
г. Балашиха, ул. Карбышева, д.8
Тел.: +7 (903) 721-12-61
E-mail: sys1434@mail.ru

Владислав Владимирович Егоров
младший научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой ударный пер., д. 1а
Тел.: 8 (4967) 35-31-93
E-mail: egorov@iifmail.ru

Аннотация

Получены новые аналитические выражения для оценки вероятности битовой ошибки (помехоустойчивости) на выходе жесткого и мягкого декодеров двоичных сверточных кодов, позволяющие предложить новую методику оценки энергетической эффективности двоичных сверточных и блочных кодов, которая, в отличие от известных, не требует знания передаточной (производящей) функции сверточного кода.

Ключевые слова: длина кодового ограничения, производящая функция кода, скорость кодирования, вероятность битовой ошибки, энергетическая эффективность кода, мягкое и жесткое декодирование.

Summary

New analytical expressions are obtained for estimating the probability of a bit error (noise immunity) at the output of hard and soft decoders of binary convolutional codes, which allow us to propose a new method for estimating the energy efficiency of binary convolutional and block codes, which, unlike the known ones, does not require knowledge of the transfer (generating) convolutional code functions.

Keywords: constraint length, generating code function, coding rate, bit error probability, energy efficiency of the code, soft and hard decoding.

Из теории кодов, исправляющих ошибки, известно [1], что способность блочных (n, k, d_{\min}) кодов к коррекции t ошибок определяется выражением

$$t \geq \left\lceil \frac{d_{\min} - 1}{2} \right\rceil, \quad (1)$$

где n – длина кода;

k – число информационных символов в блочном коде;

d_{\min} – минимальное кодовое расстояние.

Знак равенства в выражении (1) используется при пороговом методе декодирования, а знак «>» –

при декодировании по методу максимального правдоподобия.

При исследовании статистических характеристик декодирования сверточных кодов способность таких кодов к коррекции ошибок нельзя определить так лаконично. Анализируя известное выражение для t применительно к сверточным кодам [1,4]

$$t = \left[\frac{d_f - 1}{2} \right], \quad (2)$$

где d_f – просвет кода.

Можно отметить, что при декодировании по методу максимального правдоподобия сверточный код способен исправить t ошибок в пределах «нескольких» длин кодового ограничения (K – кодовое ограничение, определяемое числом разрядов триггеров в регистре сдвига кодера). Причем «несколько» лежит в пределах от 3 до 5. Точное значение длины кодового ограничения зависит от распределения ошибок в принимаемой двоичной последовательности на входе декодера и в общем случае неизвестно [1,3,4].

На практике для конкретного сверточного кода и модели ошибок длину кодового ограничения можно ограничить с использованием методов передаточной функции кода (производящей функции кода) $T(D)$, где D – в общем случае неопределенный аргумент (заполнитель), зависящий от кодового ограничения K и параметров решетчатой диаграммы сверточного кода. К сожалению, передаточные функции $T(D)$ определяются сложно, особенно с увеличением длины кодового ограничения. Тем не менее, для $K=3$, $d_f=5$, скорости кодирования $1/2$, жесткой схемы принятия решений при декодировании и когерентной схемы демодуляции сигнала с фазовой модуляцией получено выражение для вероятности битовой ошибки в виде [1]:

$$P_b \leq \frac{Q(\sqrt{5h_b^2})}{\left[1 - 2 \exp\left(-\frac{h_b^2}{2}\right) \right]^2}, \quad (3)$$

где $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$;
 h_b^2 – отношение сигнал/шум на бит.

К сожалению, для других параметров сверточного кодирования это выражение использовать нельзя. На практике, если это возможно, вероятность P_b определяют, используя программную среду MatLab (пакет Bertool) [2].

Таким образом, существуют определенные трудности для оценки вероятности P_b при различных конструктивных параметрах сверточных кодов.

Предложим методику оценки вероятности P_b , которая основана на известных принципах формирования сверточных кодов и учитывает конструктивные параметры кодов.

Известно, что влияние входного информационного двоичного символа сообщения распространяется на длину кодового ограничения («окно декодирования») n_0 , которую можно определить по выражению [1]:

$$n_0 = \frac{K}{r} + \frac{(K-1)}{r}, \quad (4)$$

где r – скорость кодирования.

Тогда величина просвета d_f будет определять гарантированную корректирующую способность сверточного кода на длине кодового ограничения n_0 и вероятность битовой ошибки можно определить по известному выражению для блочных кодов [1]

$$P_b \leq \frac{1}{n_0} \sum_{i=t+1}^{n_0} C_{n_0}^i P^i (1-P)^{n_0-i}, \quad (5)$$

где P – вероятность ошибочного приема двоичного символа кода на выходе демодулятора (первой решающей схемы) приемника.

Зададимся сигналом с относительной фазовой модуляцией, для которого значение вероятности P определяется выражением [1]

$$P = e^{-h_b^2} (1 - 0,5e^{-h_b^2}), \quad (6)$$

и оценим энергетическую эффективность сверточных кодов с $r=1/2$ и $r=1/3$ по отношению к безызбыточной передаче. Для этого выберем фиксированные значения P_b ($P_b = const$) и для них определим отношения сигнал/шум (таблица 1), а разницу отношений h_b^2 для безызбыточной и кодированной передачи будем считать количественной оценкой энергетической эффективности v , дБ.

Таблица 1

Оценка энергетической эффективности сверточных кодов при жестком декодировании

P_b	Безызбыточная передача h_b^2	Кодированная передача				
		r	1/2	v , дБ	1/3	v , дБ
		d_f	10		15	
		K	7		7	
		n_0	26		45	
10^{-3}	6,9≅8,39 дБ	$P=0,044; h_b^2=3,124 \equiv 4,95$ дБ		3,44	$P=0,0614; h_b^2=2,79 \equiv 4,46$ дБ	3,93
10^{-5}	11,51≅10,61 дБ	$P=0,016; h_b^2=4,13 \equiv 6,16$ дБ		4,45	$P=0,03; h_b^2=3,51 \equiv 5,5$ дБ	5,11
10^{-7}	16,03≅12,05 дБ	$P=6,15 \cdot 10^{-3}; h_b^2=5,09 \equiv 7,07$ дБ		4,98	$P=0,016; h_b^2=4,13 \equiv 6,16$ дБ	5,89

Анализ результатов расчетов, представленных в *таблице 1*, показывает:

- для уменьшения вероятности P_b требуется увеличивать отношение сигнал/шум и это главный способ увеличения помехоустойчивости как для безыбыточной, так и кодированной передачи (в общем известный результат);

- кодированная передача данных сверточными кодами допускает значительно большую вероятность искажения помехами двоичного символа кода по сравнению с безыбыточной передачей. Например, для обеспечения $P_b=10^{-3}$ при $r=1/2$ допускается $P=0,044$ (выигрыш

$$\frac{0,044}{10^{-3}} = 44 \equiv 16,43 \text{ дБ}),$$

при $r=1/3$ допускается $P=0,0614$ (выигрыш

$$\frac{0,0614}{10^{-3}} = 61,4 \equiv 17,88 \text{ дБ});$$

- с уменьшением скорости кодирования (увеличением избыточности кодирования) эффективность кода ν увеличивается при $P_b=const$. Например, при $P_b=10^{-5}$ код с $r=1/2$ имеет $\nu=4,45$ дБ, а код с $r=1/3$ имеет $\nu=5,11$ дБ;

- с уменьшением P_b эффективность кода с $r=1/3$ увеличивается по сравнению с кодом, имеющим $r=1/2$;

- даже при жесткой схеме принятия решений о декодированном бите эффективность исследованных кодов значительная (при $P_b=10^{-5}$ значение $\nu=5,11$ дБ для $r=1/3$, а известная верхняя граница эффективности при использовании мягкой схемы принятия решения при декодировании по алгоритму Витерби для $K=7$, $r=1/3$ составляет 7 дБ [3,4]).

Представляет интерес сравнение полученных результатов жесткого декодирования сверточных кодов с известными блочными кодами [1]. Пусть используется блочный двоичный код Голея, для которого $n=24$, $k=12$, $d_{min}=8$. Так как скорость кодирования кода Голея $k/n=1/2$, то его можно однозначно сравнить со сверточным кодом с $r=1/2$.

В этом случае вероятность P_b определяется выражением [1]

Таблица 2

Оценки вероятностей P_b , P и h_0^2

P_b	P	h_0^2	ν , дБ
10^{-3}	0,0308	$3,4674 \equiv 5,4$ дБ	2,99
10^{-5}	0,00899	$4,699 \equiv 6,72$ дБ	3,89
10^{-7}	0,00278	$5,8884 \equiv 7,7$ дБ	4,35

Таблица 3

Оценки вероятностей P_b , P и h_0^2

Сверточный код ($r=1/3$), $t=7$	P_b	Блочный код (63,24), $t=7$	ν , дБ
$P=0,0614$; $h_0^2=4,46$ дБ	10^{-3}	$P=0,0456$; $h_0^2=3,062 \equiv 4,86$ дБ	0,4
$P=0,03$; $h_0^2=5,5$ дБ	10^{-5}	$P=0,0224$; $h_0^2=3,785 \equiv 5,78$ дБ	0,28
$P=0,016$; $h_0^2=6,16$ дБ	10^{-7}	$P=0,0118$; $h_0^2=4,426 \equiv 6,46$ дБ	0,3

$$P_b = \frac{1}{n} \sum_{i=t+1}^n C_n^i P^i (1-P)^{n-i} = \frac{1}{24} \sum_{i=4}^{24} C_{24}^i P^i (1-P)^{24-i}.$$

В *таблице 2* представлены оценки вероятностей P_b , P и отношений h_0^2 для блочного кода (24,12,8).

Анализ *таблиц 1* и *2* показывает:

- при одном и том же виде сигнала, жесткой схеме принятия решений о декодировании бита сверточный код с $r=1/2$ превосходит код Голея по эффективности. Например, при $P_b=10^{-5}$ для сверточного кода $\nu=4,45$ дБ, а для кода Голея значение $\nu=3,89$ дБ (выигрыш сверточного кода составляет 0,56 дБ);

- сверточный код с $r=1/2$ допускает большее значение вероятности искажения помехами символа (P) по сравнению с кодом Голея при $P_b=const$ (при $P_b=10^{-3}$ выигрыш составляет

$$\frac{0,044}{0,0308} = 1,43 \equiv 1,55 \text{ дБ};$$

при $P_b=10^{-7}$ выигрыш составляет

$$\frac{6,15 \cdot 10^{-3}}{2,78 \cdot 10^{-3}} = 2,212 \equiv 3,45 \text{ дБ}).$$

Аналогичную процедуру проведем для сравнения вероятностей P_b и отношений h_0^2 сверточного кода с $r=1/3$ и близкого по скорости k/n и числу t блочного циклического кода (63,24) с $d_{min}=15$ ($t=7$) [1]. Результаты сравнения представлены в *таблице 3*.

В *таблице 3* представлены также оценки эффективности ν сверточного кода ($r=1/3$) по отношению к блочному коду (63,24).

Анализ результатов показывает:

- сверточные коды имеют более высокую энергетическую эффективность по сравнению с блочными при одинаковых значениях t и скорости кодирования;

- с увеличением значений d_f при уменьшении r эффективность сверточных кодов возрастает (примерно на 0,5 дБ), что отражено в *таблице 2*.

Полученные оценки с достаточной степенью точности совпадают с результатами имитационного моделирования в программной среде MatLab (пакет Bertool). В частности, для сигнала с фазовой манипуляцией и сверточного кода ($r=1/2$, $K=7$) в программной среде MatLab получены следующие результаты (помеха АБГШ) [2, 3]:

- $P_b=10^{-3}$ и соответствующее $h_0^2=5$ дБ (рас-

четное $h_0^2=4,95$ дБ);

- $P_b = 10^{-5}$ и соответствующее $h_0^2=6,5$ дБ (расчетное $h_0^2=6,16$ дБ);

- $P_b = 10^{-7}$ и соответствующее $h_0^2=7,4$ дБ (расчетное $h_0^2=7,07$ дБ).

В ходе исследования получены аналитические выражения для оценки вероятности битовой ошибки на выходе декодера Витерби для мягкой схемы декодирования сверточных кодов [2]:

$$P_b \approx \frac{1}{n_0} \sum_{i=2t}^{n_0} C_{n_0}^i i P^i (1-P)^{n_0-i} \text{ при } P_b > 10^{-4}; \quad (7)$$

$$P_b \approx \frac{1}{n_0} \sum_{i=2t+1}^{n_0} C_{n_0}^i i P^i (1-P)^{n_0-i} \text{ при } P_b < 10^{-4}. \quad (8)$$

В таблице 4 представлены результаты оценки эффективности сверточных кодов для мягкой схемы декодирования.

Сравнительная оценка результатов, представленных в таблицах 1 и 4, показывает:

- мягкая схема декодирования сверточных кодов позволяет получить энергетический выигрыш кодирования при $P_b=const$ больше 5 дБ по сравнению с безызбыточной передачей и примерно 2 дБ по сравнению с жесткой схемой декодирования;

- с повышением требований на помехоустойчивость приема данных (уменьшение вероятности P_b) энергетический выигрыш мягкого декодирования возрастает (например, при $P_b=10^{-3}$ для сверточного кода с $r=1/3$ и жесткой схеме декодирования значение $v=3,93$ дБ, а при мягкой схеме декодирования значение $v=5,95$ дБ; при $P_b=10^{-7}$ и тех же параметрах кода для жесткой схемы декодирования значение $v=5,89$ дБ, а при мягкой схеме декодирования значение $v=7,98$ дБ);

- мягкая схема декодирования сверточных кодов допускает и большую вероятность искажения помехами двоичного символа по сравнению с жесткой (например, при $P_b=10^{-3}$ и кода с $r=1/2$ для жесткой схемы декодирования значение $P=0,044$, а для мягкой схемы декодирования значение $P=0,1$ т.е. выигрыш равен $0,1/0,044=2,27 \approx 3,57$ дБ).

Полученные оценки вероятностей P_b по выражениям (7) и (8) с достаточной степенью точности совпадают с результатами имитационного моделирования в программной среде Matlab (пакет VerTool).

В частности, для сигнала с относительной фазовой модуляцией и сверточного кода $r=1/2$, $k=7$, помеха АБГШ в программной среде Matlab получены следующие результаты [2]:

- $P_b=10^{-3}$ соответствует значению $h_0^2=3,3$ дБ (расчетное значение $h_0^2=3,39$ дБ);

- $P_b=10^{-5}$ соответствует $h_0^2=4,09$ дБ (расчетное значение $h_0^2=4,19$ дБ).

Мягкое декодирование блочного двоичного кода Голя, для которого $n=n_0=24$, $k=12$, $d_{min}=8$, скорость кодирования $r=1/2$ позволяет получить следующие оценки P_b и соответствующие им значения вероятности P , отношения h_0^2 и v (дБ), представленные в таблице 5.

Так как сверточный код с $r=1/2$ имеет скорость кодирования, равную скорости кодирования для кода Голя, то можно однозначно сравнить их эффективность по сравнению с безызбыточной передачей:

- при $P_b=10^{-3}$ безызбыточная передача требует $h_0^2=8,39$ дБ, сверточный код требует $h_0^2=3,39$ дБ, а блочный код Голя требует $h_0^2=4,216$ дБ, т.е. энергетический выигрыш в эффективности мягкого декодирования сверточного кода с $r=1/2$ по сравнению с кодом Голя составляет 0,826 дБ;

- при $P_b=10^{-7}$ соответственно энергетический выигрыш сверточного кода с $r=1/2$ по отношению к коду Голя составляет 0,811 дБ.

Выводы:

- получены новые аналитические выражения для оценки вероятности битовой ошибки жесткой

Таблица 5

Оценки P_b и h_0^2 для мягкой схемы декодирования кода Голя

P_b	P	h_0^2	v , дБ
10^{-3}	0,066	$2,64 \approx 4,216$ дБ	4,174
10^{-5}	0,041	$3,155 \approx 4,99$ дБ	5,62
10^{-7}	0,02	$3,89 \approx 5,9$ дБ	6,15

Таблица 4

Оценка энергетической эффективности сверточных кодов при мягком декодировании

P_b	Безызбыточная передача h_0^2	Кодированная передача				
		r	1/2	v , дБ	1/3	
		d_t	10		15	
		K	7		7	
		n_0	26		45	
10^{-3}	$6,9 \approx 8,39$ дБ	$P=0,01; h_0^2=2,183 \approx 3,39$ дБ		5	$P=0,1432; h_0^2=1,757 \approx 2,44$ дБ	5,95
10^{-5}	$11,51 \approx 10,61$ дБ	$P=0,067; h_0^2=2,63 \approx 4,19$ дБ		6,42	$P=0,1047; h_0^2=2,128 \approx 3,28$ дБ	7,33
10^{-7}	$16,03 \approx 12,05$ дБ	$P=0,038; h_0^2=3,228 \approx 5,089$ дБ		6,961	$P=0,0718; h_0^2=2,553 \approx 4,07$ дБ	7,98

кого и мягкого декодера Витерби, которые, в отличие от известных, не требуют знания производящей функции сверточного кода;

- установлена пригодность полученных аналитических выражений для оценки вероятности битовой ошибки мягкого декодера как сверточных, так и блочных кодов;

- предложено аналитическое выражение, определяющее длину кодового ограничения («окна декодирования») по конструктивным параметрам сверточного кодера;

- определен показатель энергетической эффективности кодирования, который, в отличие от известных, учитывает новые аналитические выражения для оценки вероятности битовой ошибки как мягкого, так и жесткого декодера двоичного кода;

- проведена сравнительная оценка энергетической эффективности кодирования данных двоичными сверточными и блочными кодами, при этом установлен энергетический выигрыш сверточного кодирования по отношению к блочному кодированию и безызбыточной передаче данных;

- проведена проверка (верификация) полученных статистических оценок декодирования с результатами имитационного моделирования в программной среде Matlab (пакет Bertool), которая показала достаточную для практики сходимость результатов.

Литература

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд., испр. / Пер. с англ. М.: Издат. дом «Вильямс», 2017. 1104 с.
2. Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В. Имитационное моделирование процессов декодирования двоичных блочных и сверточных кодов и оценка их эффективности// Известия Института инженерной физики, 2009. №4(14). С.56-60.
3. Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В. Прасолов В.А. Энергетическая эффективность сверточных кодов в дискретных системах связи// Известия Института инженерной физики, 2010. №1(15). С.34-38.
4. Кларк Дж., Кейн Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи/ Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987. 392 с.



ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 621.396.7

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДОСТУПНОСТИ
СИСТЕМЫ СВЯЗИ ПРИ
СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОМ
ВАРИАНТЕ ЕЕ ПОСТРОЕНИЯ**

**RESEARCH ON THE
AVAILABILITY OF THE
COMMUNICATION SYSTEM
IN THE NETWORK-CENTRIC
VERSION OF ITS CONSTRUCTION**

Денис Александрович Козориз

ведущий научный сотрудник
ФГБУ «16 ЦНИИИ» МО РФ
Адрес: 141006, Московская обл., г. Мытищи,
ул. Комарова, д. 17
Тел.: 8 (905) 754 42 84
E-mail: kozda@mail.ru

Аннотация

Спецификой сетецентрической системы связи военного назначения является быстрый и гарантированный доступ пользователей к ее услугам. Доступность системы связи позволяет обеспечивать должностным лицам органов военного управления и оперативному составу пунктов управления различных звеньев возможность использования ресурсов сетей связи (видов связи) в зоне ответственности объединения при сохранении установленных приоритетов и способов установления связи. В представленной работе исследуются сети с использованием предложенной ранее методики анализа на основе теории массового обслуживания.

Ключевые слова: доступность, самоорганизующиеся динамические сети, самоорганизация, массовое обслуживание, узлы.

Summary

The specifics of a network-centric military communication system are fast and guaranteed user access to its communication services. The availability of the communication system allows to provide officials of bodies of military management and operational structure of the control points of the various branches the ability to use the resources of communication networks (communication) in the area of responsibility of enterprises while maintaining established priorities and ways of communication. In this paper, we study networks using the previously proposed analysis methodology based on the theory of queuing.

Keywords: availability, self-organizing dynamic networks, self-organization, queuing, nodes.

Система связи – организационно-техническое объединение сил и средств связи, создаваемое для обеспечения управления войсками. Система связи является основой системы управления войсками [1].

Основными принципами развития системы связи являются [2]:

- формирование системы связи, как составной части системы управления в интересах создания единого информационного пространства в полном объеме обеспечивающей потребности;
- переход от «централизованной» архитектуры системы связи к построению «сетецентрической» – единой интегрированной информационно-телекоммуникационной системы;
- применение стандартизованных унифицированных системно-технологических и про-

граммно-аппаратных решений, с единой номенклатурой типовых каналов связи и трактов передачи.

Данные принципы обусловлены тем, что тактика современных войн базируется на проведении сетецентрических боевых операций, которые характеризуются распределением войск по большим территориям, информационным превосходством, позволяющими быстро формировать группировку войск в соответствии с поставленными задачами [3].

В основе эффективности сетецентрических операции находится высокий уровень ситуационной осведомленности. Результативность применения тактического воинского формирования определяется эффективной связностью объектов и подразделений, благодаря использованию

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

образованной сети, обладающей высокоскоростной передачей цифровой информации, обеспечивающей видео и речевую связь, а также определение местоположение объектов в реальном времени [9-12].

При сетевом варианте операции структура войск не будет постоянной, а будет формироваться в зависимости от обстановки и выполняемых задач. Такой принцип формирования структуры передовых войсковых подразделений был внедрен еще в конце Великой Отечественной войны, когда формировались крупные авиационные соединения, которые поддерживали действия различных общевойсковых соединений на наиболее важных направлениях.

Исходя из принципов формирования войск, система связи формируется подобным образом. Все существующие средства связи объединяются в общую сеть, используемую всем должностными лицами. Вариант сетевого построения тактического воинского формирования представлен на рисунке 1 [4].

Анализ динамики проведения сетевых операций показывает, что эта сеть должна быть всеохватывающей, безопасной, несущей достоверную информацию, устойчивой, защищенной и иметь высокую пропускную способность. Это предполагает наличие многорежимной коммуникационной среды с динамической маршрутизацией, с применением многократной ретрансляции, с обеспечением связи вне области прямой видимости. Она должна быть также адаптивной и самоуправляемой при сбоях на узлах и линиях и обеспечивать качество услуг, гарантированное при данной пропускной способности, надежности, задержке, приоритете. Командиры могут располагаться в любом удоб-

ном месте и организовывать совместную работу на виртуальных пунктах управления.

Данная схема организации связи не раскрывает структуру управления и имеет повышенную скрытность, при этом логическая структура выполняется в полном объеме.

Из всего множества свойств системы связи наиболее существенными, достаточно полно характеризующими их основное функциональное предназначение, являются: боевая готовность, устойчивость, пропускная способность, мобильность и разведзащищенность системы военной связи [5].

Спецификой сетевого варианта системы связи военного назначения является быстрый и гарантированный доступ пользователей к ее услугам связи. Таким образом, возникает необходимость введения в характеристики системы связи нового свойства – доступности.

Доступность – способность системы связи обеспечивать должностным лицам органов военного управления и оперативному составу пунктов управления различных звеньев возможность использования ресурсов сетей связи (видов связи) в зоне ответственности объединения при сохранении установленных приоритетов и способов установления связи [1].

Следует отметить, что сетевая система связи по отношению к иерархической системе связи военного назначения обладает такими же основными характеристиками, но при этом обеспечивает большую доступность и самоорганизацию.

Известно, что доступность достигается [6]:

- рациональным выбором состава и структуры системы связи;
- определением зон пространственной до-

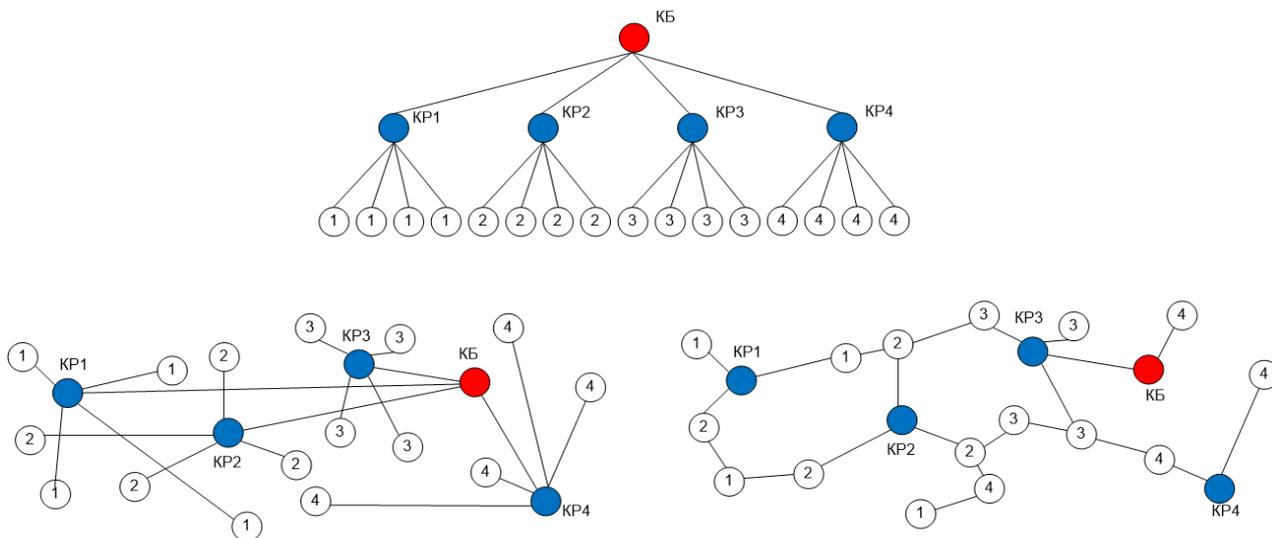


Рис. 1. Сетевый вариант построения тактического воинского формирования (КБ, КР1-4 – командиры условных подразделений)

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ступности узлов и ретрансляционных пунктов связи, частотно-территориальным планированием применения радиосредств;

- планированием распределения ресурсов системы связи с учетом потребностей и динамики перемещения пунктов управления;
- своевременным развертыванием и поддержанием в постоянной готовности окончательных средств связи на узлах связи пунктов управления и обеспечением должностных лиц органов военного управления необходимыми документами на право пользования различными видами связи, получения (ввода) информации.

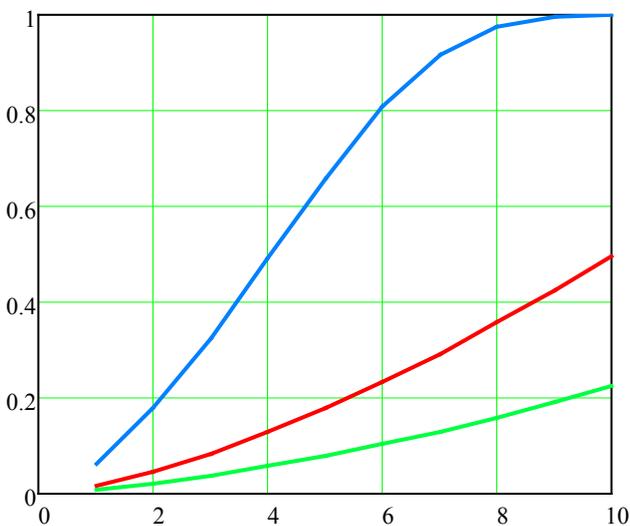


Рис. 2. Зависимость вероятности доступа от количества каналов S при $\psi=5$, $K=3$ и различном максимальном радиусе зоны связи: кривые 1) $R_m=1$; 2) $R_m=2$; 3) $R_m=3$ (км)

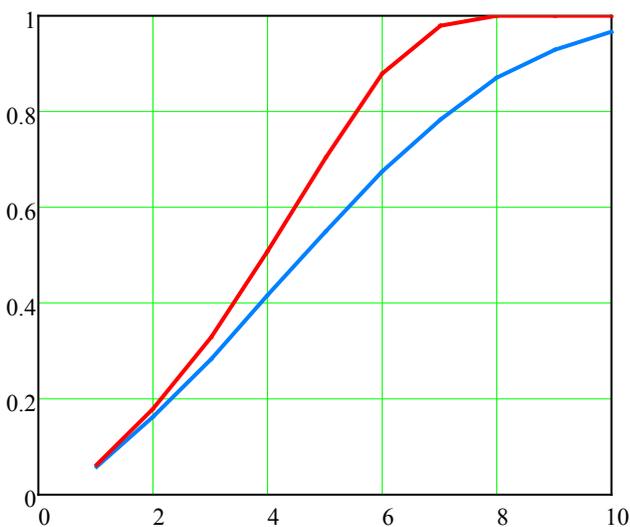


Рис. 3. Зависимость вероятности доступа от количества каналов S при $\psi=5$, $R=1$ и различной длине очереди: кривые 1) $K=1$; 2) $K=8$

Для оценки доступности системы связи используют показатель – вероятность доступа пользователя к ресурсу (услугам) системы [7].

В работе [8] проведен анализ адаптивной по радиусу зоны связи и числу каналов самоорганизующейся динамической радиосети. Для самоорганизующейся сетевидной сети с определенным показателем доступности как вероятностью обслуживания или вероятностью обеспечения связью (доступа) [8]:

$$P_{\text{доступа}} = P_{\text{обс}} \quad (1)$$

Вероятность обеспечения связью является обратной вероятности отказа в обеспечении связью:

$$P_{\text{обс}} = 1 - P_{\text{отк}} \quad (2)$$

В ходе исследования процесса обслуживания и запроса на доступ к услугам связи в самоорганизующейся сети на базе теории систем массового обслуживания было показано, что вероятность обслуживания находится как [4]:

$$P_{\text{доступа}} = P_{\text{обс}} = 1 - \frac{\Psi^{KS}}{[(S!)^{3/2}]^K} p_0, \quad (3)$$

$$\Psi = \frac{\Lambda}{M} = \pi \frac{R_m^2}{S^{3/2}} * \frac{\lambda}{\mu} \quad (4)$$

где Ψ – приведенная нагрузка на систему связи;
 S – количество каналов;
 K – длина очереди;
 p_0 – вероятность отсутствия в системе связи запроса абонентов на доступ;
 R_m – максимальный радиус зоны связи, устанавливаемый в начальный момент функционирования узла, когда в нем отсутствуют абоненты, в последующем радиус уменьшается в $S^{1/2}$, км;
 λ – плотность узлов в зоне связи;
 μ – интенсивность обслуживания узлов канала связи.

На основе расчета доступности по выражению (3) получены графики, приведенные на рисунках 2 и 3.

На рисунке 2 показана зависимость вероятности доступа от количества каналов при различной нагрузке на канал и радиуса зоны обслуживания. Как следует из графиков, при увеличении числа каналов связи доступность системы связи повышается, однако при увеличении радиуса зоны обслуживания – уменьшается.

На рисунке 3 показана зависимость вероятности доступа от количества каналов при различной нагрузке на канал и очереди обслуживания. Как видно из графиков, при увеличении числа каналов связи доступность системы связи повышается, при увеличении мест в очереди вероятность обслуживания увеличивается.

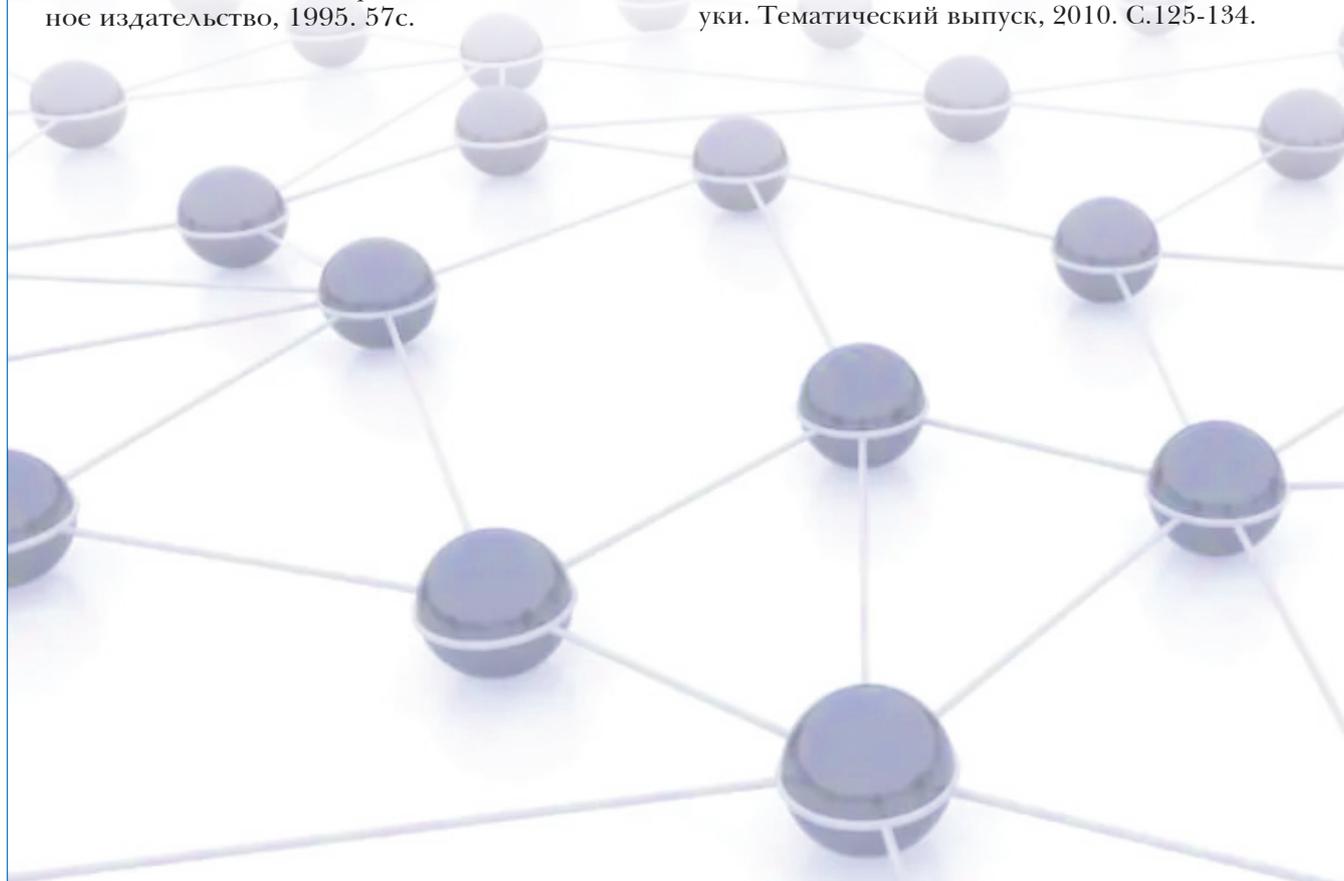
В ходе проведенных исследований с использованием аналитического аппарата на основе теории массового обслуживания получены вероятности доступности системы связи.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Проделанные расчеты показали, что в сетевом построении системы связи при ее самоорганизации вероятность доступности повышается. Представленный научно-методический аппарат позволяет оценить доступность услуг в сетевом построении системы связи и исследовать ее эффективность в условиях динамики основных параметров сети.

Литература

1. Наставление по связи Вооруженных сил Российской Федерации. Связь в объединениях Вооруженных сил Российской Федерации. М.: АО «Красная звезда», 2019. 296 с.
2. Связь в Вооруженных силах Российской Федерации-2020. М.: ООО «Компания «Информационный мост». 2020. 250 с.
3. Попов И.М. Война будущего: концептуальные основы и практические выводы. Очерки стратегической мысли/ И.М. Попов, М.М. Хамзатов. М: Кучково поле, 2016. 832 с.: ил.
4. Кондратьев В.В., Костяев Н.И. Сетевое построение, информация и связь в системах управления общевойсковых тактических формирований// Вестник Академии военных наук, 2011. №3(36). С.94-101.
5. ОТГ 2.1.200-95 Система общих технических требований к видам вооружения и военной связи. Системы военной связи. Общие тактико-технические требования. М.: Военное издательство, 1995. 57с.
6. Сызранцев Г.В. Доступность ресурса системы связи// Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук, 2012. №4(74). С. 78-82.
7. Боговик А.В., Игнатов В.В. Основы теории управления в системах военного назначения. СПб.: ВУС, 1999.
8. Козориз Д.А. Адаптивная по радиусу зоны связи и числу каналов самоорганизующаяся динамическая радиосеть// Специальная техника, 2016. № 2. С.2-8.
9. Легков К.Е. Управление ресурсами информационных систем специального назначения при построении сетецентрической системы управления на основе радиосетей нового поколения// Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2012. Т.6. № 0. С.60-63.
10. Макаренко С.И. Перспективы и проблемные вопросы развития сетей связи специального назначения// Системы управления, связи и безопасности, 2017. № 2. С.18-68.
11. Макаренко С.И., Иванов М.С. Сетевое построение войны – принципы, технологии, примеры и перспективы: монография/ С.И. Макаренко, М.С. Иванов. СПб.: Научно-технические технологии, 2018. 898 с.
12. Рахманов А.А. Принципы и подходы к концептуальному проектированию сетевых систем // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск, 2010. С.125-134.



ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 524.83

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАПОМИНАНИЯ ИНФОРМАЦИИ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И В УСТРОЙСТВАХ ЭЛЕКТРОННОЙ ПАМЯТИ

COMPARATIVE ANALYSIS OF STORING OF THE INFORMATION IN BIOLOGICAL SYSTEMS AND IN DEVICES ELECTRONIC MEMORY

Владислав Валентинович Квашенников
доктор технических наук
ведущий научный сотрудник
АО «Калужский научно-
исследовательский институт
телемеханических устройств»
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Карла Маркса, д. 4
Тел.: 8 (910) 864-52-75
E-mail: kvashienvv@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрены принципы запоминания информации в биологических системах на основе построения функциональной зависимости между образом входного воздействия и образом реакции биологической системы. Описано кодирование образов, а также функциональный, иерархический и ассоциативный принципы организации памяти. Показано, что использование этих принципов в устройствах компьютерной памяти может существенно повысить эффективность их работы по сравнению с традиционными подходами. Отмечена целесообразность использования перечисленных принципов при создании систем искусственного интеллекта.

Ключевые слова: биологическая и электронная память, кодирование информации в памяти, функциональный, иерархический и ассоциативный принципы организации памяти, смысл и цель биологической системы.

Summary

In article principles of storing of the information in biological systems on the basis of construction of functional dependence between image of entrance influence and image of reaction of biological system are considered. Coding of images, and also functional, hierarchical and associative principles of the organisation of memory is described. It is shown, that use of these principles in devices of computer memory can essentially raise efficiency of their work in comparison with traditional approaches. The expediency of use of the listed principles is noted at artificial intellect creation.

Keywords: Biological and electronic memory, information coding in memories, functional, hierarchical and associative principles of the organisation of memory, sense and the purpose of biological system.

Введение

За многие миллионы лет эволюционного развития биологические системы выработали принципы обработки информационных потоков, эффективность которых часто превосходит многие технические решения, используемые при создании электронных устройств. Некоторые принципы функционирования биологических систем используются при создании электронных устройств, однако большое число их еще ждет своего применения. Биологическая память, по определению И.П. Ашмарина (1975), – это способность живых существ, воспринимая воздействия, закреплять, сохранять и воспроизводить изменения функ-

ционального состояния и структуры, вызванные этим воздействием. Биологическая память является одним из главных отличительных признаков живой материи [1].

Наиболее популярна концепция временной организации памяти, принадлежащая канадскому ученому Д. Хеббу. Основываясь на более ранних исследованиях, он опубликовал в 1949 г. гипотезу о двойственности следов памяти и выделил два хранилища памяти: кратковременная память (КП) и долговременная память (ДП). В качестве механизма КП большинство ученых рассматривают многократную циркуляцию импульсов (реверберацию) по замкнутой цепочке нейронов [2]. Вместе с тем многие физиологи и

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

молекулярные биологи видят основу КП и в некоторых изменениях клеточной мембраны.

Долговременная память – второй этап формирования следа памяти, который переводит его в устойчивое состояние. Процесс перехода из КП в ДП называют процессом консолидации памяти. В качестве механизма ДП рассматривают устойчивые изменения нейронов на клеточном, молекулярном и синаптических уровнях. Консолидация чаще всего представляет собой облегчение и упрочение синаптической проводимости. Сравнивая функции КП и ДП, можно сказать, что в кратковременной памяти мы «живем», а в долговременной храним знания, придающие смысл, значение нашему существованию. ДП хранит прошлый опыт биологической системы, обеспечивающий ее приспособление к окружающим условиям, и в конечном итоге ее выживание. КП хранит информацию в течение нескольких секунд или десятков секунд, а в ДП информация может храниться все время, пока существует биологическая система.

Восприятие входной информации осуществляется по различным каналам: визуальным, акустическим, осязательным, обонятельным и другим. Внешние воздействия чаще имеют аналоговый характер. Сопоставление внешним воздействиям последовательности электрических импульсов есть процесс цифрового кодирования информации. Повторяющаяся устойчивая последовательность символов входной информации, закрепленная в процессе обучения и важная для достижения цели биологической системы, есть образ внешнего воздействия. Входным образам соответствуют образы реакции биологической системы, которые запоминаются в памяти. Сначала запоминаются в КП, а особо важные образы или при частом повторении образов – в ДП.

Процесс запоминания заключается в создании новой структурной организации памяти, в образовании новых связей между нервными клетками. В биологической памяти можно выделить входное воздействие и среду, в которой запоминается реакция на входное воздействие. Математическое описание состоит в том, что имеется аргумент функции и функция, выходное значение которой есть содержимое памяти. Запоминание представляет собой процесс построения функции с заданным входом и выходом. Биологическая память, в отличие от устройств электронной памяти, в которых имеются специальные ячейки для хранения информации, строится на основе функционального принципа [3].

Иерархический принцип биологической

памяти состоит в том, что сначала на первом уровне иерархии определяют основные признаки образа, а затем на следующих уровнях – менее важные дополнительные признаки. Реакция или содержимое памяти сначала учитывает основные, а затем дополнительные признаки образа.

Механизм извлечения информации из биологической памяти основан на ассоциациях образа входного воздействия с образом реакции биологической системы. Ассоциативная память в качестве адреса использует признаки образа входного воздействия либо только часть признаков входного образа.

Принципы запоминания информации в биологических системах могут быть использованы в технических устройствах при создании эффективных систем электронной памяти, а также систем искусственного интеллекта.

1. Кодирование образов в памяти

В устройствах компьютерной памяти любая не слишком длинная последовательность цифровых символов может использоваться в качестве адреса памяти. Иначе обстоит дело в биологических системах. Только осмысленная последовательность символов используется для адресации биологической памяти. По образному выражению Хьюберта Дрейфуса «Машины обрабатывают информацию, а человек работает со смыслами» [4]. Вход и выход биологической памяти имеют смысл. Так что же такое смысл и соответствующая ему осмысленная последовательность символов и как много осмысленных последовательностей используется в различных биологических системах.

Способность придавать смысл входным воздействиям и выходным реакциям есть важное свойство биологических систем. Смысл часто связан с удовлетворением инстинктивных потребностей биологической системы и определяется безусловными рефлексами. Образы формируются также в результате обучения и накопления опыта, в результате выработки условных рефлексов. Последовательности символов, приводящие к определенной реакции биологической системы, будем называть осмысленными последовательностями или образами. Опыт есть соответствие между входными и выходными образами, многократно подтвержденное в процессе обучения биологической системы и сохраненное в ДП. Опыт нарабатывается обучением, т.е. многократным повторением входных образов и соответствующих выходных образов. Обучение может выполняться с учителем или самостоятельно, например методом проб и ошибок, в

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

результате рассуждений и логического вывода и т.д. Число различных образов биологических систем зависит от сложности системы и ее функций. Одноклеточная амеба различает несколько десятков входных воздействий (образов) и может вырабатывать примерно такое же число выходных реакций (образов). Это позволяет амебе не только существовать во внешней среде, но и делиться, давая потомство. Элочка-людоедочка в «Двенадцати стульях» общалась, используя только семнадцать слов, а словарный запас произведений А.С. Пушкина насчитывает десятки тысяч слов. Эксперты в некоторых областях знаний различают миллионы различных признаков исследуемых объектов.

Поскольку с входными и выходными образами не предполагается выполнение математических операций, а только возможно преобразование в памяти, то образы не являются алгебраическими структурами и им можно сопоставлять обычные последовательности двоичных символов.

Входные образы $A = a_0 a_1 \dots a_{k-1}$, $a_i \in 0, 1$.

Выходные образы $B = b_0 b_1 \dots b_{n-1}$, $b_i \in 0, 1$.

Память преобразует входные образы в выходные образы

$$A \rightarrow B \text{ или } B = f(A), \quad (1)$$

где $f(A)$ – функция памяти.

Входные и выходные образы можно кодировать, сокращая объем информации на входе и выходе памяти. Примером такого кодирования в технических устройствах является, например преобразование компьютерной программы на алгоритмическом языке высокого уровня в машинный двоичный код. Программа на языке высокого уровня содержит осмысленную последовательность операторов языка программирования, а в результате кодирования получаем двоичный код, имеющий тот же смысл, но значительно меньший объем. Для кодирования можно использовать известные методы эффективно-го статистического кодирования, используемые для сжатия информации без потерь: Хаффмена, Шеннона-Фано, арифметическое кодирование с марковским предсказанием и т.д. [5]. Важным в перечисленных методах сжатия является выделение элементов информации, для которых вычисляют частоты вхождения в исходный текст и которые кодируют. Для компьютерной программы такими элементами информации являются команды языка программирования. В текстовой информации элементами обычно являются буквы или достаточно часто встречающиеся комбинации букв. В словарных методах сжатия, например, используемых в известных

архиваторах ZIP и RAR элементы информации выделяют на основе частотного анализа, однако, выделению элементов информации в технических системах уделяется недостаточное внимание. Биологические системы существенно эффективнее выделяют элементы информации на основе распознавания образов, которые формируют исходя из безусловных рефлексов или в процессе обучения.

Запоминание часто происходит через кодирование. Однако здесь основное кодирование – семантическое, то есть основанное на смысле. Смысл – основной способ представления информации в памяти. Наряду со смыслами мы длительно храним в памяти и легко узнаем голоса, запахи, вкусы, зрительные и тактильные впечатления.

2. Функциональная организация памяти

Запоминание информации в электронных устройствах заключается в том, что по заданному адресу выбирается соответствующая ячейка памяти, в которую записывается информация. Исследователи памяти отмечают отсутствие ячеек памяти в биологических системах, аналогичных ячейкам памяти технических устройств [6]. Как было отмечено, биологическая память имеет функциональную организацию. Современное понимание биологической памяти состоит в том, что информация запоминается в структуре связей клеток многослойной нейронной сети, которые задают функцию преобразования входной информации в выходную информацию. Входная информация есть аргумент функции, а выходная информация – значение функции. В технических устройствах входную информацию называют адресом памяти, а выходную – содержимым этой памяти. В биологических системах входная информация есть входной образ, а выходная – выходной образ памяти.

Принцип функциональной организации памяти можно использовать в технических устройствах, однако вместо реализации функции на нейронных сетях можно предложить более простое построение электронной схемы. Поскольку входную и выходную информацию обычно представляют в виде последовательности двоичных символов, а преобразование одной последовательности двоичных символов в другую есть булевская логическая функция со многими переменными, то функцию памяти целесообразно реализовать в виде некоторой многоарядной булевской логической функции. В этом случае входную и выходную информацию целесообразно задавать в виде таблицы истинности булевской функции (таблица 1). Построение

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

булевой функции по таблице истинности является одной из хорошо известных задач, решаемых в рамках классической алгебры логики [7]. По таблице истинности без труда строится булевская функция в совершенной нормальной дизъюнктивной форме. Булева функция задается конечным набором значений, что позволяет представить ее в виде таблицы истинности. Система булевых функций называется полной, если можно построить их суперпозицию, тождественную любой заранее заданной функции. Дизъюнктивной нормальной формой или ДНФ называется дизъюнкция простых конъюнкций.

Таблица 1

Таблица истинности булевой функции $B=f(A)$

Входной образ A				Выходной образ B			
a_0	a_1	...	a_{k-1}	b_0	b_1	...	b_{n-1}
0	0		0	0	1		0
1	0		0	1	0		0
0	1		0	1	1		0
1	1		0	0	1		1
		
1	0		1	0	0		0
0	1		1	0	0		1
1	1		1	1	0		1

Совершенной дизъюнктивной нормальной формой или СДНФ относительно некоторого заданного конечного набора переменных называется ДНФ, у которой в каждую конъюнкцию входят все переменные данного набора, причем в одном и том же порядке. СДНФ образуют полную систему булевских функций [8].

Например, СДНФ для переменной b_0 из таблицы истинности запишем

$$b_0 = a_0 \bar{a}_1 \dots \bar{a}_{k-1} \vee \bar{a}_0 a_1 \dots \bar{a}_{k-1} \vee \dots \vee a_0 a_1 \dots a_{k-1}.$$

Таким образом, входная и выходная информация сначала записываются в таблицу истинности. Затем по таблице истинности строится логическая функция в СДНФ. Информация хранится в виде схемотехнической реализации построенной логической функции [9]. Для схемотехнической реализации можно использовать ПЛИС или специальную электронную схему.

Экономия от применения функциональной памяти обусловлена тем, что реализация булевой функции существенно проще реализации традиционной памяти в виде набора запоминающих ячеек. Для построения традиционной электронной памяти требуются:

- дешифратор адресов ячеек памяти;
- собственно сами ячейки памяти;
- функция дизъюнкции, объединяющая выходы ячеек памяти.

Для построения функциональной памяти в СДНФ:

- функции конъюнкции входных переменных;

- функция дизъюнкции.

Сложность реализация функций конъюнкции и дешифратора адреса примерно одинаковы, однако для функциональной памяти не требуется ячеек памяти, что и обеспечивает ее более простую реализацию [10]. Дополнительное упрощение возможно при минимизации построенной булевой логической функции.

Функциональный принцип запоминания информации задается следующим алгоритмом.

Шаг 1. Формирование таблицы истинности запоминаемой информации.

Шаг 2. Составление булевой логической функции по таблице истинности.

Шаг 3. Минимизация булевой логической функции.

Шаг 4. Построение электронной схемы булевой логической функции.

Цифровая информация, объемом kn бит запоминается в электронной цифровой схеме, реализующей булевскую логическую функцию, сложность которой оценивается не более $O(kn)$ элементарных булевских операций. Даже без учета минимизации функции это меньше сложности $O(kn \cdot \log(kn))$ традиционного способа запоминания цифровой информации в ячейках памяти [11].

Например, схемотехнические затраты при реализации устройства памяти объемом 1 Мбайт, 1 Гбайт и 1 Тбайт могут быть уменьшены соответственно в 20, 30 и 40 раз, а значит, при тех же схемотехнических затратах можно строить память большую по объему, по крайней мере, в 20, 30 и 40 раз.

3. Иерархический принцип памяти

Иерархическая организация биологической памяти означает, что входной и выходной образы включают признаки разных уровней. Первый верхний уровень в общем виде определяет образ. Следующие более низкие уровни с разной степенью детализации описывают этот образ. В совокупности все уровни образа дают подробное представление входного образа. Соответствующий выходной образ также строится по иерархическому принципу.

Иерархической системе формирования образов соответствует иерархическая система памяти. Импульсы главного уровня образа сначала возбуждают связи верхнего уровня памяти. Связи верхних уровней более устойчивы и активизируются даже при зашумленном сигнале. При наличии возбуждения верхних уровней памяти становится возможным возбуждение

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

связей более низких уровней памяти. Такая структура подобна дереву, к примеру, на первом уровне возбуждаются связи соответствующие образу человека, ниже по иерархии будут связи, соответствующие знакомым людям, затем связи уровня родственников, и, наконец, на самом нижнем уровне будут связи, определяющие близкого человека. Близкого человека мы можем определить, даже если его образ будет в очень искаженном, неполном или зашумленном виде.

Такая система памяти похожа на словесный портрет – принятая в криминалистике система описания внешности человека с помощью стандартного набора характеристик.

Словесный портрет содержит сведения:

- Анатомические (общефизические) признаки.

Например, лицо: овальное; круглое; прямоугольное; треугольное; ромбовидное и т.д.

- Функциональные признаки.

Поведение: скромный; распушен; молчаливый; агрессивный; жесток; вспыльчив; легко входит в доверие; смел; осторожен; труслив и т.д.

- Особые приметы.

Описание словесного портрета занимает не более четверти листа бумаги и требует объема памяти ЭВМ не более нескольких Кбит. Это на несколько порядков меньше, чем фотография человека, занимающая несколько десятков или сотен Кбит памяти, даже сжатая, например, по стандарту JPEG2000. Словесный портрет это типичный пример иерархического описания образа. Какая-то особая примета сразу обращает на себя внимание, и тогда анализируются уже и другие признаки словесного портрета, начиная с признаков более высоких уровней иерархии. Во многих случаях словесный портрет весьма эффективен с точки зрения достижения поставленной цели, заключающейся в быстром и точном опознании человека.

Распределение признаков по уровням иерархии повышает эффективность биологической памяти. Такая структура памяти объясняет высокую скорость извлечения информации из памяти, возбуждение от рецепторов просто проходит по всем слоям обработки, влияя друг на друга, эти сигналы определяют путь, по которому возбуждения достигнут нужных уровней иерархической памяти [12]. В технических системах для выделения какого-либо образа часто используют алгоритмы оптимального корреляционного приема. В биологических системах нет перебора информации и нет операций сравнения с какой-либо эталонной информацией, не вычисляются корреляционные функции. Для этих систем справедливо свойство непрерывно-

сти – для мало отличающихся входных образов, выходные образы также будут мало отличаться.

Математическое описание иерархического принципа состоит в том, что входной образ $A = a_0 a_1 \dots a_{k-1}$ и выходной образ $B = b_0 b_1 \dots b_{k-1}$ делится на ряд признаков по уровням иерархии. Признак образа $A_{ij\dots k}$ в иерархической системе есть многомерный объект или тензор. С увеличением уровня иерархии возрастает число индексов тензора. Входным и выходным образам соответствуют иерархии памяти – кластеры памяти, каждый из которых обрабатывает свои признаки образов. Связи между кластерами определяются числом отличающихся индексов тензоров.

Существует еще один принцип хранения информации. Только что появившийся на свет малыш уже несет в себе внешние черты и, частично, характер, унаследованный от родителей. Это так называемая генетическая память. Новорожденный многое умеет: дышит, спит, ест. В связи с этим следует вспомнить о безусловных рефлексах. Эту разновидность памяти человека можно назвать постоянной, неизменной. Подобный принцип разделения памяти использован и в компьютере. Компьютерная память поделена на постоянную память BIOS (Basic Input/Output System) и оперативную память. Аналогично памяти человека, память BIOS хранит команды компьютера, необходимые для загрузки и выполнения системного или прикладного программного обеспечения. Работа же с оперативной памятью позволяет решать текущие задачи.

4. Ассоциативная память

Герман Эббингауз писал: «*Душевные образования называются ассоциированными, если они когда-либо раньше были пережиты вместе, и существует более или менее основательное допущение, что при существующих условиях они могут вызывать друг друга*». Таким образом, необходимыми и достаточными основаниями для образования связи между двумя впечатлениями считается одновременность появления их в сознании. Поэтому задача изучения механизмов запоминания обычно ограничивается характеристикой внешних условий, необходимых для возникновения «одновременных впечатлений». На основе этих условий выделяют три вида ассоциаций:

1. ассоциации по смежности во времени и пространстве;
 2. ассоциации по сходству;
 3. ассоциации по контрасту.
- Обучение и память – неотделимые процессы.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Обучение обеспечивает пополнение знаний и навыков. Память, в отличие от обучения, это не только усвоение и сохранение информации, но и механизм воспроизведения информации для ее использования. Механизм извлечения информации основан на ассоциациях. Повторение информации способствует упрочению следа памяти, так же как многократное повторение стимулов и их сочетание способствует обучению. При этом протекание процессов запоминания, сохранения и воспроизведения определяется тем, какое место занимает данный образ в деятельности системы.

Экспериментально установлено и доказано, что наиболее продуктивно связи образуются, когда соответствующий образ связан с целью биологической системы [13]. Оперативность и прочность этих связей зависит от того, какова степень участия соответствующего образа в деятельности системы, какова значимость этих связей для достижения ее целей. Ассоциативная память позволяет по неполной и даже частично недостоверной информации восстановить достаточно полное описание знакомого образа.

Рассмотренные примеры позволяют сформулировать решаемые ассоциативной памятью задачи:

1. Соотнести входную информацию со знакомыми образами, и дополнить ее до точного описания образа.

2. Отфильтровать из входной информации недостоверную и на основании оставшейся решить первую задачу.

Отдельные признаки $A_{ij...k}$ способны вызывать ассоциации со всем входным образом A , а следовательно, и с выходным образом B .

В биологической системе память используется для совершения действий, способствующих достижению цели. Здесь память является важной компонентой принятия и совершения действия. Компьютерная память – это элемент вычислительной машины, физическое устройство или среда для хранения информации. Часто используется только для вычислений, выполняемых в данное время, и во многих случаях не приводит к каким-либо действиям.

Заключение

Рассмотрение принципов запоминания информации в биологических системах и в устройствах электронной памяти показывает наряду с некоторым их сходством и весьма существенное различие. Биологическая память, в отличие от электронной памяти, реализует функциональную зависимость, связывающую образ входного воздействия и образ выходной реакции систе-

мы. Биологическая память работает с образами, имеющими значение и смысл для достижения цели биологической системы. В своей работе она использует функциональный, иерархический и ассоциативный принципы организации памяти. Биологическая память определяет последовательность действий биологического объекта, реализует многие функции его поведения и обеспечивает существование в окружающей среде. Роль биологической памяти в достижении цели биологической системы является определяющей. Мышление есть процесс функциональных итеративных преобразований образов в памяти. Исследование принципов биологической памяти и их реализация являются важными задачами создания систем искусственного интеллекта.

Литература

1. Ашмарин И.П. Загадки и откровения биохимии памяти. Под ред. акад. Е.Н. Крепса. Л.: ЛГУ им. А.А. Жданова, 1975. 159 с.
2. Роуз С. Устройство памяти. От молекул к сознанию: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 384 с.
3. Блум Ф., Лейзерсон А., Ховстедтер Л. Мозг, разум, поведение: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 248 с.
4. Дрейфус Х. Чего не могут вычислительные машины: Критика искусственного разума. Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 287 с.
5. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. М.: Диалог МИФИ, 2002. 384 с.
6. Адам Д. Восприятие, сознание, память. Размышления биолога: Пер. с англ. Под ред. и с предисл. Е.Н. Соколова. М.: Мир, 1983. 152 с.
7. Игошин В.И. Математическая логика и теория алгоритмов. 2-е изд., стереотип. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 448 с.
8. Вассерман Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. М.: Мир, 1992.
9. Фиоктистов В. Обзор технологий хранения информации. Часть 1. Принципы работы и классификация ЗУ (<http://pc.uz/publish/doc/text10943>), 2006.
10. Квашенников В.В. Патент РФ №2331937 МПК G11C 11/00 Способ запоминания цифровой информации. Оpubл. 20.08.2008, Бюл. №23.
11. Квашенников В.В., Трушин С.А. Патент РФ №2437148 МПК G06F 17/22. Способ сжатия и восстановления сообщений в системах обработки, передачи и хранения текстовой информации. Оpubл. 20.12.2011, Бюл. №35.
12. Горелик А.А., Скрипкин В.А. Методы распознавания. 4-е изд. М.: Высшая школа, 2004.
13. Кохонен Т. Ассоциативные запоминающие устройства: Пер. с англ. М, Мир. 1982.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 676.001.57: 628.179-935.4

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ОБОРОТНЫМ ВОДОСНАБЖЕНИЕМ ПРЕДПРИЯТИЙ

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF THERMAL POWER ACCUMULATION IN THE TURNOVER WATER SUPPLY SYSTEM OF ENTERPRISES

Геннадий Семенович Бут
кандидат технических наук
доцент
филиал ВА РВСН им. Петра Великого
(г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7 (919) 994-60-98
E-mail: 9199946098@mail.ru

Сергей Витальевич Синецын
кандидат технических наук
доцент
филиал ВА РВСН им. Петра Великого
(г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7 (916) 868-85-69
E-mail: sinitinsv@rambler.ru

Аннотация

Рассмотрена обобщенная математическая модель процесса аккумуляции тепловой энергии в системах оборотного водоснабжения. Показаны примеры прогнозируемых модельных откликов на встречающиеся в практике типы воздействия на подсистемы производства и очистных сооружений. Установлено, что процесс аккумуляции тепловой энергии в общем случае постепенно выходит на равновесный режим работы. Равновесный режим является результатом постепенного выравнивания количественного значения выносимой тепловой энергии в подсистеме очистных сооружений. Рассмотрено влияние периодических воздействий со стороны теплорегулирующего оборудования на процесс аккумуляции тепловой энергии. Сделан вывод, что при различных входных управляющих воздействиях на подсистемы производства и очистных сооружений существует возможность целенаправленного управления температурой воды в системах оборотного водоснабжения предприятий.

Ключевые слова: математическая модель, аккумуляция тепловой энергии, системы оборотного водоснабжения.

Summary

A generalized mathematical model of the process of thermal power accumulation in the turnover water supply systems is considered. Predicting model responses to the practice-occurring types of the action on the subsystems of production and purification plants are exemplified. It is determined that the process of thermal power accumulation in a general case gradually reach the equilibrium mode of operation. Equilibrium mode is a result of gradual equalization of the quantitative value of the introduced thermal power in the production subsystem and removal of the thermal power in the subsystem of purification plants. Batch actions from the heat-generating equipment are shown to affect the thermal power accumulation process. It is concluded that under different input control action exerted on subsystems of production and purification plants it is possible to purposefully control the water temperature in the system.

Keywords: mathematical model, heat energy accumulation, process, circulating water supply systems.

В соответствии с законом сохранения энергии и методологией системного анализа в [1] описана математическая модель аккумуляции тепловой энергии в системе оборотного водоснабжения предприятий

$$(Q_{ex}T_{ex} + \eta)(1 - \gamma) - K(1 - \alpha)T_2Q_2 = \oint_l \dot{T}_l S_l dl, \quad (1)$$

где T_{ex} и Q_{ex} – температура и расход воды на входе в систему;

η , γ – теплопроизводительность теплогенериру-

ющего оборудования, коэффициент тепловых потерь в подсистеме производства;

K – коэффициент разделения потоков воды на выходе системы;

α – коэффициент тепловых потерь в подсистеме очистных сооружений;

T_2 и Q_2 – температура и расход воды в системе;

\dot{T}_l и S_l – скорость изменения температуры и сечение потока в точке на расстоянии l от начала контура схемы подсистемы производства и под-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

системы очистных сооружений.

В выражении (1) принимаем значение управляющего воздействия на подсистему производства равным

$$X = (Q_{\text{ex}} \cdot T_{\text{ex}} + \eta)(1 - \gamma)$$

и считаем, что на подсистему очистных сооружений оказывает влияние постоянное во времени воздействие, равное $\beta = K(1 - a)$, т.е. входные управляющие переменные системы производства $Q_{\text{ex}} \cdot T_{\text{ex}}$, η будут подвержены изменениям, в то время как управляющие переменные, воздействующие на подсистему очистных сооружений K , a будут стабилизированы. Такой случай возникает при сезонном управлении, стабильной работе охлаждающих устройств (постоянное значение a), постоянном соотношении (K) потоков оборотной воды.

После преобразования (1) окончательно получим

$$X - \beta T_2 Q_2 = \oint \dot{T}_i S_i dl \quad (2)$$

Правая часть уравнения (2) описывает внутреннюю взаимосвязь элементов сети водоснабжения подсистемы производства и очистных сооружений.

Точность решения уравнения (2) будет зависеть от детального описания всех элементов сети водоснабжения, оказывающих влияние на процесс накопления тепловой энергии.

Рассматривая правую часть уравнения (2) применительно к системе оборотного водоснабжения современного (например, картонно-бумажного) предприятия, примем условие, что система изолирована от внешней среды, т.е. $Q_{\text{ex}} = 0$ и $Q_{\text{вых}} = 0$ и теплогенерирующее оборудование выключено, т.е. $\eta = 0$. Этот случай описывает состояние, когда картоноделательная (бумагоделательная) машина остановлена. После пуска машины и теплогенерирующего оборудования (термодисперсионная установка, установка теплорекуперации и т.д.) на выходе этого оборудования температура изменится скачком до значения T_0 . Причем до определенно выбранной точки схемы этот скачок температуры подойдет за определенное время.

Что касается всей системы в целом, то температура будет изменяться со временем. И через интервал времени t выходит на равновесное состояние.

Время τ – характеристика системы, которое характеризует способность системы к аккумуляции тепловой энергии (2).

Преобразуем правую часть уравнения (2) согласно (1)

$$X - \beta T_2 Q_2 = TW \quad (3)$$

где W – водоемкость всей системы;

T – скорость изменения температуры в контуре системы водоснабжения.

Рассмотрим, какова будет реакция системы на воздействие со стороны подсистемы производства, представляющее перепад теплопроизводительности теплогенерирующего оборудования в некоторый момент времени $t=0$.

$$X = \begin{cases} X_0^n \forall t \in (-\infty; 0) \\ X_1^n \forall t \in (0; \infty) \end{cases} \quad (4)$$

Из (4) и из рисунка 1, что воздействие X меняется скачком в момент $t=0$ от X_0^n до значения X_1^n .

Решая совместно (4) и (3) и полагая

$$\tau = \frac{W}{Q_2}$$

и при начальном условии

$$T_0 = T_2|_{t=0} = \frac{X_0^n}{\beta \cdot Q_2},$$

получим дифференциальное уравнение

$$T + \beta \cdot T_2 / \tau = \frac{X_1^n}{W} \quad (5)$$

Полученное уравнение будет иметь два решения соответственно для $X_1^n > X_0^n$

$$T_2 = \frac{X_1^n - (X_1^n - X_0^n) \cdot \exp(\beta \cdot t / \tau)}{\beta \cdot Q_2} \quad (6)$$

и для $X_1^n < X_0^n$

$$T_2 = \frac{X_1^n + (X_0^n - X_1^n) \cdot \exp(\beta \cdot t / \tau)}{\beta \cdot Q_2} \quad (7)$$

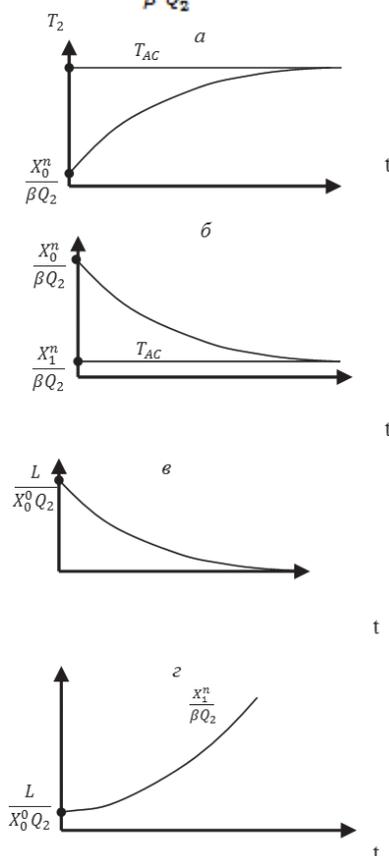


Рис. 1. Изменение температуры воды в системе при входных управляющих сигналах, воздействующих на подсистему производства $X_1^n > X_0^n$ (а) и $X_1^n < X_0^n$ (б) подсистему очистных сооружений $X_1^n > 0$ (в), $X_1^n < 0$ (г)

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Решение уравнения (6), исходя из ранее приведенных расчетных данных, соответствует процессу аккумуляции тепловой энергии в водной системе.

Решение уравнения (7) будет соответствовать процессу выведения тепловой энергии из водной системы оборотного водоснабжения (так как во втором уравнении T_2 со временем уменьшается).

Анализируя уравнения (6) и (7), приходим к заключению, что эти два процесса имеют равновесный режим аккумуляции тепловой энергии с величиной

$$T_{ac} = \frac{X_1^n}{\beta \cdot Q_2},$$

где T_{ac} – асимптотическое значение температуры в равновесном режиме.

Из этого также следует, что как в процессе накопления энергии, так и в процессе выведения тепла значение температуры стремится к T_{ac} . На рисунках 1а,б наглядно видны эти закономерности.

Отсюда можно также сделать вывод, что для стабилизации значения температуры воды в системе необходимо свести до минимума изменение теплопроизводительности оборудования, генерирующего в водную систему тепловую энергию.

Полученные закономерности подтверждают полученные ранее выводы, что равновесному режиму процесса накопления растворенных в воде веществ [2], так и накопления в водной системе низкопотенциальной тепловой энергии [1] соответствует в первом случае нулю скорости изменения в водной системе концентрации растворенного компонента, а во втором случае $T=0$. И переход из одного равновесного состояния в другое происходит по уравнениям (6) и (7).

При изменении входного воздействия система уже не будет находиться в равновесном режиме, а будет стремиться к новому равновесному состоянию с другими предельными значениями температуры системы.

Процесс аккумуляции низкопотенциальной тепловой энергии в системах оборотного водоснабжения можно представить состоящим как бы из двух самостоятельных процессов: процесса генерирования тепловой энергии в водную систему со стороны оборудования в подсистеме производства плюс приток внешней энергии, вносимой из внешней среды в подсистему производства и процесса выведения тепловой энергии в подсистеме очистных сооружений (отстойники механо-химической очистки, аэротенки биологической очистки и т.д.).

Эти два процесса проходят независимо друг от друга и в системе будет протекать то про-

цесс накопления тепловой энергии ($X_1^n > X_0^n$), то процесс отвода тепла в подсистеме очистных сооружений ($X_1^n < X_0^n$). Исходя из этого, можно подобрать управляющие переменные как для подсистемы производства, так и для подсистемы очистных сооружений соответственно η и Q_{ex} , K и α таким образом, чтобы температура воды в определенной точке системы водоснабжения (например, перед биологической очисткой) не превышала допустимого значения.

Решение таким образом поставленной задачи, например применительно к картонно-бумажным предприятиям, приводит к оптимизации технологических параметров и снижению себестоимости продукции.

Конкретным результатом решения такой задачи может явиться снижение потребления технологического пара при уменьшении расхода свежей воды. Определение же оптимального значения коэффициента тепловых потерь в подсистеме очистных сооружений α_{opt} и знание действительного значения α для очистных сооружений позволяет вычислить $\Delta\alpha = (\alpha_{opt} - \alpha)$. Исходя из $\Delta\alpha$ возникает возможность оптимально выбирать оборудование дополнительно охлаждающее (например, теплообменники) или утилизирующее (например, с помощью теплонасосной установки) низкопотенциальное тепло.

В системе может возникнуть такая ситуация, когда теплогенерирующее оборудование в подсистеме производства работает с постоянной теплопроизводительностью, а со стороны подсистемы очистных сооружений возможно изменение управляющих переменных. Такая ситуация возникает, например, при переходе с одной схемы работы очистных сооружений на другую (происходит изменение соотношения потока оборотной воды и соответственно значение коэффициента K), изменения режимов работы охлаждающего оборудования (это приводит к изменению значения коэффициента α).

Полагая абсолютное значение управляющего воздействия на подсистему очистных сооружений равно $X_1 = K(1-\alpha)$ и считая, что на подсистему производства оказывает влияние постоянное воздействие

$$L = (Q_{ex} \cdot T_{ex} + \eta)(1-\gamma)$$

и преобразовав (1), получим

$$L - X_1 \cdot T_2 \cdot Q_2 = TW \quad (8)$$

Рассмотрим реакцию системы на перепад величины управляющего сигнала, в момент времени $t=0$, воздействующего на подсистему очистных сооружений,

$$X = \begin{cases} X_0^0 \forall t \in (-\infty; 0) \\ X_1^0 \forall t \in (0; \infty). \end{cases} \quad (9)$$

Величина воздействия для подсистемы очист-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ных сооружений, так же как и для подсистемы производства, в данной ситуации изменится в момент $t=0$ от X_0^o до значения X_1^o .

Решая совместно (8) и (9) и полагая $\tau = \frac{W}{Q_2}$, получим

$$T + \frac{X_1^o \cdot T_2}{\tau} = \frac{L}{W}. \quad (10)$$

В результате решения данного дифференциального уравнения, при начальном условии

$$T_0 = T_2|_{t=0} = \frac{L}{X_0^o \cdot Q_2}$$

$$T_2 = \frac{L}{X_0^o \cdot Q_2} \cdot \exp(-X_1^o t / \tau). \quad (11)$$

Проанализируем это уравнение. Функцию T_2 представим в виде

$$T_2 = BA^{-\frac{X_1^o}{\tau}},$$

где $B=L/X_0^o \cdot Q_2$, $A=\exp(t)$.

Учитывая, что $t>0$ и $\tau>0$ (так как $W>Q_2$) возникает два случая для анализа функции T_2 .

$X_1^o > 0$. Тогда функция T_2 – убывающая. Изменение температуры воды в подсистеме будет происходить от значения $L/X_0^o \cdot Q_2$ (в начальный момент $t=0$) до $T_2=0$ (при $t \rightarrow \infty$). Эта закономерность отражена на рисунке 1в.

$X_1^o < 0$. Функция T_2 – возрастающая (рисунк 1з). Температура воды в системе будет изменяться от значения $L/X_0^o \cdot Q_2$ (в начальный момент $t=0$) до $T \rightarrow \infty$ (при $t \rightarrow \infty$).

Данный режим не позволяет стабилизировать значение температуры воды в системе. Поэтому для целей стабилизации необходимо использовать режим, когда $X_1^o > 0$. Режим $X_1^o < 0$ из дальнейшего рассмотрения исключим.

При рассмотрении случая изменения величины управляющего сигнала, воздействующего как на подсистему производств, так и на подсистему очистных сооружений, изменение температуры воды в системе будет следующее:

$X_1^n > X_1^o$ (для подсистемы производства). Графики изменения температуры, если отдельно рассматривать подсистему производства и подсистему очистных сооружений, будут соответствовать рисункам 1а,в. В реальных условиях изменение температуры в системе происходит по графику, который суммарно равен графикам, представленным на рисунках 1а,в. В этом случае возможно достижение стабильного значения температуры воды в системе при условии, что входной сигнал, воздействующий на подсистему очистных сооружений X_1^o , равен по абсолютной величине X_1^n и противоположен ему по знаку. Температура воды будет определяться в этом случае значением $T_2 = X_0^n / NQ_2$.

$X_1^n < X_0^n$ (для подсистемы производства). Графикам изменения температуры воды соответственно для подсистемы производства и очистных сооружений будут соответствовать рисунки 1б,в. В этом случае скорость изменения темпе-

ратуры воды в системе зависит от соотношения X_1^n и X_1^o . Но в любом случае температура воды в системе стремится к своему предельному значению $T_2 = X_1^n / NQ_2$.

В производственных условиях часто возникает ситуация, когда одна или несколько из входных управляющих переменных подвержены колебаниям. Применительно к условиям картонно-бумажных предприятий это может возникнуть тогда, когда, например, некоторое теплогенерирующее оборудование работает не с постоянной теплопроизводительностью η . Остальные входные переменные T , Q_{ex} , β можно считать с некоторой степенью допущения постоянными. В этом случае воздействие будет состоять из суммы постоянной и переменной составляющих η . На выходе системы выходной сигнал можно представить также в виде суммы сигналов на постоянное и периодическое воздействие.

Сначала определим, какова реакция системы на чисто гармонический сигнал на входе

$$X = X_0^r \exp(-i\omega t), \quad (12)$$

где X_0^r – амплитуда гармонического сигнала; ω – угловая частота колебаний входного сигнала; $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Для случая, когда на вход системы поступает сигнал (12), модель (2) будет иметь вид

$$T + \beta T_2 / \tau = \frac{X_0^r}{W} \cdot \exp(-i\omega t).$$

Решение этого уравнения запишется в виде

$$T_2 = \frac{X_0^r}{Q_2(N-i\omega\tau)} [\exp(-\beta \cdot t / \tau) + \exp(-i\omega t)]. \quad (13)$$

Рассматривая промежуток времени $t \gg \tau$, приходим к заключению, что член

$$\exp(-\beta \cdot t / \tau) \rightarrow 0$$

как в уравнении (13), так и в уравнениях (6) и (7): реакция системы при постоянных значениях входных переменных.

Реакция системы на комплексное воздействие, состоящее из постоянной и гармонической составляющих, примет вид

$$T_2 = \frac{X_0^r}{\beta \cdot Q_2} \left[\frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} \cdot \exp(-i(\omega t - \varphi)) + 1 \right]. \quad (14)$$

Здесь

$$\varphi = \arctg(\omega\tau/N);$$

$$\mu = \omega\tau/K.$$

Из уравнения (14) следует вывод, что реакция системы состоит также из суммы реакций X_0^n / NQ_2 , как реакции на постоянное воздействие и реакции

$$X_0^r / \beta \cdot Q_2 \times \left[\frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} \cdot \exp(-i(\omega t - \varphi)) \right]$$

на гармоническое воздействие. Амплитуда реакции системы на комплексное воздействие в

$$\sqrt{1 + \left(\frac{\omega \cdot \tau}{K}\right)^2}$$

раз меньше амплитуды на сигнал типа (4). Причем амплитуда реакции системы обратно про-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

порциональна частоте гармонического сигнала, воздействующего на систему, а также постоянной времени системы. Для того, чтобы уменьшить влияние амплитуды выходного сигнала от входных сигналов, имеющих небольшую частоту колебаний, необходимо увеличить постоянную времени системы. А это значит необходимо выбирать бóльшую водоемкость системы W (при заданном Q_2) или уменьшить расход воды в системе Q_2 (при заданном значении W).

Таким образом, проведенный анализ математической модели аккумуляции тепловой энергии в системах оборотного водоснабжения предприятий показывает, что при различных входных управляющих воздействиях на под-

системы производства и очистных сооружений существует возможность целенаправленного управления температурой воды в системе, стабилизировать значение температуры воды на определенном уровне и выбрать оптимальные значения управляющих сигналов.

Литература

1. Бут Г.С., Сеницын С.В. Математическая модель процесса аккумуляции тепловой энергии// Известия Института инженерной физики, 2020. №4(58). С.57-61.
2. Иванов Вл. Вас., Иванов Вл. Вл. Математическая модель системы водооборота// Химия и технология воды, 1983. №2. С.110-113.



ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.82

ПРИМЕНЕНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ ЗАДАЧИ БИНАРНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕКСТОВ

APPLICATION OF LOGISTIC REGRESSION TO THE PROBLEM OF BINARY CLASSIFICATION OF TEXTS

Евгений Владимирович Вершинин
кандидат физико-математических наук, доцент
заведующий кафедрой
«Системы обработки информации»
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

Иван Витальевич Лаковщик
студент
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана
Тел.: 8 (930) 840-86-39
E-mail: lakovshikov@gmail.com

Антон Сергеевич Никулин
студент
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана
Тел.: 8 (915) 891-68-61
E-mail: nikulanton@gmail.com

Аннотация

В работе рассматривается применение линейной модели логистической регрессии для определения эмоциональной окраски текста. Описаны этапы предобработки данных в формате текстовых сообщений. Рассмотрены методы по уменьшению исходного количества признаков. По итогам работы сформированы выводы об особенностях русскоязычных текстовых данных.

Ключевые слова: машинное обучение, линейные модели, логистическая регрессия, обработка текстовых данных, RuTweetCorp.

Summary

The paper discusses the use of a linear logistic regression model to determine the emotional color of the text. The stages of data preprocessing in the format of text messages are described. Methods for reducing the initial number of features are considered. Based on the results of the work, conclusions were drawn about the features of Russian-language text data.

Keywords: machine learning, linear models, logistic regression, word processing, RuTweetCorp.

Введение

Количество обрабатываемой информации постоянно растет, формируется множество различных задач, которые требуют автоматизации, накапливается большое количество данных. В связи с этим, проблема создания алгоритмов и моделей, способных эффективно обрабатывать большие объемы информации, актуальна на данный момент. Задача классификации текстов включена в раздел компьютерной лингвистики и применяется для решения ряда вопросов, таких как определение эмоциональной окраски текста, выделение тематики, определение автора и др. Данная статья представляет собой обзор применения логистической регрессии на русскоязычном наборе данных.

Постановка задачи

В данной работе рассматривается классификация текстов по двум категориям – позитивные и негативные. Формально постановка за-

дачи классификации описывается следующим образом.

Имеется множество текстов $D = \{d_1, \dots, d_{|D|}\}$ и множество возможных категорий $C = \{c_1, \dots, c_{|C|}\}$. Неизвестная целевая функция $F: D \times C \rightarrow \{0, 1\}$ задается формулой:

$$F(d_j, c_i) = \begin{cases} 0, & \text{если } d_j \notin c_i, \\ 0, & \text{если } d_j \in c_i; \end{cases} \quad (1)$$

Необходимо получить классификатор F^* , максимально близкий к F [1].

Инструменты для разработки

Для проведения исследования была выбрана платформа Google Colaboratory, которая является облачным сервисом с современными и производительными аппаратными средствами, позволяющими выполнять вычисления с высокой производительностью. На данной платформе используется язык программирования Python, который является одним из самых популярных при решении задач машинного обучения.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Для построения моделей использовалась библиотека sklearn. При подготовке данных используются инструменты из библиотек pandas, numpy, nltk и rymorphy2.

Предобработка и индексация данных

В качестве входных параметров для обучения и тестирования будет служить набор RuTweetCorp [2]. Это корпус, состоящий из отзывов на платформе Twitter. Он состоит из 115000 положительных, 112000 отрицательных и 17,5 миллиона неразмеченных текстовых сообщений.

Для более унифицированного представления данные были модифицированы следующим образом:

1. Удалены все знаки пунктуации в текстах.
2. Заменены упоминания пользователей Twitter на токен "User".
3. Заменены ссылки, которые могут содержаться в тексте, на токен "URL".
4. Заменена буква «ё» на «е», для уменьшения

количества различных вариаций одного и того же слова.

5. Все тексты приведены к нижнему регистру.

6. Удалены «стоп-слова», которые встречаются достаточно часто в тексте и являются шумом.

Для того чтобы в процессе обучения не было перевеса данных одного класса над другим, использовалось равное количество размеченных текстов обоих классов. Весь набор данных был разделен на 3 части, тренировочная – 143,36 тыс., валидационная – 35,84 тыс., тестовая – 44,8 тыс. текстов [3].

Для индексации слов используется модель Bag-of-words (Мешок слов), которая представляется в виде матрицы. Строками в ней будут являться отдельные тексты, а столбцы – слова, которые в него входят. В результате получается набор признаков в формате унарных векторов (one hot encoding).

Для снижения возможного эффекта переобучения и обобщения модели применяются методы по уменьшению размерности пространства

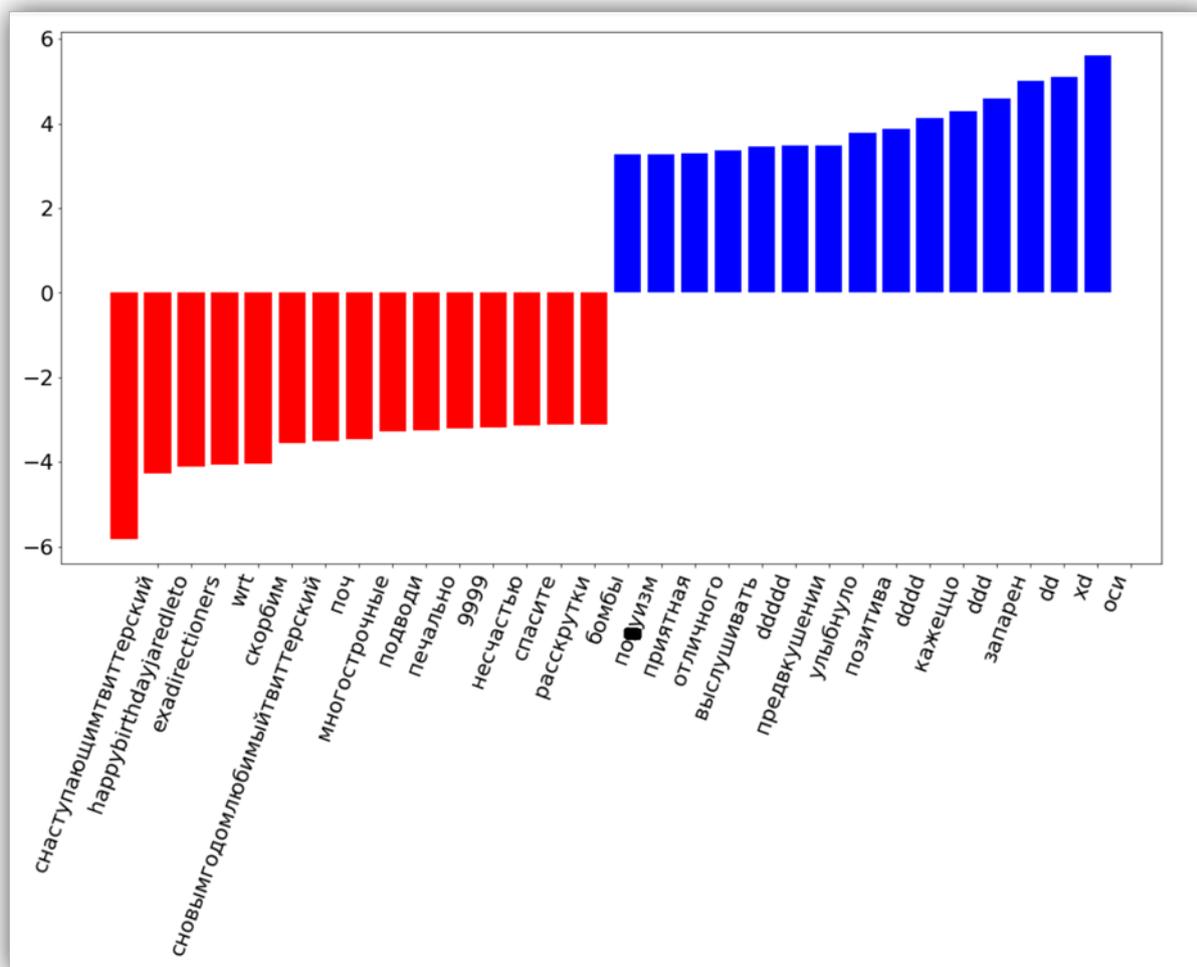


Рис. 1. Визуализация коэффициентов классификации

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

признаков. В данной работе рассматривается два подхода, которые уменьшают изначальное количество признаков примерно в 2 раза:

- Стемминг – нахождение основы слова, урезание окончаний. Исходный набор уменьшился со 145 тыс. до 71 тыс.
- Приведение слова к начальной форме. Исходный набор уменьшился со 145 тыс. до 78 тыс.

Логистическая регрессия

Данная линейная модель выступает в качестве классификатора и прогнозирует вероятность отнесения объекта к определенному классу. Она обладает рядом преимуществ, таких как поддержка инкрементного обучения и относительно не сложную реализацию алгоритма.

При создании модели использовалась $L1$ регуляризация, с коэффициентом $C=1$. Подбор коэффициента регуляризации не имеет большого смысла, так как при большом количестве признаков она не будет должным образом влиять на результат. Для оптимизации использовался алгоритм BFGS (Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно) [4]. После обучения точность ответов на тестовой выборке без применения методов по уменьшению количества признаков составляет около $\sim 74,9\%$. С использованием урезания окончаний $\sim 74\%$, а с приведением слова к нормальной форме $74,1\%$. На *рисунке 1* представлены слова, наибольшим образом влияющие на результаты классификации.

Из *рисунка 1* видно, что помимо обычных слов русского языка наибольшее влияние на классификацию оказывают хештеги, ненормативная лексика, жаргонизмы и неологизмы.

Результаты работы

Так как русский язык обладает сложной морфологической структурой, то применение методов по уменьшению количества признаков являются неотъемлемой частью предобработки данных. Хотя точность на тестовом наборе уменьшилась на $0,8-0,9\%$, модель стала более обобщенной.

Метод удаления окончаний может создавать некоторые проблемы для слов, которые значительно изменяются в других формах. Поэтому приведение слова к начальной форме является наиболее предпочтительным, при первоначальной обработке данных.

Твиттер, как и любая аналогичная площадка, или мессенджер обладает своими особенностями. Хештеги являются неотъемлемой частью сообщений и оказывают важную роль для решения поставленной задачи. При попытке их удаления из сообщений точность результатов на

тестовом наборе падает примерно на $0,5\%$. Хотя с ними модель и является более специфичной, в контексте данной платформы такие изменения могут быть неоправданными.

На *рисунке 1* видно, что сильное влияние на классификацию оказывают не только общеупотребляемые слова. При попытках исправления орфографии, смысл текста может измениться кардинальным образом. К тому же потеряется часть признаков с большими весами классификации. Орфографические ошибки будут статистически не значимы и не смогут оказать серьезного влияния на итоговый результат. Поэтому такие модификации данных не рассматриваются в работе.

Выводы

В итоге, была получена линейная модель с вероятностью верных ответов равной $\sim 74\%$ на тестовом наборе данных. Несмотря на относительную простоту модели, данный результат уступает в точности $\sim 3\%$ рекуррентной нейронной сети, описанной в работе [5]. Эксперименты и выводы о предобработке данных, могут помочь при решении различных прикладных задач.

Литература

1. Батура Т.В. Методы автоматической классификации текстов// Программные продукты и системы, 2017. Т.30. №1. С.85-99.
2. Рубцова Ю. Автоматическое построение и анализ корпуса коротких текстов (постов микроблогов) для задачи разработки и тренировки тонового классификатора// Инженерия знаний и технологии семантического веба, 2012. Т.1. С.109-116.
3. Николенко С., Кадурин А., Архангельская Е. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб.: Питер, 2018. С.278-285.
4. Воронина И.Е., Гончаров В.А. Анализ эмоциональной окраски сообщений в социальных сетях (на примере сети «ВКонтакте»)// Компьютерная лингвистика и обработка естественного языка [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/analiz/2015/04/2015-04-21.pdf>.
5. Вершинин Е.В., Лаковщиков И.В., Никулин А.С. Применение рекуррентных нейронных сетей для определения эмоциональной окраски текста// Электронный журнал: Наука, техника и образование, 2020. №1(28). С.84-88. URL: <http://nto-journal.ru/uploads/articles/ae859aacee15a6db8d4ef1cc220163d.pdf> (дата обращения 08.11.2020).

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ



Дмитрий Александрович Петрин
студент кафедры ИУ4
«Программное обеспечение ЭВМ,
информационные технологии»
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2
Тел.: +7 (910) 865-39-58
E-mail: dapetrin98@yandex.ru

Степан Сергеевич Гришунов
аспирант кафедры ИУ4
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана
Тел.: +7 (4842) 74-40-32
E-mail: stepangrishunov@bmstu.ru

УДК 004.855

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АУГМЕНТАЦИИ ДАННЫХ

IMPROVING THE QUALITY OF MACHINE LEARNING MODELS IN THE PROBLEMS OF IMAGE CLASSIFICATION BASED ON THE DATA AUGMENTATION METHOD

Юрий Сергеевич Белов
кандидат физико-математических наук
доцент кафедры ИУ4
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана
Тел.: +7(4842)74-40-32
E-mail: yselov@bmstu.ru

Аннотация

Цель исследования – раскрыть особенности и обозначить перспективы неконтролируемой аугментации данных (UDA). В статье выделены основные проблемы, связанные с обучением глубоких нейронных сетей, ключевые недостатки традиционных методов аугментации данных, приведена схема обучения модели с использованием UDA, раскрыта сущность метода RandAugment, дано теоретическое обоснование того, почему UDA может повысить эффективность моделей машинного обучения. Научная новизна исследования заключается в выявлении новой концепции, применимой к дополнению существующих данных при тренировке моделей глубокого обучения. В результате выделены и охарактеризованы основные преимущества UDA в сравнении с традиционными подходами, приведены результаты экспериментов на датасетах CIFAR-10 и ImageNet, обозначены дальнейшие перспективы сочетания традиционных методов аугментации данных с методами, основанными на полуконтролируемом обучении.

Ключевые слова: аугментация, UDA, RandAugment, полуконтролируемое обучение.

Summary

The aim of the research is to reveal the features and outline the prospects for unsupervised data augmentation (UDA). The article highlights the main problems associated with training deep neural networks, the key disadvantages of traditional methods of data augmentation, provides a model training scheme using the UDA, discloses the essence of the RandAugment method, and provides a theoretical rationale for why UDA can improve the efficiency of machine learning models. The scientific novelty of the research lies in the identification of a new concept applicable to augmenting existing data when training deep learning models. As a result, the main advantages of the UDA in comparison with traditional approaches are highlighted and characterized, the results of experiments on the CIFAR-10 and ImageNet datasets are presented, further prospects for combining traditional methods of data augmentation with methods based on semi-supervised learning are outlined.

Keywords: augmentation, UDA, RandAugment, semi-supervised learning.

Введение

В машинном обучении классификация изображений – это процесс анализа изображений и их систематизации по категориям с помощью нейронных сетей. В последние годы нейронные сети позволили быстро повысить точность классификации [1]. Они применяются во многих областях, таких как искусственный интеллект, медицинская диагностика, автомобильная промышленность и др.

Растущий интерес к глубокому обучению сделал сверточные нейронные сети (convolutional neural networks, CNN) наиболее распространен-

ным инструментом, используемым для анализа и классификации изображений. Однако, несмотря на широкие перспективы, все еще предстоит решить некоторые проблемы, являющиеся общими для глубоких нейронных сетей (deep neural networks, DNN). Одна из ключевых проблем заключается в отсутствии данных хорошего качества или неравномерное распределение классов в этих данных. В наши дни эффективные DNN очень большие, поэтому требуют огромного количества данных для обучения, которые во многих случаях может быть трудно предоставить [2]. Одним из способов решения этой проблемы

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

является аугментация или увеличение данных. Аугментация направлена на создание новых и реалистичных обучающих данных путем применения какого-либо преобразования к образцам без изменения их меток [3]. Пусть $q(x^{\wedge}|x)$ будет преобразованием дополнения, из которого можно извлечь расширенные данные x^{\wedge} на основе исходных данных x . Для того чтобы преобразование было корректным, требуется, чтобы любой образец, взятый из множества x^{\wedge} , имел ту же метку, что и соответствующий ему образец из x , на основе которого он был получен [4].

Наиболее популярная и доказанная как эффективная текущая практика увеличения данных – это выполнение традиционных аффинных и эластичных преобразований: создание новых изображений путем поворота или отражения исходного изображения, увеличения и уменьшения масштаба, смещения, применения искажения, изменения цветовой палитры и пр. [5]. Однако многочисленных преимуществ данных методов в некоторых случаях недостаточно для значительного повышения точности нейронной сети или преодоления проблемы переобучения. Более того, текущие исследования «adversarial» (сопоставительных) атак на CNN показали, что глубокие нейронные сети можно легко обмануть с помощью частичного поворота и сдвига изображений, добавления шума и даже умелого изменения нескольких пикселей в изображении [6]. Именно поэтому необходим подход для увеличения размера обучающего набора данных, который помимо всего прочего сделает данные более надежными и менее уязвимыми для злоумышленников.

Методы исследования

Одним из таких методов может послужить неконтролируемая аугментация данных (unsupervised data augmentation, UDA). Обозначим x как входные данные, а y как набор соответствующих меток. Задача состоит в обучении модели $p_{\theta}(y|x)$ для прогнозирования y на основе входных

данных x , где θ – параметры модели. Также, будем использовать $P_L(x)$ и $P_U(x)$ для обозначения распределений помеченных и непомеченных образцов соответственно, а f для обозначения идеального классификатора (соответствующий случаю идеальной аугментации данных).

UDA обрабатывает исходные непомеченные данные для обеспечения гладкости модели. Процесс работы с данными приведен на следующей схеме (рисунки 1). Он включает в себя 2 ключевых этапа [7]:

- вычислить на основе входных данных x выходное распределение $p_{\theta}(y|x)$ для исходных x и версию $p_{\theta}(y|x, \varepsilon)$ с добавлением небольшого шума ε . Шум может быть применен к самим образцам x либо к скрытым состояниям;
- минимизировать расхождение между двумя распределениями $p_{\theta}(y|x)$ и $p_{\theta}(y|x, \varepsilon)$.

Данный процесс заставляет модель быть нечувствительной к шуму и, следовательно, более плавной к изменениям во входном (или скрытом) пространстве x . С другой стороны, минимизация «потерь согласованности» постепенно распространяет информацию о метках от «помеченных» данных к «непомеченным». Стоит отметить, что более сильные дополнения данных могут привести к более качественным результатам при использовании зашумления немаркированных образцов.

Следуя этой идее, можно использовать дополненный набор данных, чтобы внести шум и оптимизировать обучение на непомеченных образцах. При совместном обучении с помеченными данными применяется весовой коэффициент λ для уравнивания контролируемой перекрестной энтропии и неконтролируемой потери согласованности обучения, как показано на рисунке 1.

Чтобы свести к минимуму расхождение между контролируемым обучением и прогнозированием на немаркированных данных, применяются более сложные техники аугментации данных [7]. В частности, для задач классификации среди прочих может использоваться метод RandAugment

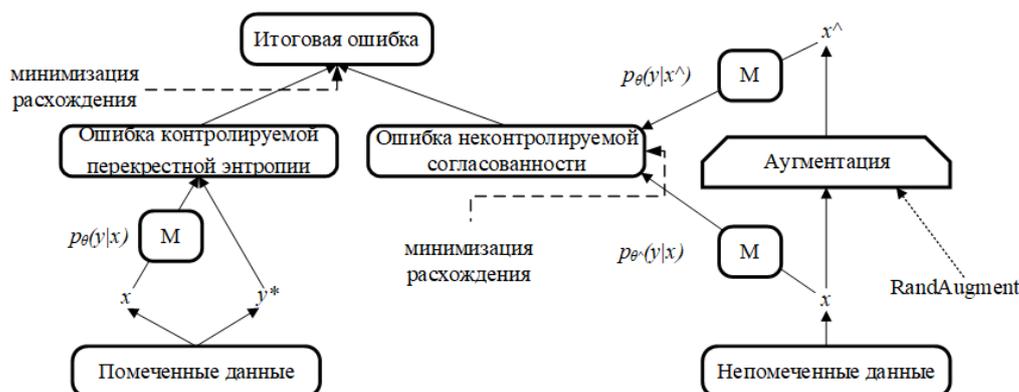


Рис. 1. Процесс обучения с использованием UDA, где М – модель, которая предсказывает распределение y при заданном x

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

(рисунк 1), который будет рассмотрен далее.

Однако, прежде чем описывать данный метод, необходимо дать базовое представление о трех аспектах, лежащих в основе практически всех современных методов аугментации [8,9]. Во-первых, валидный шум, обеспечивающий высокую эффективность в контролируемом обучении, обычно создающий реалистичные дополненные образцы, которые имеют те же метки, что и исходные. Таким образом, можно безопасно поддерживать согласованность между прогнозами на исходном и расширенном немаркированных наборах данных. Во-вторых, разнообразный шум, благодаря которому сложные методы аугментации данных могут генерировать более разнообразный набор примеров, поскольку они вносят больше изменений в исходные данные без изменения меток, в то время как, например, простой гауссовский шум может вносить только локальные изменения. Поддержание согласованности на множестве различных обучающих образцов может значительно повысить эффективность выборки. В-третьих, целевые индуктивные смещения для разных задач – операции аугментации данных, которые хорошо работают в сочетании с обучением с учителем, по сути, обеспечивают нужные смещения.

На основании указанных аспектов рассмотрим технику RandAugment (рисунк 2), применяемую для аугментации помеченных данных на рисунке 1. RandAugment — это автоматизированный метод аугментации данных. Область поиска для аугментации имеет 2 интерпретируемых гиперпараметра N и M . N – количество дополнительных преобразований, применяемых последовательно, а M – коэффициент трансформации исходных изображений. Чтобы уменьшить пространство параметров, но при этом сохранить разнообразие изображений, используется процедура без параметров, всегда выбирающая преобразование с равномерной вероятностью $1/K$, где K – число вариантов преобразований. Таким образом, имея N преобразований для обучающего изображения, RandAugment может определить KN потенциальных политик преобразований [10].

Преобразования, применяемые к изображениям, включают в себя преобразование иден-

тичности, автоконтраст, выравнивание, вращение, соларизацию, дрожание цветов, постеризацию, изменение контраста, изменение яркости, изменение резкости, сдвиг по оси x или y , перевод по x или y .

Рассмотрим теоретическое обоснование того, почему UDA может улучшить эффективность модели, а также необходимое количество помеченных данных для достижения определенного уровня ошибок. Для лучшего понимания будут сделаны следующие упрощения касательно преобразований аугментации данных:

1) Аугментация внутри домена: образцы данных, сгенерированные при аугментации данных, имеют ненулевую вероятность распределения P_U , то есть $P_U(x^\wedge) > 0$ для $x^\wedge \in q(x^\wedge|x)$, $x \in P_U(x)$.

2) Дополнение, сохраняющее метку: увеличение данных сохраняет метку исходного образца, т.е. $f(x) = f(x^\wedge)$ для $x^\wedge \in q(x^\wedge|x)$, $x \in P_U(x)$.

3) Обратимая аугментация: операцию увеличения данных можно обратить, т.е. если $q(x^\wedge|x) > 0$, то $q(x|x^\wedge) > 0$.

В качестве начального шага рассмотрим первое приближение формального анализа. Обозначим граф G_{PU} , в котором каждый узел соответствует выборке данных $x \in X$, а ребро (x, x^\wedge) существует в графе тогда и только тогда, когда $q(x^\wedge|x) > 0$. Благодаря предположению о сохранении метки легко увидеть, что образцы с разными метками должны находиться на разных компонентах (несвязных подграфах) графа G_{PU} . Следовательно, для задач классификации N -категорий граф имеет N компонентов (подграфов), когда с помощью операции дополнения можно сопоставить образцы с соответствующей категорией. В противном случае у графа будет более N компонентов [7].

Для каждого компонента C_i графа, пока существует единственный помеченный пример в компоненте, т.е. $(x^*, y^*) \in C_i$, можно распространить метку на остальные узлы в C_i с помощью операции аугментации $q(x^\wedge|x)$. Что еще более важно, если выполняется только контролируемое увеличение данных, можно распространять информацию о метке только непосредственно соседям помеченного узла. Напротив, выполнение неконтролируемой аугментации данных обеспечивает обход всего подграфа C_i . Это дает

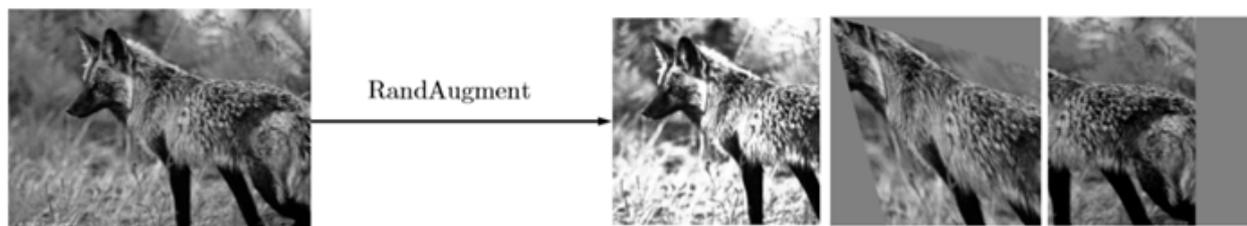


Рис. 2. Дополненные изображения с использованием техники RandAugment

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

общее представление о том, как UDA может помочь во время обучения.

Учитывая такое распространение меток в графе G_{PV} , рассмотрим идеальный процесс аугментации. Для этого требуется, чтобы в каждом компоненте существовал хотя бы один помеченный образец. Другими словами, количество компонентов графа ограничивает минимальное количество помеченных данных, необходимое для идеальной аугментации. Важно отметить, что количество компонентов на самом деле определяется качеством операции аугментации: идеальное дополнение должно быть способно охватить все другие образцы того же класса, что и исходный образец. Это хорошо согласуется с преимуществами современных методов аугментации данных, генерирующих более разнообразные примеры. Фактически, увеличение разнообразия приводит к большему количеству соседей для каждого узла и, следовательно, уменьшает количество компонентов в графе.

Исходя из этих рассуждений, рассмотрим теорему характеризующую связь между частотой ошибок UDA и количеством помеченных примеров [7]. Без ограничения общности предположим, что в графе есть k компонентов. Пусть для каждого компонента $C_i (i=1, \dots, k)$ P_i представляет собой вероятность того, что помеченный образец попадает в i -ю компоненту, то есть $P_i = \sum_{x \in C_i} P_L(x)$. Тогда теорема формулируется следующим образом:

Пусть $Pr(A)$ обозначает вероятность того, что алгоритм (в сочетании с UDA), обученный с использованием m помеченных образцов из распределения $P_L(x)$, не сможет правильно определить метку нового тестового образца. Тогда $Pr(A)$ задается формулой:

$$Pr(A) = \sum_i P_i (1 - P_i)^m$$

Кроме того, $O(k/\epsilon)$ помеченных данных гарантирует долю ошибок $O(\epsilon)$, т.е.

$$m = O(k/\epsilon) \Rightarrow Pr(A) = O(\epsilon).$$

Из теоремы видно, что количество компонентов k , напрямую определяет количество помеченных данных, необходимых для достижения желаемой эффективности. В свою очередь количество компонентов зависит от качества функции дополнения, в то время как увеличение данных приводит к меньшему количеству компонентов. Следовательно, с помощью качественных операций дополнения UDA может достичь хорошей эффективности, используя меньшее количество помеченных примеров.

Результаты исследования и их обсуждение

Перейдем к рассмотрению качества работы UDA. В качестве первого шага необходимо проверить фундаментальную идею UDA, заключающаяся в том, что существует положительная корреляция эффективности техник аугментации данных при контролируемом и полуконтролируемом обучении. Основываясь на датасете CIFAR-10, сравним эффективность различных методов увеличения данных в условиях полностью и частично контролируемого обучения. Для сравнения используются метод RandAugment и более простые методы: кадрирование и переворачивание, а также обрезка. Результаты сведены в *таблицу 1*.

Из *таблицы 1* можно увидеть корреляцию эффективности аугментации между контролируемым и частично контролируемым обучением – чем эффективнее техника аугментации, тем меньше расхождение в уровне ошибки между контролируемым обучением на больших данных (50К) и полуконтролируемым на малых данных (4К). Это подтверждает идею о том, что более значительное дополнение данных, получаемое за счет использования передовых приемов аугментации в сочетании с полуконтролируемым обучением, приводит к большему выигрышу. В частности, в данном эксперименте использование UDA в сочетании с RandAugment позволило достичь практически идентичного уровня ошибки на гораздо меньшем наборе обучающих данных.

Таблица 1
Величина ошибок на датасете CIFAR-10

Аугментация (число образцов)	Контролируемое обучение (50К)	Полуконтролируемое обучение (4К)
Кадрирование и переворачивание	5,36	10,94
Обрезка	4,42	5,43
RandAugment	4,23	4,32

Таблица 2
Top-1 / Top-5 точности на ImageNet с 10% и 100% от помеченного набора

Методы	Полуконтролируемое обучение	10%	100%
ResNet-50	нет	55,09 / 77,26	77,28 / 93,73
ResNet-50 с RandAugment	нет	58,84 / 80,56	78,43 / 94,37
UDA (RandAugment)	да	68,78 / 88,80	75,09 / 94,49

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Теперь оценим возможности масштабирования UDA для решения более сложных и объемных задач классификации. Для этого потребуется набор данных ImageNet с использованием нейронной сети ResNet-50. При этом будут рассмотрены эксперименты двух видов:

- использование 10% данных ImageNet в качестве помеченных, а остальных данных как непомеченных;
- использование всех изображений качестве контролируемых данных.

Результаты сведены в *таблицу 2* для Top-1 и Top-5 точности. В случае Top-1, проверяется, совпадает ли предсказанный класс (имеющий наибольшую вероятность) с целевой меткой. В случае Top-5 проверяется, является ли целевая метка одним из 5 лучших прогнозов (с наибольшей вероятностью). Из таблицы видно, что в первом эксперименте UDA дает ощутимый прирост точности примерно в 10%. Это показывает, что UDA может использовать непомеченные образцы для повышения эффективности модели. Второй эксперимент позволяет понять, что при наличии большого объема данных, UDA по-прежнему не проигрывает в эффективности обучению без него (даже ненамного превосходит).

Заключение

Традиционные методы аугментации данных, основанные на комбинации аффинных преобразований и цветовых модификациях и обладающие простотой реализации, зарекомендовали себя как неплохие методы для увеличения набора обучающих данных. Однако эти методы, даже при успешном применении во многих областях, не способны значительно улучшить эффективность используемого алгоритма, а также возможности обобщения нейронных сетей. Именно поэтому на передний план должны выходить методы аугментации, основанные на моделях глубокого обучения, такие как UDA. Они позволяют генерировать более разнообразные обучающие наборы на основе имеющихся и таким образом существенно облегчать задачу поиска данных особенно для тех областей, в которых априори невозможно собрать значительные тренировочные датасеты. Таким образом, UDA в сочетании с правильным методом аугментации позволяет достичь той же эффективности обучения, но на гораздо меньших обучающих наборах данных, что подтверждено экспериментально. К тому же, UDA обладает достаточной масштабируемостью, чтобы решать сложные задачи классификации. Объединение и совместное использование современных методов аугментации в сочетании с UDA может дать огромный потенциал

для улучшения качества алгоритмов глубокого обучения, особенно требовательных к данным.

Литература

1. Султана Ф., Суфиан А., Дутта П. Четвертая Международная конференция по исследованиям в области вычислительной разведки и коммуникационных сетей (МКККН-2018), 22-23 ноября, РККИИТ, Калькутта https://www.researchgate.net/publication/329326883_Image_Classification_using_CNN (дата обращения 17.10.2020).
2. Белов Ю.С., Петрин Д.А. Повышение точности классификации изображений на основе методов передачи знаний и извлечения признаков в задачах машинного обучения// Системный администратор, 2020. №6(211). С.84-87. URL: <http://samag.ru/archive/article/4179> (дата обращения 17.10.2020).
3. SMU Data Science Review // Электронный журнал, 2019. №2. Improve Image Classification Using Data Augmentation and Neural Networks <https://scholar.smu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1091&context=datasciencereview> (дата обращения 17.10.2020).
4. AMIA Annu Symp Proc // Электронный журнал, 2018. Apr 16, Differential Data Augmentation Techniques for Medical Imaging Classification Tasks <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5977656/> (дата обращения 17.10.2020).
5. Микошайчик А., Гроховский М. Увеличение данных для улучшения глубокого обучения в проблеме классификации изображений/ Международный междисциплинарный семинар PhD (IIPhDW), Май 2018. https://www.researchgate.net/publication/325920702_Data_augmentation_for_improving_deep_learning_in_image_classification_problem (дата обращения 17.10.2020).
6. MDPI Proceedings Journals // Электронный журнал, №4, Section 2, January 2019, Review of Artificial Intelligence Adversarial Attack and Defense Technologies <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/5/909> (дата обращения 17.10.2020).
7. Cornell University, Jun 2020, Unsupervised Data Augmentation for Consistency Trainin <https://arxiv.org/abs/1904.12848> (дата обращения 17.10.2020).
8. Cornell University, Jan 2018, Data Augmentation by Pairing Samples for Images Classification <https://arxiv.org/abs/1801.02929> (дата обращения 17.10.2020).
9. Cornell University, Dec 2017, The Effectiveness of Data Augmentation in Image Classification using Deep Learning <https://arxiv.org/abs/1712.04621> (дата обращения 17.10.2020).
10. Cornell University, Sep 2019, RandAugment: Practical automated data augmentation with a reduced search space <https://arxiv.org/abs/1909.13719> (дата обращения 17.10.2020).

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.032

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНС

THE DEVELOPMENT OF A MODEL FOR PREDICTING CARDIOVASCULAR DISEASES USING ANN

Евгений Владимирович Вершинин

кандидат физико-математических наук,
доцент

заведующий кафедрой «Системы обработки информации»

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

Анастасия Владимировна Ткаченко

аспирант

ассистент кафедры «Системы обработки информации»

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана

Тел.: 8 (910) 606-44-55

E-mail: anastasiyatkach1996@yandex.ru

Елена Дмитриевна Гуркина

ассистент кафедры «Системы обработки информации»

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана

Тел.: 8 (910) 513-16-26

E-mail: besus@yandex.ru

Аннотация

В статье предложена модель прогнозирования сердечно-сосудистых заболеваний, основанная на глубоких рекуррентных нейронных сетях с применением подхода управляемых рекуррентных блоков. Произведено сравнение следующих интеллектуальных методов: дерева решений, MLP, SVM, метода k-средних и GRU, а также получены оценки точности, специфичности и чувствительности.

Ключевые слова: глубокое обучение, рекуррентные нейронные сети, GRU, сердечно-сосудистые заболевания, чувствительность, специфичность, точность.

Summary

The article proposes a model for predicting cardiovascular diseases based on deep recurrent neural networks using the gated recurrent units. The following intelligent methods were compared: decision tree, MLP, SVM, k-means and GRU and also estimates of accuracy, specificity, and sensitivity were obtained.

Keywords: deep learning, recurrent neural networks, GRU, cardiovascular diseases, sensitivity, specificity, accuracy.

Введение

Глубокие нейронные сети позволяют решать сложные задачи и работать с большим количеством данных. Несмотря на то, что для обучения модели требуются большие вычислительные мощности, полученные модели обладают высокой эффективностью и применяются во многих областях, в том числе и в медицине [1].

От сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ) в мире умирает большое количество людей, и разные факторы риска могут стать причинами их возникновения. При помощи системы прогнозирования можно определить вероятность развития ССЗ, а также точность прогноза конкретного заболевания на основе текущих данных пациента [2].

Целью работы является создание модели для прогнозирования сердечно-сосудистых заболе-

ваний, основанной на глубокой нейронной сети, и сравнение ее с другими интеллектуальными методами.

Модель прогнозирования сердечно-сосудистых заболеваний

Частным случаем глубокой нейронной сети для прогнозирования является рекуррентная нейронная сеть. С ее помощью можно спрогнозировать вероятность развития ССЗ у пациента. Основная цель при прогнозировании заболевания заключается в выявлении ключевых закономерностей и признаков из медицинских данных с использованием алгоритмов классификации и выборе наиболее релевантных признаков для диагностики ССЗ.

Таким образом, модель должна обладать атрибутами из набора данных, давать наимень-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

шую погрешность и большую точность. Данная модель глубокого обучения направлена на внедрение протокола самообучения, чтобы прошлые исходы болезней определяли будущие течения болезней сердца для конкретного пациента.

Рекуррентная нейронная сеть (RNN) имеет дополнительное скрытое состояние, которое влияет на выход нейронной сети. Архитектура RNN учитывает информацию о временных зависимостях данных. Нейрон во внутреннем состоянии хранит информацию обо всех данных: данные времени t добавляются к входным данным времени $t+1$ и подаются обратно в тот же слой, что позволяет обрабатывать серии событий во времени и последовательные пространственные цепочки. RNN принимает последовательность значений в качестве входных данных и создает новую последовательность для выходных данных [2,3].

Проблема в RNN заключается в исчезающем градиенте, что приводит к распаду информации во времени. Это значит, что накопленная полезная информация смешивается с ненужной, в результате чего данные о ранних состояниях теряются. Чтобы предотвратить потерю данных на предыдущем слое, применяются фильтры, определяющие способ использования информации для вычисления значений скрытого слоя на следующем шаге и выходных значений текущего слоя [3,5].

Рекуррентные нейронные сети, использующие фильтры – это LSTM и GRU. Оба подхода позволяют сохранить предыдущую информацию с минимальными потерями. Из двух разновидностей сетей для реализации модели прогнозирования ССЗ была выбрана GRU (Управляемые рекуррентные блоки), поскольку она использует меньше операций и фильтров для вычисления. Данная сеть имеет два фильтра: фильтр обновления и фильтр сброса состояния [2]:

1. **Update gate** (Фильтр обновления, z_t), который определяет сколько данных с предыдущего слоя должно быть передано на вход следующего слоя [5]

$$z_t = \sigma(W_z x_t + U_z h_{t-1}) \quad (1)$$

2. **Reset gate** (Фильтр сброса состояния, r_t), который показывает, сколько данных с предыдущего слоя нужно сбросить [5]

$$r_t = \sigma(W_r x_t + U_r h_{t-1}) \quad (2)$$

3. **Current memory gate** (Текущий запоминающий блок, h_t^-) – это промежуточное значение, вычисляемое по формуле [5]

$$h_t^- = \tanh(W_h x_t + r_t \circ U_h h_{t-1}) \quad (3)$$

4. **Final memory gate** (Выходной запоминающий блок, h_t) вычисляется, основываясь на про-

межуточном значении h_t^- , которое, благодаря фильтру сброса состояния, определяет исключаящие значения предыдущего слоя h_{t-1} [5]

$$h_t = z_t \cdot h_{t-1} + (1 - z_t) \circ h_t^-, \quad (4)$$

где x_t – входной вектор в момент времени t ;

h_{t-1} – информация предыдущего шага;

$W \in R_{m \times n}$, $U \in R_{m \times n}$ – обучаемые параметры сети;

W_z – весовая матрица x_t ;

U_z – весовая матрица h_{t-1} ;

σ – сигмоидальная функция.

Сигмоидальный слой позволяет определить, какую информацию хранить, а какую отбросить: 0 – забыть все данные, 1 – сохранить все данные, а (0;1) – процент сохраняемых данных.

Архитектура модели прогнозирования ССЗ

Для обучения модели использовались данные о 265 336 пациентах, взятые из репозитория UCI, содержащего реальные данные по прикладным задачам в области биологии, медицины, физики и др. В обрабатываемых данных находилось 5178 случаев с ССЗ и 29 139 пациентов под наблюдением. По результатам был определен 18 181 уникальный клинический код (6910 кодов диагнозов, 6897 кодов лекарств и 4374 кода процедур). После предварительной обработки было выделено 13 медицинских атрибутов: возраст; пол; вид стенокардии; артериальное давление; сывороточный холестерин; сахар в крови; стенокардия, вызванная физическими упражнениями; максимальный пульс; депрессия сегмента ST во время и после физических упражнений; количество крупных сосудов, окрашенных рентгеноскопией; вид талассемии; наличие ССЗ [2,3].

После предварительной обработки входных данных начинается обучение сети посредством GRU. Каждая последовательность длиной T принимает входной вектор x_t на каждом вре-

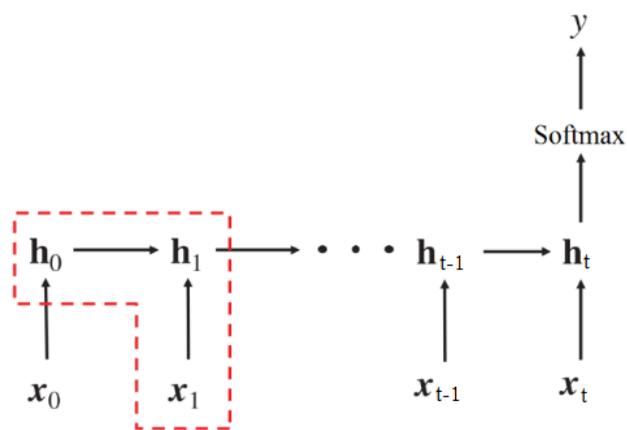


Рис. 1. Архитектура модели для прогнозирования ССЗ на основе GRU

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

менном шаге t , сохраняя информацию в одном скрытом слое h , состояние которого изменяется с течением времени (h_{t-1}, h_t, h_{t+1}) [5]. После прохода по всем клиническим событиям к последнему вектору скрытого слоя h_t применяется активационная функция Softmax. На выходе получается скалярное значение y , определяющее риск для будущей диагностики, и помогает классифицировать пациента: пациент с заболеванием сердца или нет (рисунк 1). Пунктирная линия соответствует модели GRU для прогнозирования сердечного заболевания.

Предыдущий скрытый слой h_{t-1} и текущий входной слой x_t напрямую не изменяют значение текущего скрытого слоя h_t , а вместо этого изменяют значения обоих фильтров z_t, r_t и промежуточного блока памяти h_t^- и z_t . Тогда текущий слой h_t определяется h_t^- и z_t , и оба элемента имеют значения от 0 до 1. Поэтому, если r_t близок к 0, h_t^- будет игнорировать h_{t-1} , а если z_t близок к 1, то h_t будет игнорировать x_t и сохранять то же значение, что и h_{t-1} .

Для минимизации перекоса распределения длительностей используется дополнительное время [5]:

$$Loss = -\sum_{i=1}^P c_i \log y_i + (1 - c_i \log(1 - y_i)) \quad (5)$$

где P – общее число пациентов;

c_i – показатель наличия сердечных заболеваний для i -го пациента: 1 - наличие заболевания и 0 - нет заболевания;

y_i - оценка риска i -го пациента, рассчитанная по модели.

В скрытых слоях модели каждый нейрон



Рис. 2. Схема модели прогнозирования ССЗ, основанная на сети GRU

имеет сигмоидальную функцию. Количество нейронов, находящихся на последнем слое, соответствует числу классов, и они образуют Softmax-группу. Отношение каждого элемента к определенному классу ускоряет обучение. Softmax позволяет отображать ненормализованные выходы сети, чтобы каждый компонент находился в интервале (0;1), а их сумма на выходном векторе y_i равнялась 1, после чего моделируется вероятностное распределение. Функция задается формулой:

$$y_i = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^n e^{z_j}} \quad \text{– для каждого } i\text{-го нейрона} \quad (6)$$

Алгоритм прогнозирования ССЗ представлен на рисунке 2.

Для решения задачи минимизации применен адаптивный алгоритм оптимизации Adadelta, который позволяет учесть историю изменения весов и значений градиентов по формулам:

$$D_t = \beta \cdot D_{t-1} + (1 - \beta) \cdot \Delta W_{t-1}^2, \quad D_0 \quad (7)$$

$$S_t = \alpha \cdot S_{t-1} + (1 - \alpha) E_{t-1}^2, \quad \nabla S_0 = 0 \quad (8)$$

$$g_t = \frac{\sqrt{D_t}}{\sqrt{S_t}} \cdot \nabla E_t \quad (9)$$

$$\Delta W_t = \eta \cdot (g_t + \rho \cdot W_{t-1}) + \mu \cdot \Delta W_{t-1} \quad (10)$$

где η – коэффициент скорости обучения;

W_{t-1} – значения весов на предыдущей итерации;

$$\beta = \alpha = 0,9 \quad (11)$$

ρ – коэффициент регуляризации;

μ – коэффициент момента;

ΔW_{t-1} – изменение весов на предыдущей итерации.

Набор данных в каждой эпохе проходит «кросс-валидацию» для выделения лучшего варианта. Если данный валидационный набор получился лучшим на текущий момент, то он используется для вычисления «тестовой валидации». Модель с наилучшей «тестовой валидацией» сохраняется в конце обучения.

Результаты анализа сравнения методов классификации

Для определения оценки качества были получены результаты сравнения интеллектуальных методов: дерева решений, MLP, SVM, метода k-средних и RNN с применением подхода GRU. Для этого была получена матрица несоответствий для расчета чувствительности, специфичности и точности алгоритмов (таблица 1).

Тест на специфичность исключает людей, которые не имеют данного заболевания. Менее специфичный тест может привести к ошибочному диагнозу или ненужным медицинским процедурам и методам лечения. Тест на чувствительность идентифицирует людей, у которых есть данное заболевание. Чувствительность по-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Таблица 1
Матрица несоответствий

	Классифицирован как здоровый (1)	Классифицирован как нездоровый (0)
Пациент здоров (1)	TP	FN
Пациент не здоров (0)	FP	TN

Таблица 2
Результаты оценки качества методов классификации

	Чувствительность	Специфичность	Точность
MLP	83,75%	75,73%	80,06%
SVM	90%	77,2%	84,12%
Метод <i>k</i> -средних	86,25%	75,82%	81,08%
Дерево решений	83,12%	74,26%	79,05%
GRU	96,12%	88,11%	92,16%

звояет исключить опасные заболевания. Точность прогнозирования позволяет выявить правильные результаты (положительные и отрицательные) на фоне общего количества [3,5].

TP обозначает количество выборок, классифицированных как истинные, TN – ложные, FN – фактически ложное, FP – фактически истинное [3,4].

Значения данных находятся в диапазоне от 0 до 1. Формулы для вычисления чувствительности, специфичности и точности представлены ниже:

$$\text{Чувствительность} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (12)$$

$$\text{Специфичность} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (13)$$

$$\text{Точность} = \frac{TP + TN}{TP + FN + TN + FP} \quad (14)$$

В *таблице 2* представлены результаты чувствительности, специфичности и точности для методов классификации.

На основе полученных результатов составлено графическое представление чувствительности, специфичности и точности методов классификации (*рисунок 3*).

Отличительной особенностью разработанной модели прогнозирования сердечно-сосудистых заболеваний, основанной на глубокой нейронной сети с применением технологии управляемых рекуррентных блоков, является сохранение предыдущей информации с минимальными потерями, используя при этом минимум операций и фильтров для вычисления. Данные критерии являются важными как при реализации модели, так и при получении результатов прогнозирования и классификации непосредственно после обучения нейронной сети. По результатам сравнения качества классификации разработанной модели прогнозирования с существующими ранее моделями, каждая из которых была обучена на основе одних и тех же данных, можно отметить, что созданная модель с применением

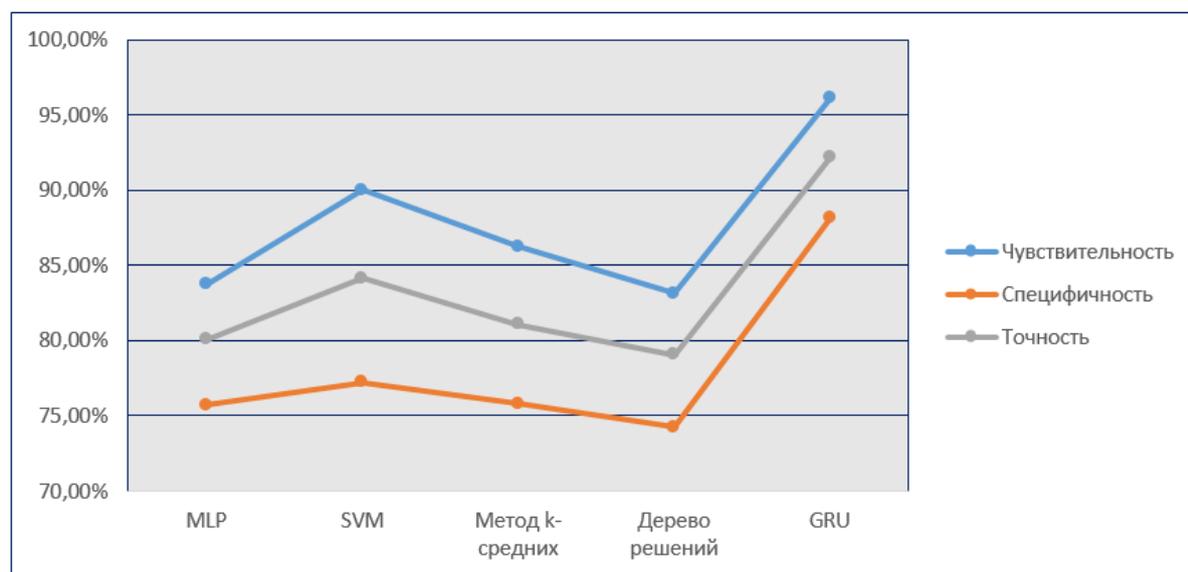


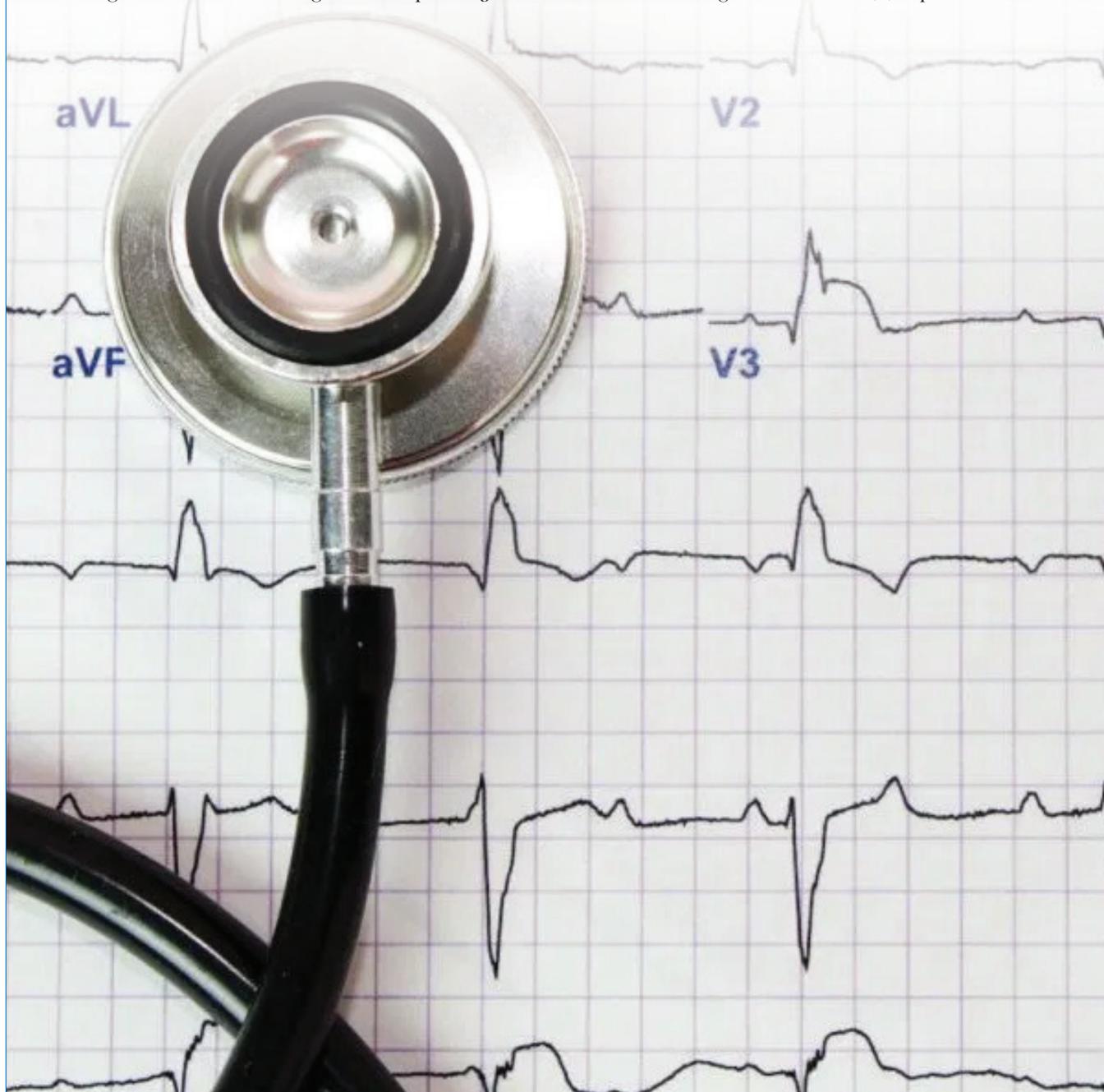
Рис. 3. Диаграмма представления результатов оценки качества

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

технологии управляемых рекуррентных блоков показала лучшие результаты по следующим показателям: точность, чувствительность и специфичность по прогнозированию сердечно-сосудистых заболеваний.

Литература

1. Белов Ю.С., Ткаченко А.В. Системы прогнозирования сердечно-сосудистых заболеваний// 49-я Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы науки». М.: Спутник+. С.103-104.
2. Jaymin Patel, Prof. Tejal Upadhyay, Dr. Samir Patel Heart Disease Prediction Using Machine learning and Data Mining Technique// IJCSC, 2016. Vol. 7. Pp.129-137, [Электронный ресурс]. URL: <http://csjournals.com/IJCSC/PDF7-1/18.%20Tejpal.pdf>.
3. Kathleen H. Miao, Julia H. Miao Coronary heart disease diagnosis using deep neural networks // IJACSA, 2018. Vol.9, №10.
4. Milan Kumari, Sunila Godara Comparative Study of Data Mining Classification Methods in Cardiovascular Disease Prediction// International Journal of Computer SCIENCE and technology, 2011. Vol.2. issue 2.
5. Edward Choi, J. Sun. Using Recurrent Neural Network Models For Early Detection Of Heart Failure Onset// Journal of the American Medical Informatics Association, August 2016. №24(2). Pp.361-370.



ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.056

**ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ИНФОРМАЦИОННОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ
МОДЕЛИРОВАНИИ РТК С
ПОМОЩЬЮ ВИРТУАЛЬНОГО
ПОЛИГОНА**

**FEATURES OF PROVIDING
INFORMATION SECURITY
WHEN MODELING RTK WITH
THE USE OF THE VIRTUAL
TRAINING SPACE**

Евгений Валерьевич Умников
ведущий инженер
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер. 1а
Тел.: +7(4967) 35-31-93
E-mail: rtk@iifmail.ru

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

Владимир Михайлович Ванюшин
доктор технических наук, профессор
Почетный гражданин города Серпухова
начальник Серпуховского УЭС
Адрес: 142203, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Советская, д. 63
Тел.: +7(4967) 35-05-03

Владимир Анатольевич Грачёв
почётный работник ВПО РФ
кандидат педагогических наук
советник президента
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93

Аннотация

В статье рассмотрена предполагаемая структура и функционал средств обеспечения информационной безопасности при использовании современных программных средств моделирования человеко-машинных робототехнических систем в применении к перспективной системе моделирования «виртуальный полигон». Описан состав основных предполагаемых угроз, цели обеспечения информационной безопасности. Приведены возможные направления и методы обеспечения информационной безопасности в процессе моделирования РТК с помощью виртуального полигона.

Ключевые слова: виртуальное моделирование РТК, многоцелевой виртуальный робототехнический полигон, человеко-машинная система, инцидент, информационная безопасность.

Summary

The article considers the proposed structure and functionality of information security tools when using modern software tools for modeling human-machine robotic systems in application to the perspective modeling system «virtual training space». The composition of the main alleged threats and the goals of ensuring information security are described. Possible directions and methods of ensuring information security in the process of RTC modeling using a virtual training space are presented.

Keywords: virtual simulation of robots, virtual training space, simulation systems, information security.

Введение

Растущая сложность современных робототехнических комплексов (РТК), необходимость использования множества разнообразных каналов связи, как между РТК, входящих в одну группировку, так и с центром ее управления, вынуждают разработчиков использовать все более

изолированные системы коммуникаций, включая специфические каналы, проприетарные протоколы информационного обмена и современные алгоритмы криптозащиты данных.

Возрастающая необходимость ускорения разработки и отладки РТК, их все более усложняющихся подсистем управления, приводит раз-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

работчиков к разнообразным системам моделирования РТК. Одним из подходов к обоснованному выбору в данной ситуации, является проведение циклов имитационного моделирования функционирования подсистем РТК в условиях информационного воздействия с использованием программно-аппаратного комплекса «виртуальный полигон» (ВП). В процессе такого моделирования нарабатывается необходимая статистика успешности атак, оценивается степень уязвимости отдельных элементов информационных систем, определяются существенные условия возникновения рисков проведения атак.

С другой стороны, применение ВП, как и любых других информационных систем, порождает набор задач связанных с обеспечением безопасности процессов функционирования самого ВП. ВП, как сложная, распределенная система, насыщенная распределенными связями между сервером ВП и множеством терминалов подключений к ВП. Каждый из каналов связи требует защиты. Каждый терминал и сервера ВП, так же требуют защиты.

ВП, как специализированная информационная система, направленная на предоставление сервиса разработчикам, должна иметь комплексную систему защиты. Данная система должна обеспечивать, как заданный уровень безопасности системы от угроз «извне», так и предотвращать возможное неблагоприятное «внутреннее» воздействие, например от скомпрометированного терминала системы, на технические и про-

граммные средства других участников ВП.

Перенос большого объема испытаний РТС из реальной среды в виртуальные условия, несмотря на необходимые упрощения, позволяет:

- получить экономию времени и денежных средств за счет исключения из цикла испытаний начальных этапов, требующих изготовления реальных образцов и их доработки;
- получить возможность объективно оценивать эффективность комплексного применения еще не созданных образцов РТС в условиях заданных виртуальным полигоном и принимать решения о целесообразном векторе развития на более ранних стадиях проектирования перспективных образцов техники.
- снизить расходы на экстремальные и специфические полигонные испытания, а так же ускорить выявление маловероятных, но значимых проблем эксплуатации РТС.

Еще одной важной особенностью применения ВП для имитационного моделирования, является возможность проведения обучения нейросетевых интеллектуальных систем управления (ИСУ) на специально подготовленных сценах, с использованием определенных сценариев имитации динамики внешнего окружения РТС. Общая структура ВП изображена на *рисунке 1*.

Обобщенная схема взаимодействия терминалов с ВП

Система управления, в которой предусматривается человек-оператор, может быть как

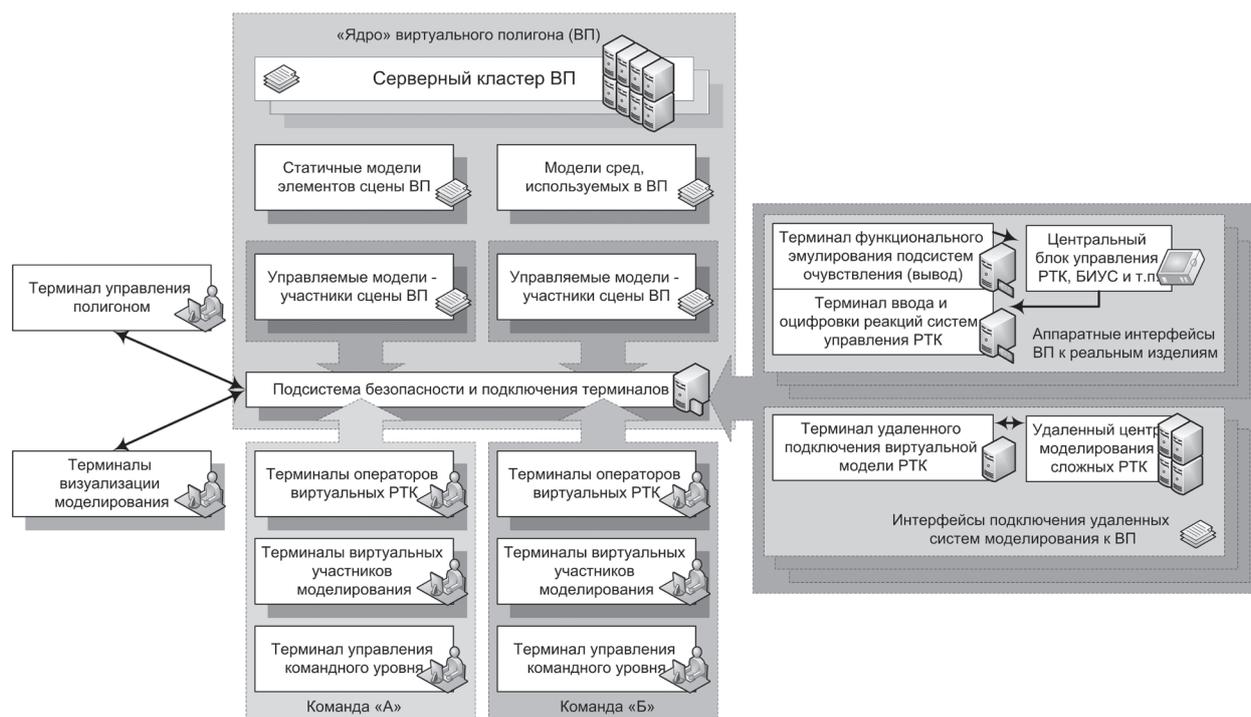


Рис. 1. Общая структура комплекса ВП

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

с ручным управлением, так и с автоматизированным. Ручное управление предполагает полный контроль оператора за объектом – РТС. Автоматизированное управление предусматривает наличие режимов автоматического управления РТС с возможностью вмешаться для оператора.

Поскольку ВП предполагает моделировать групповые сценарии функционирования РТС, важнейшим элементом является возможность имитации ВП взаимодействия не только «оператор – РТС», но и «РТС – РТС», а так же «оператор 1 – РТС – РТС – оператор n». Отдельного внимания заслуживает связка «оператор – терминал». Она включает в себя элементы представления информации от РТС человеку и элементы управления РТС человеком.

Можно выделить несколько возможных схем взаимодействия, по степени участия оператора в работе РТС, реализуемых через терминал ВП:

а) **«Прямое управление»** РТС оператором, когда оператор сам управляет исполнительными

устройствами виртуального РТС.

б) **«Компенсированное управление»** РТС, когда исполнительные устройства статически неустойчивого РТС получают автоматизированное управление от встроенной системы управления (например, системы стабилизации), совмещенное с командами оператора.

в) **«Косвенное постоянное управление»** РТС состоит в постоянном контроле оператором РТС и подаче специализированных, заранее заданных команд блоку управления, который и осуществляет непосредственное управление исполнительными устройствами.

г) **«Косвенное сеансовое управление»** РТС состоит в периодическом контроле оператором состояния РТС и подаче специализированных команд запуска заранее заданных программ полезных действий системе управления.

д) **«Мета-командное управление»** РТС ИСУ состоит в периодическом контроле оператором состояния РТС и постановке задач системе управ-

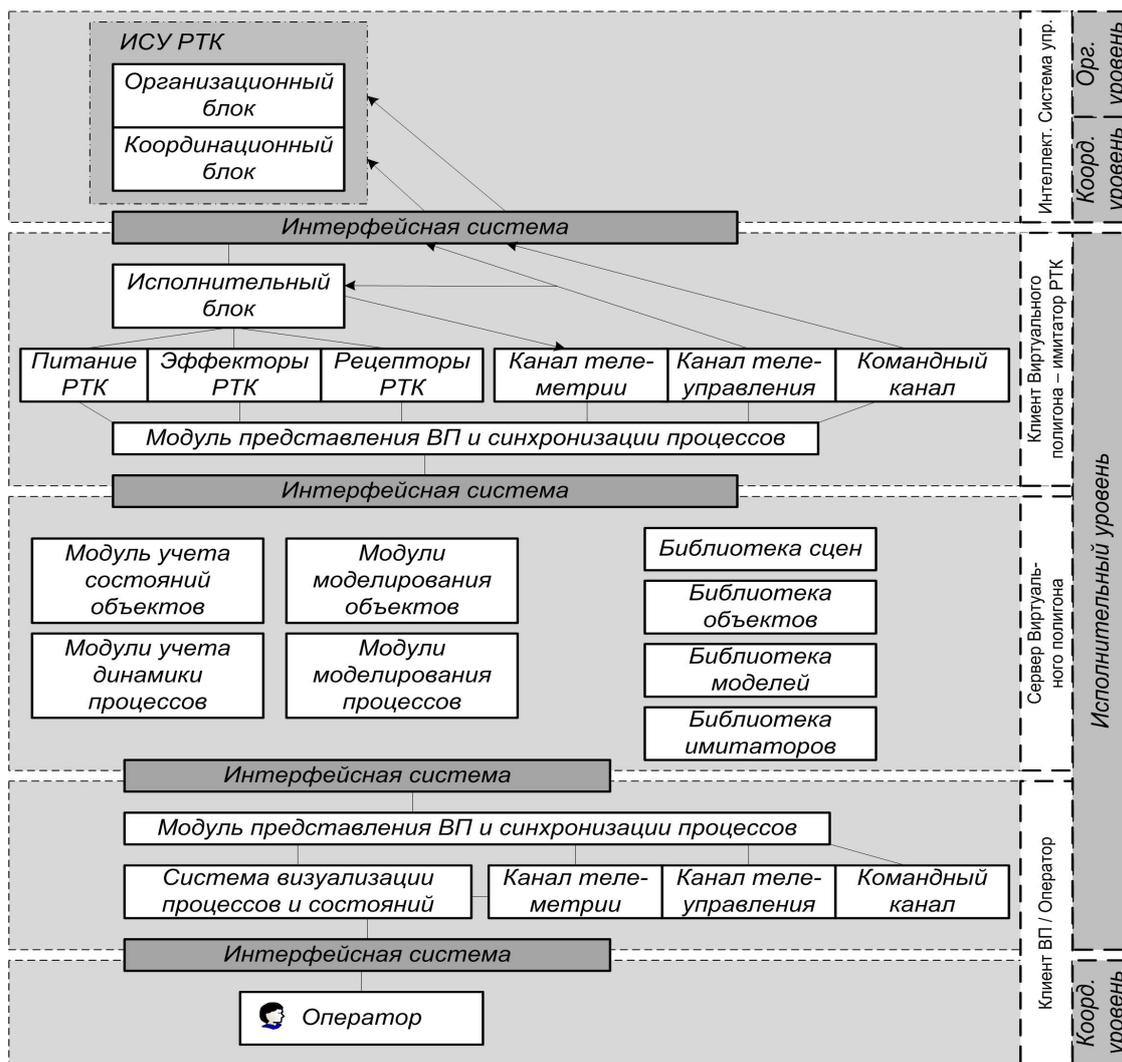


Рис. 2. Блок-схема взаимодействия подсистем в ВП

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ления, которая автоматически ищет решение и составляет алгоритм действий.

Система ВП обладает несколькими ключевыми особенностями:

а) **Сетецентричность** – изначальная ориентированность ВП на работу с удаленно подключенными клиентами ВП, возможность доступа к среде симуляции по сети интернет;

б) **Многоуровневость** – структура ВП предназначена для работы с виртуальными РТС на нескольких уровнях: виртуальное взаимодействие с ВРС в виртуальном пространстве ВП, операторское управление единичными и групповыми ВРС, командное управление единичными и групповыми ВРС, модераторское управление процессом симуляции на сцене ВП;

в) **Параллельность** – ВП допускает одновременную работу нескольких сцен имитационного моделирования, с параллельным подключением множества клиентов через терминалы ВП;

г) **Разнообразность** – концепция ВП допускает свободу пользователя в выборе ВРС, сцены, сценария и динамики окружающего мира для симуляции ВРС, выбор условий эксперимента и запуск симуляции инициируется пользователем.

С учетом данных особенностей, учитывающих уровни взаимодействия подсистем участников, структура ВП выглядит следующим образом (см. рисунок 2), из которого видно, система безопасности ВП должна обеспечивать не только безопасность серверов ВП, но и безопасность множества интерфейсов, каналов связи, а так же терминалов ВП, подключенных по ним.

Обобщенные угрозы информационной безопасности ВП

Информационные системы имеют три основных направления угроз: утечка информации, искажение информации, нарушение функционирования. В приложении к структуре, задачам и процессам информационной системы ВП, это дает следующие основные виды угроз:

Утечка информации:

1а. Утечка параметров моделей, структур виртуальных РТС, составляющих как коммерческие, так и военные секреты;

1б. Утечка информации о процессах, порядке и условиях моделирования, в том числе групповых РТС;

1в. Утечка информации об основных результатах моделирования РТС;

1г. Утечка информации о результатах анализа массива данных, собранного в процессе моделирования РТС;

1д. Утечка информации о групповом составе РТС участников моделирования;

1е. Утечка информации о применяемых методиках и сценариях моделирования;

1ж. Утечка информации о методиках анализа, применяемых в процессе моделирования и по итоговым результатам.

Искажение информации:

2а. Искажение исходных данных, применяемых моделей и их частей, справочников и таблиц, критических условий и т.п.;

2б. Искажение информации, циркулирующей на ВП в процессе моделирования;

2в. Искажение информации, собранной в итоге процесса моделирования;

2г. Искажение результатов проведенного анализа по результатам цикла моделирования.

Нарушение функционирования:

3а. Нарушение внутренних процессов подготовки, проведения и завершения цикла моделирования на ВП;

3б. Нарушение порядка и способа взаимодействия внутренних подсистем ВП;

3в. Нарушение порядка и способа взаимодействия внешних терминалов и подсистем ВП;

3г. Нарушение работоспособности серверов, терминалов и прочего оборудования системы ВП;

Наиболее вероятные возможные направления утечки данных или деструктивного информационного воздействия, представляются следующими:

Внешние:

1а. Удаленное несанкционированное подключение, имитация терминала ВП или контрольно - визуализационного терминала модератора ВП.

1б. Удаленное несанкционированное подключение, имитация канала связи ВП, перехват трафика, изменение маршрутизации информационных пакетов легального терминала.

1в. Инфицирование вирусным ПО штатных программных средств легального терминала, контроль, отбор, модификация получаемой и отправляемой информации.

Внутренние программные:

2а. Инфицирование вирусным ПО штатных программных средств серверов ВП, серверов терминального доступа, контроль, отбор, модификация получаемой и отправляемой информации;

2б. Инфицирование вирусным ПО, штатных программных средств серверов баз данных, облачных служб и файловых серверов;

2в. Инфицирование вирусным ПО, штатных программных средств управления серверами ВП, серверов СБВП.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Внутренние аппаратные подключения:

3а. Подмена серверного оборудования на «доработанное»;

3б. Внедрение подключений в кабельную систему ВП на уровне серверной;

3в. Подмена коммуникационного оборудования на «доработанное»;

3г. Внедрение подключений в кабельную систему ВП на уровне общих помещений в организации – держателе серверов ВП;

Для снижения данных угроз, система безопасности ВП (СБВП) должна обеспечивать безопасность серверных подсистем ВП, большого числа открытых каналов связи, терминалов ВП и подключенных к ним компонентов РТС. На рисунке 3 приведена обобщенная структура группового моделирования РТС на ВП, которая показывает обилие каналов связи, терминалов подключаемых к серверу ВП удаленно, по открытым каналам связи «интернет». К этому добавляется необходимость раздельного обеспе-

чения безопасности процессов одновременного моделирования сразу нескольких «сцен» с разным составом подключаемых участников к ВП.

Применение существующих готовых отдельных подсистем безопасности, наподобие межсервечного экрана или системы шифрования каналов связи, создает иллюзию достаточности, при том, что любой удаленный терминал, будучи скомпрометированным или взломанным, продолжит участвовать в процессах моделирования и, все так же, будет получать полный объем информации.

Все это порождает проблему обеспечения комплексной безопасности ВП и подключенных терминалов с оборудованием РТС.

Основные направления и принципы обеспечения безопасности ВП

Просматриваются следующие направления обеспечения безопасности в распределенной системе ВП по блочно-территориальному признаку:

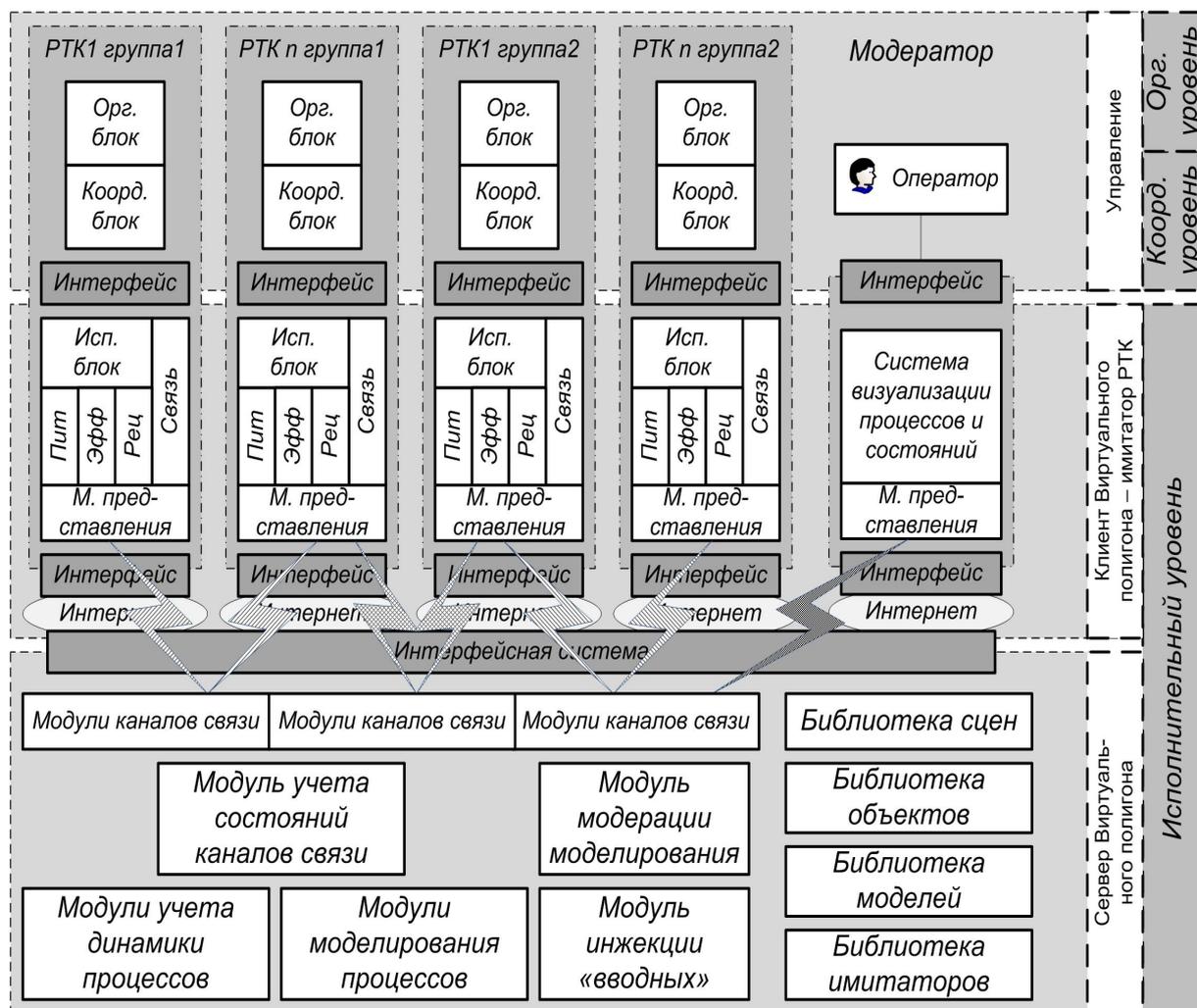


Рис. 3. Обобщенная структура группового моделирования РТС на ВП

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Обеспечение безопасности сервера ВП.
- Обеспечение безопасности терминалов.
- Обеспечение безопасности каналов связи.

В то же время, с точки зрения информации, необходимо обеспечивать защиту по таким направлениям:

- Обеспечение безопасности программных и информационных библиотек, моделей, сценарием моделирования, тестовых сцен и объектов, их составляющих.
- Обеспечение безопасности процессов и порядка моделирования, применяемых методик.
- Обеспечение безопасности данных моделирования.
- Обеспечение безопасности результатов моделирования.
- Обеспечение внутренней безопасности работы системы безопасности ВП.

Предлагается при разработке подсистем ВП учитывать следующие общие принципы защиты информации:

- Весь информационный трафик за пределами серверной считать движущимся по открытым каналам связи.
- Ни одна подсистема ВП не должна иметь значимой полноты информации, необходимо разделение компетенций и информации.
- Входящий на сервера поток данных от терминалов, не должен ни при каких условиях исполняться как произвольный бинарный программный код на стороне сервера. Должны быть предусмотрены меры по контролю и исключению процессов смены маркеров или типов передаваемых информационных файлов на «исполняемый», или перемещения подобных блоков информации в зоны памяти для исполняемого кода.

- Необходимая программная среда межподсистемной автоматизации за пределами серверного кластера (все команды терминалов серверам и обратно) должна реализовываться скриптовыми средствами, вербальными командами, метаграмматическими инструментами или любыми другими командными конструкциями на языках высокого уровня.

- При необходимости максимального повышения быстродействия командных конструкций, возможное компилирование их в оптимизированный код (не бинарный!), должно производиться только «на стороне сервера», в процессе подготовки сеанса моделирования (СМ). Терминал не должен иметь возможность поправлять полученный код, только перекомпиляция.

- Все командные «конструкции» терминалов и серверных подсистем, циркулирующие в системе, должны иметь маркеры принадлежности

терминалу и сеансу моделирования с целью реализации изоляции управляющих процессов одного сеанса моделирования, от других сеансов, работающих на сервере параллельно.

- Терминал ВП должен иметь возможность записи черновой информации с набора виртуализуемых элементов только «своего» РТС. Области хранения данных РТС должны быть изолированы между собой.

- В случае моделирования группового взаимодействия РТС, все внутренние черновые данные РТС группы собираются и предоставляются только через выделенный терминал модератора группы.

- Прямой межтерминальный поток обмена данными должен быть полностью исключен. Весь поток должен идти через сервера ВП. В случае необходимости, внутригрупповой информационный поток, может быть замкнут, контролироваться и управляться через локальный терминал модератора группы совместно с сервером ВП.

- Прямой межгрупповой поток обмена данными должен быть полностью исключен. Как и в случае с терминалами, весь поток должен идти через сервера ВП. В случае необходимости контроля и управления сеансом моделирования, межгрупповой информационный поток, может быть перенаправлен через сервер ВП на терминал «супервизора сцены».

Предлагаемое решение проблемы обеспечения безопасности ВП

При реализации комплексной СБВП целесообразно сочетание как пассивных, так и активных методов защиты и противодействия угрозам ИБ.

К «пассивным» методам защиты можно отнести следующие:

- Резервное копирование собираемой информации с периодическим контролем целостности.
- Шифрование «на лету» информации, хранимой на носителях данных.
- Шифрование (крипто-кодирование) информации, передаваемой по открытым каналам связи.
- Контроль «сигнатур трафика», выделение необычных.
- Контроль «сигнатур программных процессов» на серверах и терминалах, выделение необычных.
- Контроль целостности данных в информационных пакетах процессов обмена данными всего ВП.
- Контроль MAC, IP адресов и других служебных маркеров информационных пакетов, циркулирующих как между терминалами и сервером, так и между программными процессами внутри серверов.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Сквозной контроль непротиворечивости потока данных и команд между пакетами в рамках обмена данных с одним терминалом и одним сеансом моделирования ВП.

- Контроль маршрутизации информационных пакетов между терминалами и серверами ВП.

К «активным» методам защиты можно отнести следующие:

- Фильтрация по MAC, IP адресам, исходящим и входящим портам информационных пакетов, как терминальных, так и межсерверных.

- Фильтрация пакетов по типам использованных протоколов.

- Фильтрация по специальным служебным маркерам программных подсистем ВП в информационных пакетах, как терминальных, так и межсерверных.

- Коррекция служебной информации IP и UDP – пакетов для специальных целей использования внутренней адресации.

- Коррекция потока UDP-пакетов.

- Модификация потока служебных пакетов для целей работы IDS и динамического формирования «песочницы».

Данные методы, пассивные и активные, можно использовать в следующих направлениях защиты ВП:

Защита информации ВП от утечки предполагает:

- Ограничение круга лиц с доступом на чтение.

- Ограничение доступной информации для отдельного СМ.

- Ограничение времени доступности черновой информации СМ.

- Ограничение каналов и способов доступа к ВП.

- Ограничение адресов и точек доступа в ВП.

- Ограничение порядка доступа к информации ВП.

Защита информации ВП от искажения предполагает:

- Ограничение круга лиц с доступом на запись.

- Централизованное хранение информации.

- Регулярное резервное копирование с контролем целостности.

- Регулярный рабочий контроль используемых справочных данных и библиотек используемых элементов ВРТК при подготовке к СМ.

- Перепроверки собранной информации на непротиворечивость и негативный характер сигнатур процессов, проводимые после СМ.

- Централизованное представление программных и методических средств для анализа информации, собираемой в процессе и по результатам СМ.

Защита ВП от нарушения функционирования предполагает:

- Регулярный рабочий контроль целостности элементов программных подсистем ВП.

- Контроль правильности функционирования на случайных периодических тестированиях и сверках результатов СМ с эталонными.

- Контроль процессов СМ, с применением средств искусственного интеллекта, на соответствие «профилям нарушений».

- Контроль времени исполнения процессов СМ, с применением средств искусственного интеллекта, для выявления корреляций с негативными исходами.

Заключение

В данной работе кратко описано назначение и обобщенная структура ВП, приведены обобщенная схема взаимодействия терминалов с ВП и указаны основные угрозы информационной безопасности ВП.

Предложены основные направления и принципы обеспечения безопасности ВП, позволяющие приблизиться к решению проблемы обеспечения безопасности ВП, как распределенной сетевидной информационной системы.

Литература

1. Маслова Н.А. Методы оценки эффективности систем защиты информационных систем// Штучный интеллект. Донецк, 2008. №4.
2. Панин О. Проблемы оценки эффективности функционирования систем физической защиты объектов// БДИ, 2007. №3.
3. Умников Е.В., Грачев, В.А. Мурашов А.Г. Концепция многоцелевого виртуального робототехнического полигона/Материалы Одиннадцатой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления»; Южный федеральный университет// Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2016. Т.2.
4. Умников Е.В., Царьков А.Н., Грачев В.А., Атакищев О.И. Методы оценки эффективности интеллектуальных систем управления в применении к имитационному моделированию робототехнических комплексов// Известия Института инженерной физики, 2018. №2(48). С.76-82.
5. Умников Е.В. Вопросы технической организации взаимодействия моделей интеллектуальных систем управления, при имитационном моделировании функционирования роботов с применением виртуального полигона/ Сборник материалов 29-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», 2018.
6. Muniz J., McIntyre G., AlFardan N. Security Operations Center. Building, Operating, and Maintaining your SOC. Cisco Press. 448 p.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 539.182

О ПРОЕКТИВНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ МНОГООБРАЗИЯХ В ТОРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ И КВАНТОВОЙ ФИЗИКЕ

ON THE PROJECTIVE ALGEBRAIC VARIETIES IN TORIC GEOMETRY AND QUANTUM PHYSICS

Геннадий Германович Волков

доктор физико-математических наук, профессор
старший научный сотрудник
МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: gennadii.volkov@rambler.ru

Сергей Владимирович Смулов

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. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: Svs_iif@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

Теория торических многообразий играет важную роль в различных областях математики, давая явные связи между комбинаторной геометрией и алгебраической геометрией. Различные применения торической геометрии интенсивно изучаются в квантовой информации, в алгебраической теории кодирования, в кодах с исправлением ошибок, в целочисленном программировании и комбинаторике. В квантовой физике торическая геометрия привлекла особое внимание в результате ее применения 5-дуальных теорий 10-мерных суперструн, F-теории при компактификации дополнительных размерностей на компактные пространства размерностей 4,6,7,8 с группами голономии $SU(2)$, $SU(3)$, G_2 , $Spin_7$, соответственно. Особый интерес вызван к CY_n пространствам с $SU(n)$ -группой голономии, классификация которых на основе мультинарной ($n=3,4,5\dots$) универсальной алгебры рефлексивных проективных весов позволяет проиллюстрировать алгебраическую и топологическую структуру для торических пространств высоких размерностей, которые могут быть связаны с мультинарными симметриями, и которые могли бы открыть новые механизмы квантового запутывания и квантовой телепортации.

Ключевые слова: ториковая геометрия, проективные пространства, квантовая физика, квантовая информация, алгебры, группы, кудиты, группа голономии, графы Берже, Калаби-Яу пространства.

Summary

The theory of toric varieties plays an important role in various areas of mathematics, providing explicit connections between combinatorial geometry and algebraic geometry. Various applications of toric geometry are intensively studied in quantum information, in algebraic coding theory, error correction codes, in integer programming and combinatorics. In quantum physics, toric geometry has attracted particular attention as a result of its application of 5-dual theories of 10-dimensional superstrings, F-theory in the compactification of extra dimensions into compact spaces of dimensions 4,6,7,8 with holonomy groups $SU(2)$, $SU(3)$, G_2 , $Spin_7$, respectively. Of particular interest is the CY_n spaces with $SU(n)$ -the holonomy group, the classification of which on the basis of the multinary ($n=3,4,5\dots$) universal algebra of reflexive projective weights allows illustrating the algebraic and topological structure for toric spaces of high dimensions, which can be related to the multinary symmetries, and which could open up new mechanisms of quantum entanglement and quantum teleportation.

Keywords: toric geometry, projective spaces, quantum physics, quantum information, algebras, groups, qudites, holonomy group, Berger graphs, Calabi-Yau spaces.

Введение

Одной из наших целей данной статьи является ознакомление с современным уровнем торической геометрии комплексных проективных

пространств с целью использования ее достижений в изучении геометрии квантовых состояний высших размерностей – кудитов – с условием их квантового запутывания [1,2]. Другая наша цель

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

связана с дальнейшим развитием универсальной алгебры рефлексивных проективных чисел в торической многомерной геометрии Калаби-Яу CY_3, CY_4, \dots и изучением в них новых n -арных симметрий, которые уже были предложены в наших статьях [3,4].

Важнейшим результатом торической геометрии является то, что благодаря использованию однородного координатного построения, торические многообразия стали полезными для построения комплексных проективных и весовых проективных пространств [5-15]. Торические многообразия можно принимать как алгебраическое обобщение комплексных весовых проективных пространств. Наиболее важными здесь являются весовые проективные пространства, которые представляют огромный интерес в квантовой информации, теории кудитов и их квантового запутывания.

В торической геометрии также возможно построить компактные многообразия Калаби-Яу, а именно как компактные гиперповерхности в компактных торических многообразиях. Метод рефлексивных многогранников дает очень полезное описание таких компактных Калаби-Яу семейств [9-15]. Именно рефлексивность многогранников гарантирует, что компактная гиперповерхность – это Калаби-Яу [9]. Торические многообразия Калаби-Яу привлекли большое внимание теоретической физики из-за их связи с теорией суперструн (см. [10,11]). Была открыта дуальность 3-мерных Калаби-Яу многообразий, которая называется зеркальной симметрией, определяющей соответствие между двумя топологически различными трехмерными многообразиями Калаби-Яу, V и V^* такими, что числа Ходжа удовлетворяют соотношениям [9]

$$h_{1,1}(V) = h_{2,1}(V^*), \quad h_{1,1}(V^*) = h_{2,1}(V).$$

Дуальность многообразий Калаби-Яу показывается в терминах торического подхода как соответствие между многообразиями Калаби-Яу $V \leftrightarrow V^*$ и рефлексивными многогранниками $\Delta \leftrightarrow \Delta^*$ [9]. 3-х мерные $K3 \times T^2$ -многообразия и Калаби-Яу CY_3 -многообразия (размерности комплексные) были использованы в исследовании четырехмерного $N=2$ -суперструнного вакуума в связи с предполагаемой дуальностью между компактификациями 10-мерной гетеротической струны $E8 \times E8$ на многообразии $K3 \times T^2$ и 10-мерной суперструны типа IIA , компактифицированной на многообразии Калаби-Яу $M=CY_3$,

$$Het_{E8 \times E8}[K3 \times T^2, V] \approx IIA[M],$$

где V обозначает расслоение, соответствующее фоновому калибровочному полю, а $M=M_1-CY_3$ -многообразие, зависящее от V . Это индуцирует соответствие между векторным расслоением V

над $K3 \times T^2$ -многообразием и CY_3 -многообразием, являющимся $K3$ -расслоением (см. [11,12]). Эти исследования и многие другие показали, что соответствующей цепочке Хиггсинга гетеротических моделей отвечает цепочка многообразий Калаби-Яу с просто выявляемой структурой при их описании в терминах рефлексивных многогранников, являющихся не только $K3$ -расслоениями, но и в более общих случаях когда четырехмерный многогранник просто содержит многогранник $K3$. Именно эта вложенность многогранников мотивируется тем, что в ребрах многогранника $K3$ можно наблюдать аффинные диаграммы Дынкина, связанные с Картан-Ли алгебрами [10-13, 14-15].

Решетчатые многогранники, порождают семейства гиперповерхностей Калаби-Яу $F(\Delta)$. Такие многогранники допускают комбинаторную характеристику и будут называться рефлексивными многогранниками.

Систематическая классификация многообразий $K3, CY_3, CY_4$ в основана на их построении в рамках торической геометрии [5-10]. В рамках этого подхода CY_n -многообразия и их зеркальные партнеры являются торическими многообразиями, которые были ассоциированы с многогранниками в пространствах соответствующей размерности 2,3,4. Хотя классификация торических CY_n -многообразий, основанная на методике построения рефлексивных многогранников, добилась больших успехов с помощью компьютеров [12,13], она не всегда полно и явно отражает ряд особенностей их строения с ростом размерности с соответствующим появлением внутренних структур, которые могли бы стать указанием на возможное существование новых алгебр и симметрий за пределами бинарных групп Ли [1-4,16-19].

Все повторяющиеся с размерностью вложения CY_p -многообразий меньших размерностей в CY_n больших размерностей $p < n$, что геометрически просто трактуется на языке рефлексивных Ньютоновских многогранников $\{\Delta \leftrightarrow \Delta^*\}$, и чудесное соответствие между классификацией дискретных подгрупп G группы $G \subset SU(2)$, связанных с орбиформными сингулярностями C^2/G и диаграммами Дынкина простых групп Ли в $K3$ -многогранниках, стали для нас аргументами к поискам алгебраических связей между Калаби-Яу пространствами различных размерностей с надеждой открыть новые симметрии за пределами Картан-Ли классификации. В связи с этими поисками было предложено алгебро-геометрическое построение проективных весовых векторов (k_p, \dots, k_n) , которые можно называть как проективные рефлексивные числа, определяющих соответствующие рефлексивные много-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

гранники в пространстве R^n и связанные с ними пространства CY_d , где $d=(n-2)$ -комплексная размерность [14,15]. Этот метод может стать исчерпывающим до любой желаемой комплексной размерности $d=1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots$, так как базируется на алгебре многомерных проективных рефлексивных чисел со все увеличивающимся числом композиций, так чтобы получить полную классификацию n -мерных рефлексивных чисел, начиная с единицы, нужно использовать все законы композиции 2,3,..., то есть, бинарные, тернарные, и так далее вплоть до n -арных. Настолько богата топологическая и комплексная, келеровская,... структуры этих многообразий. В качестве первого шага в этой программе было построение пространств $K3=CY_2$, которое является полным для пространств $K3$, описываемых простыми полиномиальными нулями. Любые две $K3$ -поверхности диффеоморфны друг другу, но алгебраически $K3$ -поверхности могут быть представлены различными алгебраическими голоморфными уравнениями в весовых однородных координатах в $P^n(k_0, \dots, k_n)$ для некоторых n , что связывается с вариациями комплексной структуры и, соответственно, определяется рангом группы Пикара $0 \leq \rho_{k3} \leq 20$ [10].

Предложенная алгебраическая классификация CY_n -пространств на основе структурных свойств проективных рефлексивных весовых «чисел» получила название «Универсальная алгебра рефлексивных проективных чисел» [14], в которой используется для описания класса n -мерных многообразий законы композиций g_r от арити $r=2$ до арити $r=n$ с включением обратной $(g_r)^{-1}$. Универсальная алгебра описывает не только каждый класс всего множества Калаби-Яу пространств любой размерности (набор всех весовых проективных векторов размерности n), но дает всю информацию о топологических и алгебраических подструктурах каждого представителя из этого класса, образуя в соответствии с данным n , бинарные, тернарные и т.д. представления универсальной алгебры.

Аффинные и проективные алгебраические многообразия

Пусть $C[\xi]=C[\xi_1, \dots, \xi_m]$ – кольцо полиномов от m -переменных над C . Если подмножество $A=(f_1, \dots, f_p) \subset C[\xi]$, то тогда [5-10]

$$V(A) = \{z \in C^m : f_1(z) = \dots = f_p(z) = 0\}$$

называется аффинным торическим множеством, определенным A . Заметим, что для множества $X \subset C^m$ можно определяется идеал $I(X)$ следующим образом:

$$I(X) = \{f \in C[\xi] : f|_X = 0\},$$

называемый исчезающим идеалом, порожден-

ным множеством X . Максимальный идеал

$$I(\{z\}) = C[\xi]/(\xi_1 - z_1) + \dots + C[\xi]/(\xi_m - z_m)$$

строится на базе $A = \{\xi_1 - z_1, \dots, \xi_m - z_m\}$ для каждой точки $z = (z_1, \dots, z_m) \in C^m$. Благодаря слабой теореме Гильберта Nullstellensatz, соответствие $z \rightarrow I(\{z\})$ означает взаимно-однозначное соответствие между точками $z \in C^m$ и максимальными идеалами I_{max} из $C[\xi]$:

$$C^m \leftrightarrow \{I_{max} \subset C[\xi], I_{max} = Spec(C[\xi])\}.$$

Заметим, что идеал I в коммутативном кольце R с единицей будет максимальным тогда и только тогда, когда R/I есть поле, что означает, что максимальный идеал является простым. Для любого идеала $I \subset C[\xi]$ имеем $V(I) = \{z \in C^m : I \subset I_{max}\}$. Тогда для исчезающего идеала $I(V) \equiv I_V$ соответствующее фактор-кольцо $R_V = C[\xi]/I_V$ будет являться координатным кольцом аффинного алгебраического множества $V(I)$, порождаемый координатными функциями ξ_i . Генераторы $(\xi_i + I_V) \subset R_V$ являются ограничениями координатных функций на аффинное алгебраическое множество V . В результате с учетом топологии Зариского достигается взаимно-однозначное соответствие между V и максимальным идеалом $I_V : V \cong Spec(R_V)$. В более общих аффинных схемах $V(I) = Spec(R)$, в которых R является коммутативным кольцом $R \cong C[z_1, \dots, z_m]/I$, где вместо максимальных идеалов I используется расширение до простых идеалов в $R[Cox]$. Современный путь построения геометрических конструкций в рамках схемы X содержит две особенности: во-первых, это топология X , и во-вторых, класс функций, которые задают структуру на этом пространстве [5-10]. Для определения точки схемы X используются значения функций, соответствующие простым идеалам кольца. Подытоживая можно сказать, что каждая коммутативная конечно-порожденная C -алгебра $R = C[\xi_1, \dots, \xi_m]/I$ определяет аффинное комплексное многообразие $Spec(R)$, которое отождествляется с подмногообразием $V(I) \subset C^m$, являющимся множеством нулей полиномов в идеале I .

Для конструкций проективных алгебраических многообразий необходимо рассматривать полином $f \in C[z_0, \dots, z_m]$ однородной степени d , для которых каждая компонента его имеет ту же степень d , что эквивалентно следующему тождеству:

$$f(\lambda z_0, \dots, \lambda z_m) = \lambda^d f(z_0, \dots, z_m), \lambda \in C^*, C^* = C \setminus \{0\}$$

Для любой точки u комплексного проективного пространства P^m , определяемой однородными координатами $u = [u_0, \dots, u_m] \in P^m$, $[u_0, \dots, u_m] = [\lambda u_0, \dots, \lambda u_m]$, несмотря на невозможность определения самой функции $f(u)$, уравнение $f(u) = 0$ хорошо определяется. В результате, однородные полиномы $f_1, \dots, f_r \in C[z_0, \dots, z_m]$ можно использовать для определения проективного алгебраического многообразия:

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$$V(f_1, \dots, f_r) = \{u \in P^m \mid f_1(u) = \dots = f_r(u) = 0\} \subset P^m.$$

Комплексное проективное мерное пространство P^m можно рассматривать как объединение $(m+1)$ -аффинных карт $P^m = U_0 \cup \dots \cup U_m$:

$$[u_0, \dots, u_m] \in P^m \rightarrow (u_0/u_k, \dots, u_{k-1}/u_k, u_{k+1}/u_k, \dots, u_m/u_k) \in U_k \cong C^m, \\ (u_0, \dots, u_m) \in C^{m+1} \rightarrow [u_0, \dots, u_{k-1}, u_{k+1}, \dots, u_m] \in V(u_k) \cong P^m,$$

где $k=0, \dots, m$. P^m можно считать как C^m с P^{m-1} на бесконечности, дополняя его до компактного многообразия. Следуя этому можно показать, что любое проективное алгебраическое многообразие $V = V(f_1, \dots, f_r) \subset P^m$ является объединением аффинных многообразий с переносом условия нормальности от аффинного случая к проективному. Идеал $I \subset C[z_0, \dots, z_m]$, порожденный однородными полиномами, называется однородным. Однородный идеал определяет проективное алгебраическое многообразие

$$V(I) = \{u \in C^m \mid f(u) = 0, \text{ для всех } f \in I\}.$$

Обратно, для данного проективного многообразия $V \subset C^m$ можно найти однородный идеал $I(V)$. Для проективного алгебраического многообразия также существует проективная версия теоремы Nullstellensatz, которая различает случаи $V(I) = 0$ и $V(I) \neq 0$ [5-10].

Однородные полиномы не могут определять функции на V , но отношение двух полиномов одинаковой степени позволяет это сделать. Так для полиномов $f, g \in C[z_0, \dots, z_m]$ одинаковой степени d , причем $g \neq 0$, $f/g \mid P^m \rightarrow C$ – хорошо определенная функция на $P^m \setminus V(g)$. Поле таких функций на P^m , называемых рациональными, обозначается $C(P^m)$.

Следующий шаг это рассмотрение весовых проективных многообразий. Так вводя веса, целые положительные числа, k_0, \dots, k_m , $k_0 + \dots + k_m = d$ весовое проективное пространство определяется как фактор-пространство

$$P(k_0, \dots, k_m) = (C^{m+1} \setminus \{0\}) / \sim$$

с соответствующим условием эквивалентности

$$[u_0, \dots, u_m] \sim [\lambda^{k_0} u_0, \dots, \lambda^{k_m} u_m], \lambda \in C^*.$$

Веса выбираются с условием дополнительной эквивалентности по отношению умножения всех его компонент на положительное целое число. В терминах полиномиального кольца $C[z_0, \dots, z_m]$ это означает, что в каждом мономе переменные z_i подбираются в степени k_i , соответствующей весовому однородному полиному степени d :

$$f(\lambda^{k_0} z_0, \dots, \lambda^{k_m} z_m) = \lambda^d f(z_0, \dots, z_m),$$

которые позволяют строить весовые проективные идеалы $I \subset C[z_0, \dots, z_m]$ и соответствующие им весовые проективные алгебраические многообразия $V(I) \subset P^m(k_0, \dots, k_m)$, являющиеся торическими многообразиями [5-8].

Неприводимое алгебраическое подмногообразие Y неприводимого многообразия X являет-

ся неприводимым дивизором, если его коразмерность равна 1. Неприводимость многообразия V означает, что оно не может быть представлено в виде объединения подмногообразий, то есть в виде $V = V_1 \cup V_2$, $V_i \neq V$. Каждое аффинное многообразие V может быть представлено в виде объединения неприводимых подмногообразий V_i : $V = V_1 \cup \dots \cup V_r$, так что ни одно из V_i не входит в $\bigcup_{j \neq i} V_j$. Неприводимость многообразия V связана с условием, что идеал $I(V)$ является простым. Если V неприводимое, то область целостности $C[V]$ имеет поле рациональных функций $C(V)$ на нем. Если $V = C^m$, то $C[V]$ – полиномиальное кольцо $C[z_1, \dots, z_m]$, а $C(V)$ – кольцо рациональных функций $C(z_1, \dots, z_m)$ на V . C^m является нормальным, так как его координатное кольцо $C[z_1, \dots, z_m]$ – целостно замкнуто. Условие нормальности является решающим для проективных алгебраических многообразий, так как важнейшие результаты получены для нормальных торических многообразий [5-8].

Аффинные и проективные торические многообразия

Хорошо известно, что n -мерное комплексное проективное пространство P^n определяется как фактор-пространство

$$P^n = C^{n+1} \setminus \{0, \dots, 0\} / C^*, \quad C^* = C \setminus \{0\},$$

где C^* осуществляет действие эквивалентности $\{z_0, z_1, \dots, z_n\} \rightarrow \{\lambda z_0, \lambda z_1, \dots, \lambda z_n\}$, $\lambda \in C^*$.

Торические множества можно рассматривать как алгебраическое обобщение комплексных (весовых) проективных пространств. Торическое множество (variety) V определяется как фактор-пространство

$$V = C^m \setminus \{U_\Delta\} / (C^*)^k, \quad k < n,$$

где C^n - n -мерное комплексное пространство;

$(C^*)^k = (C^k) \setminus \{0\}$ – алгебраический тор с групповым действием, которое является отношением эквивалентности.

Вычитаемое из C^n множество U_Δ фиксируется непрерывной подгруппой $(C^*)^{n-k}$, остаточным действием $(C^*)^n$ в C^n . Торическое многообразие является обобщением этого, в котором вместо того, чтобы просто удалять начало координат, мы удаляем точечное множество U_Δ , зависящее от определенных данных, и производим факторизацию по количеству действий C^* . Действие (C^*) и вид U_Δ будут определены в терминах некоторых простых комбинаторных данных [5-8].

Комплексное проективное пространство P^n содержит $(C^*)^n$ как плотное открытое подмножество и, следовательно, может рассматриваться как компактификация $(C^*)^n$. Например, P^1 – не что иное, как сфера S^2 , являющаяся компактификацией C^* , в которое добавлены точки в нуле

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

и бесконечности. В соответствии с этим торическое многообразие V над C может рассматриваться как комплексное геометрическое пространство, содержащее как открытое плотное подмножество алгебраический тор $T=C^* \times \dots \times C^*=(C^*)^n$ с групповым дополнительным действием на $V:T \times V \rightarrow V$. Подмножество точек $V \setminus T$ можно рассматривать как предельное действие $T \rightarrow T$ и осуществляет компактификацию T . В результате, торическое многообразие определяется как неприводимое многообразие V , такое что $(C^*)^n$ является открытым по Зариски подмножеством в V и действие $(C^*)^n$ на себя в расширяется на все $V[6]$. T включает вещественный тор как: $T=(S^1)^n \times (R_{\geq 0})^n$. Тор $T=(C^*)^n$ – группа, действующая на себя умножением на каждом аффинном торическом многообразии X_{Σ} , описывается следующим образом. Для системы генераторов (a_1, \dots, a_m) , где каждое $a_i=(a_i^1, \dots, a_i^n)$, $a_i^j \in \mathbb{Z}$ и $t=(t_1, \dots, t_n) \in T$, $t_j \in C^*$, действие $T \times X_{\Sigma} = X_{\Sigma}$:

$$(t, X_{\Delta}) \rightarrow t \cdot X_{\Delta} = (t^{a_1} z_1, \dots, t^{a_m} z_m),$$

$$t^{a_i} = t_1^{a_i^1} \dots t_n^{a_i^n} \in C^*,$$

где точка $z \in X_{\Sigma}$ записывается в виде $z=(z_1, \dots, z_m) \in C^m$.

В данном определении предполагалось, что в многообразии X_{Σ} индекс относился к вееру $\Sigma \in N$, ($N \cong \mathbb{Z}^n$), что согласовано с действием тора на аффинных торических многообразиях X_{σ} , где σ – конус, принадлежащий вееру $\sigma \in \Sigma$. Веер $(fan) \Sigma$ в евклидовом пространстве R^n – это конечное объединение конусов таких что, каждый конус σ является сильно выпуклым многогранным решетчатый конусом, каждая грань конуса σ является конусом σ , и если σ и σ' являются конусами из Σ , тогда $\sigma \cap \sigma'$ есть общая грань σ и σ' . Веер в решетке N представляет собой набор сильно выпуклых рациональных многогранных конусов σ_i в вещественном векторном пространстве $N_R = N \otimes_{\mathbb{Z}} R$. Каждый многогранный выпуклый конус

$$\sigma = \{x \in R^n: x = \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_m v_m, \lambda_k \in R, \lambda_k > 0\},$$

с вершиной в начале координат, натянут на конечное число векторов $\{v_1, \dots, v_m\}$, которые являются генераторами конуса в решетке N , так, что любой угол, под которым эти векторы проходят в вершине, меньше 180° . Конус называется решеточным, если все вектора v_j принадлежат N , и сильно выпуклым, если он не содержит прямых линий, проходящих Z^n через вершину ноль, $\sigma \cap (-\sigma) = \{0\}$.

Для построения торических многообразий необходимо ввести двойственный конус (дуальный) σ^\wedge , связанный с конусом σ следующим образом [5-8]:

$$\sigma^\wedge = \{u \in (R^n)^*: \langle u, v \rangle > 0, \forall v \in \sigma\},$$

где $(R^n)^*$ – дуально пространству R^n .

\langle, \rangle – дуальное спаривание.

Решетка N является свободной абелевой группой. Из решетки $N \cong \mathbb{Z}^n$ можно построить дуальную решетку $M = Hom_{\mathbb{Z}}(N, \mathbb{Z})$ и, соответственно, дуальное спаривание \langle, \rangle на уровне решеток N и M . Можно выделить следующие свойства, вытекающие из дуальности этих решеток: если σ решетчатый конус, то σ^\wedge является решетчатый конусом относительно решетки M , σ – многогранный выпуклый конус, то и σ^\wedge – многогранный выпуклый конус. Но заметим, что если σ сильно выпуклый конус, то σ^\wedge не обязательно сильно выпуклый конус. Грань τ конуса σ определяется следующим образом

$$\tau = \sigma \cap \mathcal{V}^\perp = \{v \in \sigma: \langle \mathcal{V}, v \rangle = 0, \mathcal{V} \in M\}, \mathcal{V} < \sigma.$$

Конус – это грань самого себя, другие грани называются собственными гранями. Одномерная грань называется ребром. Фактически, если $\{v_i\}$ – это набор образующих конуса σ , то конус \mathcal{V} порождается теми векторами v_i , для которых $\langle \mathcal{V}, v_i \rangle = 0$. Если $\tau = \sigma \cap \mathcal{V}^\perp$ есть грань σ , то $\tau = \sigma + R_{\geq 0}(-\mathcal{V})$, и если $\tau < \sigma$, то $\sigma^\wedge \subset \tau^\wedge$ [5-8].

Если σ конус, то $\sigma \cap N = S$ – моноид (полугруппа), конечно порожденный элементами $a_1, \dots, a_m \in S$, называемыми генераторами моноида, так что

$$\forall s \in S, s = a_1 \alpha_1 + \dots + a_m \alpha_m, \alpha_i \in R_{\geq 0}.$$

Если σ многогранный решетчатый конус, то $\sigma \cap N$ – конечно порожденный моноид, который применяемый к многогранному дуально решеточному конусу σ^\wedge обозначается как $S_\sigma = \sigma^\wedge \cap M$. В качестве примера можно рассмотреть в пространстве R^2 нуль-мерный конус $\sigma = \{0\}$. В двойственном пространстве $(R^2)^*$ моноид $S_\sigma = \sigma^\wedge \cap M$ генерируется векторами $(e_1^*, -e_1^*, e_2^*, -e_2^*)$. Если σ – рациональный многогранный выпуклый конус и $\tau = \sigma \cap \mathcal{V}^\perp$ – грань σ , $\mathcal{V} \in S_\sigma = \sigma^\wedge \cap M$, то $S_\tau = S_\sigma + Z_{\geq 0}(-\mathcal{V})$.

В кольце многочленов Лорана

$$C[z, z^{-1}] = C[z_1, \dots, z_n, z_1^{-1}, \dots, z_n^{-1}]$$

моном Лорана записывается

$$\lambda z^a = \lambda z_1^{a_1} \dots z_n^{a_n}, \lambda \in C^*, a = (a_1, \dots, a_n) \in \mathbb{Z}^n.$$

В определении торических многообразий важнейшим моментом является то, что изоморфное отображение аддитивной группы Z^n в мультипликативную группу мономов полиномов Лорана

$$C[z, z^{-1}]: a = (a_1, \dots, a_n) \rightarrow z^a = z_1^{a_1} \dots z_n^{a_n}.$$

Вводя для полиномов Лорана $f = \sum c_a z^a$ носитель $supp(f) = \{a \in \mathbb{Z}^n: c_a \neq 0\}$, для решеточного конуса соответствующее кольцо

$$R_\sigma = \{f \in C[z, z^{-1}]: supp(f) \subset \sigma^\wedge \cap M\}$$

есть конечно порожденная мономиальная C -алгебра, с которой можно связать координатное кольцо. а затем и аффинное многообразие [5-8].

Каждая коммутативная конечно порожден-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ная C -алгебра R определяет аффинное многообразие $\text{Spec}(R)$. Если выбраны образующие R , то R можно представить в виде $C[\xi_1, \dots, \xi_n]/I$, как координатное кольцо с различными идеалами I . Тогда $\text{Spec}(R)$ отождествляется с подмногообразием $V(I)$ в C^n , которое есть множество общих нулей многочленов в I . Аффинное торическое многообразие, соответствующее рациональному многогранному строго выпуклому конусу $\sigma: X_\sigma = \text{Spec}(R_\sigma)$. Различные варианты дают разные представления «абстрактного аффинного торического многообразия» $\text{Spec}(R_\sigma)$ в комплексных пространствах C^n [5-11].

Прежде чем строить торические многообразия по вееру Σ , рассмотрим для простоты пример построения торического многообразия по заданному конусу. Мы можем сопоставить каждой конечно порожденной C -алгебре R_σ координатному кольцу аффинное торическое многообразие, ассоциированное с конусом. Так, пусть в пространстве R^2 с решеткой N задан конус σ с образующими $2e_1, e_2$. В двойственном пространстве $(R^2)^*$ с решеткой M моноид $S_\sigma = \sigma \cap M$ к генераторам $b_1 = e_1^*, b_3 = e_1^* + 2e_2^*$ надо добавить $b_2 = e_1^* + e_2^*$. По изоморфизму они соответствуют одночленам Лорана: $v_1 = z_1, v_2 = z_1 z_2, v_3 = z_1 z_2^2$. C -алгебру R_σ можно представить как

$$R_\sigma = C[v_1, v_2, v_3] = C[x_1, x_2, x_3]/I,$$

где соотношение $b_1 + b_3 = 2b_2$ дает мультипликативную связь $v_1 v_3 = v_2^2$ между координатами, что порождает идеал через квадратичное соотношение $x_1 x_3 = x_2^2$. В результате соответствующее конусу аффинное торическое многообразие X_σ представлено в C^3 в виде квадратичного конуса

$$X_\sigma = \{ (x_1, x_2, x_3) \in C^3 : x_1 x_3 = x_2^2 \},$$

которое имеет особенность в начале координат $\{0, 0, 0\} \in C^3$.

В общем случае ситуация такая же. Каждый

$$b_i = (b_i^1, \dots, b_i^n) \in \sigma \cap M = S_\sigma, \quad i = 1, \dots, m$$

по изоморфизму сопоставляется моном Лорана $v_i = z^{b(i)} \in C[z, z^{-1}]$, $i = 1, \dots, m$. Для решеточного конуса σ в R^n , аффинное торическое многообразие X_σ содержит тор $T = (C^*)^n$ как открытое плотное подмножество Зариского. Для данной решетки N , изоморфизм $N \cong Z^n$ приводит к изоморфизму $N \otimes_z C^* = (C^n)^*$. $T(N)$ – связывает обе решетки N и M . Так если $v \in N$, то

$$\lambda: C^* \rightarrow T(N) \cong Z^n, \quad v \rightarrow (a_1, \dots, a_n),$$

ведет к однопараметрической подгруппе $\lambda(t) = (t^{a(1)}, \dots, t^{a(n)})$ относительно $T(N) \cong (C^*)^n$. Если $v \in M$, $\chi: T(N) \rightarrow C^*$ является характером $T(N)$ и если $M = Z^n$ – группа характеров переводит $v \rightarrow (b_1, \dots, b_n)$, так что

$$\chi(t_1, \dots, t_n) = t_1^{b_1} \dots t_n^{b_n}$$

относительно группы $T(N) \cong (C^*)^n$ [5-9].

Мономы $t_1^{b_1} \dots t_n^{b_n}$ Лорана образуют кольцо полиномов Лорана $C[t_1, t_1^{-1}, \dots, t_n, t_n^{-1}]$. Если σ решеточный конус в R^n , то $\dim_C X_\sigma = n$. Для $(k_1, \dots, k_n) \in Z^n$ и $\lambda \in C^*$ однопараметрическая группа C^* , действующая на V формулой

$$\lambda \cdot (z_1, \dots, z_n) \rightarrow (\lambda^{k_1} z_1, \dots, \lambda^{k_n} z_n),$$

где (z_1, \dots, z_n) – локальные голоморфные координаты на V .

Разные торические многообразия можно получать, накладывая разные ограничения на разрешенный выбор (k_1, \dots, k_n) , которые можно описать в терминах веера Σ в N [5-10].

Таким образом, торическое многообразие V полностью определяется комбинаторными данными веера Σ . Разные торические алгебраические многообразия отличаются различными путями компактификации, связанными с допускаемыми действиями T , которые могут быть закодированы в удобной комбинаторной структуре веера Σ с набором конусов σ . В качестве примеров, торическими многообразиями являются $(C^*)^n, C^n, P^n, P^n \times P^m$ с некоторыми примерами вложения Веронезе $P^1 \times P^1 \subset P^3, P^2 \times P^1 \subset P^5$. Стандартный способ описания P^2 (аналогично для P^n) – это вложение его в C^3 :

$$P^2 = (C^3 \setminus \{0\}) / (C^*),$$

где фактор реализуется путем модификации по отношению эквивалентности

$$(x, y, z) \sim \lambda(x, y, z),$$

где $\lambda \in C^*$ [5-10].

Конструкции проективных торических многообразий

При конструировании торических многообразий надо учесть разнообразие структур и особенностей конусов и вееров. Так конус σ определенный набором порождающих векторов (v_1, \dots, v_n) является симплексом, если все векторы v_i линейно независимы. Веер Σ симплектический, если все конусы веера Σ симплексы. В случае симплектического веера X_Σ – орбиформ, т.е. все особенности являются фактор-особенностями. Вектор $v_i \in Z^n$ примитивен, если его координаты взаимно просты. Конус является правильным, если векторы (v_1, \dots, v_n) , покрывающие конус, являются примитивными и существуют такие примитивные векторы (v_{r+1}, \dots, v_n) , что $\det(v_1, \dots, v_n) = 1$, то есть, векторы (v_1, \dots, v_n) пополняются в базис решетки N . Веер является регулярным, если все его конусы регулярные. Веер Σ полон, если его конусы покрывают R^n , т.е. $|\Sigma| = R^n$. Веер Σ является многогранным, если существует многогранник Δ , выпуклая оболочка конечного числа точек, такой, что $0 \in \Delta$, и Σ натянут на грани многогранника Δ . Существует ряд утверждений на уровне теорем. Веер Σ полный тогда и толь-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ко тогда, когда X_Σ «компактно». Веер Σ регулярен тогда и только тогда, когда X_Σ – гладко. Веер Σ многогранник тогда и только тогда, когда X_Σ проективно [6-8].

Торические многообразия, ассоциированные с веерами Σ , строятся склейкой аффинных многообразий, связанных с конусами. Рассмотрим проективное пространство P^2 [6-8], конструкция которого состоит из склеивания трех карт $U_i \cong C^2$. Пусть $[t_0, t_1, t_2]$ однородные координаты пространства P^2 , которое покрывается тремя координатными картами U_i :

$U_0 \rightarrow t_0 \neq 0$ и аффинными координатами:

$$[t_0, t_1, t_2] \rightarrow (1, t_1/t_0, t_2/t_0) = (z_1, z_2),$$

$U_1 \rightarrow t_1 \neq 0$ и аффинными координатами:

$$[t_0, t_1, t_2] \rightarrow (t_0/t_1, 1, t_2/t_1) = (z_1^{-1}, z_1^{-1}z_2),$$

$U_2 \rightarrow t_2 \neq 0$ и аффинными координатами:

$$[t_0, t_1, t_2] \rightarrow (t_0/t_2, t_1/t_2, 1) = (z_2^{-1}, z_1z_2^{-1}).$$

Рассмотрим в R^2 следующий веер Σ в решетке N , порожденный векторами $\{e_1, e_2, -e_1 - e_2\}$ (см. рисунок 1).

Моноид $S_{\sigma_0} = \sigma_0 \cap M$ допускает в качестве генераторов $\{e_1^*, e_2^*\}$, следовательно, алгебра $R_{\sigma_0} = C[z_1, z_2]$ и соответствующее конусу σ_0 аффинное торическое многообразие $V_{\sigma_0} = C^2(z_1, z_2)$. Аналогично, $\{-e_1^* + e_2^*, -e_1^*\}$ является системой генераторов моноида $S_{\sigma_1} = \sigma_1 \cap M$, координатным кольцом $R_{\sigma_1} = C[z_1^{-1}z_2, z_1^{-1}]$ и торическим аффинным многообразием $V_{\sigma_1} = C^2(z_1^{-1}z_2, z_1^{-1})$. Вектора $\{-e_2^*, e_1^* - e_2^*\}$ образуют систему генераторов моноида S_{σ_2} , в результате координатное кольцо $R_{\sigma_2} = C[z_2^{-1}, z_1z_2^{-1}]$ с аффинным торическим многообразием $V_{\sigma_2} = C^2(z_2^{-1}, z_1z_2^{-1})$.

Три аффинных торических подмногообразия $\{V_{\sigma_0}, V_{\sigma_1}, V_{\sigma_2}\}$ соответствуют трем координатным картам комплексного проективного пространства P^2 , восстановление которого из этих трех подмногообразий должна позволить конструкция веера Σ (рисунок 1). Так рассмотрим склей-

ку V_{σ_0} и V_{σ_1} вдоль $V_{\mathcal{T}}$, где $\mathcal{T} = \sigma_0 \cap \sigma_1$. Так как грань является общей для конусов σ_0 и σ_1 , то моноид $S_{\mathcal{T}}$ можно представить в двух вариантах $S_{\mathcal{T}} = S_{\sigma_0} + Z_{\geq 0}(-e_1^*)$ и $S_{\mathcal{T}} = S_{\sigma_1} + Z_{\geq 0}(e_1^*)$ и, соответственно, аффинное торическое многообразие $V_{\mathcal{T}}$ может быть представлено как $V_{\mathcal{T}} = C^*(z_1) \times C(z_2)$ в $V_{\sigma_0} = C^2(z_1, z_2)$ и $V_{\mathcal{T}} = C^*(z_1^{-1}) \times C(z_1^{-1}z_2)$ в $V_{\sigma_1} = C^2(z_1^{-1}, z_1^{-1}z_2)$. Склейка V_{σ_0} и V_{σ_1} вдоль $V_{\mathcal{T}}$ может быть реализована с помощью замены координат $z_1 \rightarrow z_1^{-1}$, $z_2 \rightarrow z_1^{-1}z_2$, результатом которой является восстановление $P^2 \setminus \{(0, 0, 1)\}$. Эту склейку можно объяснить следующим образом. Моноид $S_{\mathcal{T}} = S_{\sigma_0} + Z_{\geq 0}(-\mathcal{V})$ получается из моноида S_{σ_0} добавлением к системе его генераторов (b_1, \dots, b_m) одного генератора $-\mathcal{V}$, получая для моноида $S_{\mathcal{T}}$ следующий набор генераторов $(b_1, \dots, b_m = \mathcal{V}, b_{m+1} = -\mathcal{V})$. В результате, в моноиде $S_{\mathcal{T}}$ кроме учета соотношений между m -генераторами S_{σ_0} появится дополнительное соотношение $b_m + b_{m+1} = 0$, которое в алгебре $R_{\mathcal{T}}$ соответствует связи $u_m u_{m+1} = 1$, которое дополнительно надо учитывать при получении $R_{\mathcal{T}}$ из R_{σ_0} . Поскольку образующие v_i являются в точности координатными функциями на торических многообразиях V_{σ_i} и $V_{\mathcal{T}}$, что означает, что $V_{\mathcal{T}} = V_{\sigma_0} \setminus (u_m = 0)$. В случае проективного пространства P^2 , рассматривая \mathcal{T} , как грань σ_0 , имеем

$$V_{\mathcal{T}} = V_{\sigma_0} \setminus (z_1 = 0) = C^*(z_1) \times C(z_2) \text{ в } V_{\sigma_0} = C^2(z_1, z_2).$$

Если \mathcal{T} рассматривать как грань σ_1 , то получаем следующую цепочку равенств

$$V_{\mathcal{T}} = V_{\sigma_1} \setminus (z_1^{-1} = 0) = C^*(z_1^{-1}) \times C(z_1^{-1}z_2)$$

в $V_{\sigma_1} = C^2(z_1^{-1}, z_1^{-1}z_2)$. Склейка V_{σ_0} и V_{σ_1} вдоль $V_{\mathcal{T}}$ дает $P^2 \setminus \{(0:0:1)\}$. Склейка этих торических многообразий с аффинным торическим многообразием $V_{\sigma_2} = C^2(z_2^{-1}, z_1z_2^{-1})$ приводит к конструкции тотального пространства P^2 [6-10].

Тор $T = (C^*)^n$ является группой, действующей на себя умножением. Для действия T на каждое V_{σ_i} выбираются параметры тора $t = (t_1, \dots, t_n) \in T$, $t_i \in C^*$, и система генераторов (a_1, \dots, a_m) моноида S_{σ_i} , где $a_i = (a_i^1, \dots, a_i^n)$, $a_i^k \in Z^*$. Тогда действие тора на точку $z \in S_{\sigma_i}$, $z = (z_1, \dots, z_m) \in C^m$, можно представить в следующем виде:

$$T \times V_{\sigma_i} \rightarrow V_{\sigma_i}: (t, z) \rightarrow (t \cdot z) = (t^{a(1)}z_1, \dots, t^{a(m)}z_m),$$

где $t^{a(i)} = t_1^{a(i,1)} \dots t_n^{a(i,n)} \in C^*$, $a(i) \equiv a_i, a(i,j) \equiv a_i^j$.

Для веера Σ в R^n и \mathcal{T} грани конуса σ соотношение $V_{\mathcal{T}} = V_{\sigma} \setminus (u_m = 0)$, а также склейки карт, совместимы с действием тора. S_{σ} порождается генераторами (a_1, \dots, a_m) , и, следовательно, элементы $u_i = z^{a_i}$, $i = 1, \dots, m$, являются генераторами алгебры $C[u_1, \dots, u_m]$ C -подалгебры $C[S_{\sigma}]$. В результате, действие тора на аффинных торических многообразиях V_{σ_i} обеспечивает действие тора на торическом многообразии Σ : $t \in T$, отождествляется с гомоморфизмом групп $M \rightarrow C^*$, $z \in V_{\sigma_i}$ с гомоморфизмом полугрупп $S_{\sigma_i} \rightarrow C$, $t \cdot x \in V_{\sigma_i}$ с гомоморфизмом полугрупп $S_{\sigma_i} \rightarrow C, u \rightarrow t(u) \cdot z(u)$.

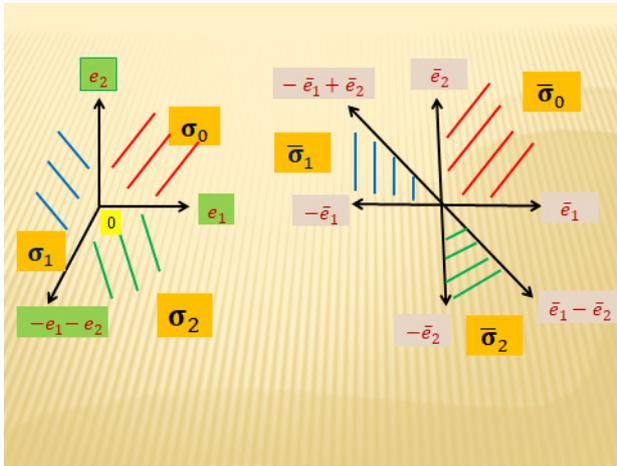


Рис. 1. Веер Σ в конструировании P^2

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Проективное пространство P^2 представляет собой объединение 7 орбит действия тора:

- а) $O_{\{0\}} = (C^*)^2$, орбита точки $(0,0,0)$;
- б) 3 орбиты, гомеоморфные C^* , соответствующие трем ребрам и чьи образы в V_{σ_i} $i=1,2,3$, описываются, как $O_{\mathcal{T}}$. Они являются орбитами точек $[1,1,0], [1,0,1], [0,1,1]$ из P^2 ;
- в) неподвижные точки $\{x_{\sigma_i}\}$, $i=1,2,3$, соответствующие 2-мерным σ_i -конусам – эти точки $[1,0,0], [0,1,0], [0,0,1]$ являются неподвижными относительно действия тора.

В итоге для данного веера Δ в R^2 представлена конструкция объединения трех непересекающихся торических подмногообразий V_{σ_i} в торическое многообразие $X_{\Sigma} = P^2$. X_{Σ} можно рассматривать как топологическое пространство, имеющее открытое покрытие аффинными торическими многообразиями (V_{σ_i}) , где $\sigma_i \in \Sigma$. Его можно рассматривать как алгебраическое многообразие с картами, связанными биномиальными соотношениями. Обобщение этого случая для R^n содержит следующее заключение, что каждое n -мерное торическое многообразие содержит тор $T = (C^*)^n$ как открытое плотное подмножество Зариского. Важно заметить, что при конструировании торического многообразия с заданным веером Σ были использованы следующие включения: $\tau \hookrightarrow \sigma$, $\tau \hookrightarrow \sigma^{\wedge}$, $R_{\tau} \hookrightarrow R_{\sigma}$, $V_{\tau} \hookrightarrow V_{\sigma}$ [6-10].

При обобщении P^2 на n -мерное проективное пространство P^n веер Σ , рассматриваемый в R^n , порождается базисом $(e_1, \dots, e_n, -(e_1 + \dots + e_n))$, так что конус σ_0 порождается (e_1, \dots, e_n) и конусы σ_i , $i=1, \dots, n$, порождаются векторами $(e_1, \dots, e_{i-1}, e_{i+1}, \dots, e_n, -(e_1 + \dots + e_n))$. Аффинные торические многообразия (V_{σ_i}) являются копиями C^n , соответствующими классическим картам P^n с соответствующей склейкой для образования P^n [6-8, 10].

Рассмотрим веер Σ , описывающий произведение двух проективных торических многообразий $P^1 \times P^1$. Этот веер определяет моноиды S_{σ_i} , $i=1,2,3,4$ (см. рисунок 2), которые можно представить в замкнутой цепочке, построенной в прямом соответствии конусам σ_i^{\wedge} , имеющим общие грани:

$$S_{\sigma_0}(e1^*, e2^*) \leftrightarrow S_{\sigma_1}(e1^*, -e2^*) \leftrightarrow S_{\sigma_2}(-e1^*, -e2^*) \leftrightarrow S_{\sigma_3}(-e2^*, e1^*) \leftrightarrow S_{\sigma_4}(e1^*, e2^*),$$

где в скобках указаны генераторы моноидов S_{σ_i} . Соответственно замкнутой цепочке моноидов можно представить замкнутую цепочку алгебр $R_{\sigma} = \mathbb{C}[z_1, z_2] \leftrightarrow R_{\sigma} = \mathbb{C}[z_1^{-1}, z_2] \leftrightarrow R_{\sigma} = \mathbb{C}[z_1^{-1}, z_2^{-1}] \leftrightarrow R_{\sigma} = \mathbb{C}[z_1, z_2^{-1}] \leftrightarrow R_{\sigma} = \mathbb{C}[z_1, z_2]$.

Склейка торических подмногообразий V_{σ_0} и V_{σ_1} дает $P^1 \times C$, с координатами $((t_0, t_1), z_2)$, $z_1 = t_0/t_1$. Склейка торических подмногообразий V_{σ_2} и V_{σ_3} дает $P^1 \times C$, с координатами $((t_2, t_3), z_2^{-1})$. Склейка двух пар торических подмногообразий $(V_{\sigma_0}$

и V_{σ_1}) и $(V_{\sigma_2}$ и $V_{\sigma_3})$ дает $P^1 \times P^1$, с координатами $((t_0, t_1), (t_2, t_3))$, где $z_1 = t_0/t_1$, $z_2 = t_2/t_3$.

Торическая геометрия и Калаби-Яу-пространства

Рассмотрим C^n и действие алгебраического тора $(C^*)^m$, $m < n$, по которому торическое многообразие X вводится как фактор-пространство

$$X = (C^n \setminus U) / (C^*)^m,$$

где вычитаемое подмножество U определяется непрерывной подгруппой в $(C^*)^m$. В торическом многообразии действует алгебраический тор с группой $(C^*)^{n-m}$. Рассмотрим веер Σ в N . Пусть $\Sigma(1)$ - множество одномерных конусов-ребер. трехмерных торических многообразиях, или, соответственно, на трехмерных решетках M , $N \approx Z^3$. Каждому вектору v_i , $i=1, \dots, m$, порождающих одномерные конусы $\Sigma(1)$ можно сопоставить однородную координату $z_i \in C$. Из пространства C^n вычитаем множество

$$U_{\Sigma} = \bigcup_I \{z_1, \dots, z_m; z_k = 0 \forall i \in I\},$$

где объединение берется по всем множествам $I \subseteq \{1, \dots, m\}$, для которых $\{v_i; i \in I\}$ не принадлежат конусу в Σ [9-12].

Другими словами, несколько z_i могут исчезнуть одновременно только, если существует такой конус, что все соответствующие v_i принадлежат этому конусу. Тогда торическое многообразие задается формулой

$$X_{\Sigma} = (C^n \setminus U_{\Sigma}) / G, \quad G = (C^*)^{m-3}$$

для трехмерного случая.

Фактор по $(C^*)^{m-3}$ реализуется, взяв классы эквивалентности по отношению к последующим отношениям эквивалентности между координатами z_k :

$$(z_1, \dots, z_m) \sim (\lambda^{q(1a)} z_1, \dots, \lambda^{q(ma)} z_m),$$

$$q(ia) \equiv q_a^i, \lambda \in C^*, q_a^1 v_1 + \dots + q_a^m v_m = 0.$$

Среди этих соотношений $(m-3)$ независимы. В качестве примера возьмем опять P^2 , для веера Σ которого имеются три одномерных конуса, порожденные векторами $v_1 = (1, 0)$, $v_2 = (0, 1)$, $v_3 = (-1, 1)$,

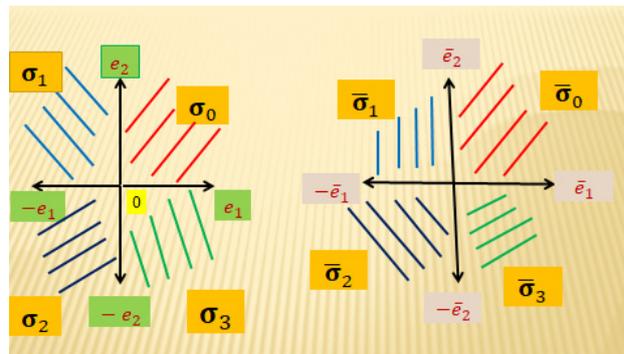


Рис. 2. Веер Σ (дуальный Σ^{\wedge}) в решетке N с базисом $\{e_i, i=1, \dots, 4\}$ (M с базисом $\{e_i, i=1, \dots, 4\}$) в конструировании $P^1 \times P^1$

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

-1), которым сопоставляются однородные координаты z_1, z_2, z_3 из C^3 . Множество U_Σ – это просто $\{0\}$, и, следовательно, торическое многообразие

$$X_\Sigma = (C^3 \setminus \{0\}) / (C^*).$$

Так как $1(1,0)+1(0,1)+1(-1,-1)=(0,0)$, так что фактор C^* реализуется отношением эквивалентности $(z_1, z_2, z_3) \sim \lambda(z_1, z_2, z_3)$, что соответствует описанию комплексного проективного пространства P^2 , компактность которого подтверждает утверждение, что в торической геометрии торическое многообразие компактно тогда и только тогда, когда его веер Σ заполняет N_R .

Для описания эллиптической кривой можно вложить ее в P^2 с помощью уравнения Вейерштрасса $(z_1=x, z_2=y, z_3=z)$, $y^2z=x^3+axz^2+bz^3$ [11,12] Альтернативное описание может быть дано в терминах взвешенного проективного пространства $P(2,3,1)$, определенного так же, как P^2 , но с изменением отношения эквивалентности на $(x,y,z) \sim (\lambda^2x, \lambda^3y, \lambda z)$ для любого $\lambda \in C \setminus \{0\}$ и уравнение Вейерштрасса изменилось на $y^2=x^3+axz^4+bz^6$. В обоих случаях это уравнение описывает неособую эллиптическую кривую, если дискриминант: $D=4a^3+27b^2 \neq 0$. Для $P^2=P(1,1,1)$ - и $P(2,3,1)$ -торических многообразий в решетке N представлены порождающие их вектора $v_x=(1,0)$, $v_y=(0,1)$, $v_z=(-1,-1)$ и $v_x=(1,0)$, $v_y=(0,1)$, $v_z=(-2,-3)$, так что в обоих случаях

$$q^1v_x + q^2v_y + q^3v_z = 0,$$

где $q^1=q^2=q^3=1$ и $q^1=2, q^2=3, q^3=1$, соответственно.

В общем случае, мы имеем следующую ситуацию: существует $p \geq n$ векторов v_i в решетке N , изоморфной Z^n , и $(p-n)$ независимых линейных отношений, ведущих к отношениям эквивалентности. Таким образом, комплексная размерность торического многообразия всегда равна реальной размерности решетки.

Торические многообразия могут иметь особенности. В качестве примера снова рассмотрим $P(2,3,1)$ [12]. Рядом в точке $y=z=0$, мы можем использовать отношение эквивалентности по λ , чтобы положить $x=1$ и еще остается остаточное отношение $(y,z) \sim (-y,-z)$. В результате торическое многообразие выглядит локально как C^2/Z_2 . В алгебраической геометрии существует процедура превращения особого многообразия в регулярный, известная как раздувание: точка или подмногообразие называется раздутой, если e или его заменить m -мерным подмногообразием. Для этого добавляется в веер Σ дополнительный луч $v_u=(-1,-1)$. Так дополненное торическое многообразие задается $C^4 \setminus \{(x,y,z,u) : (x=u=0) \vee (y=z=0)\}$ с отношением эквивалентности $(x,y,z,u) \sim (2\mu x, 3\mu y, \lambda z, \mu u)$ для любого $(\lambda, \mu) \in (C \setminus \{0\})^2$. Выбирая $u \neq 0$, можно использовать μ , что-

бы установить $u=1$, получив таким образом копию $P(2,3,1)$ с удаленной особой точкой $y=z=0$. При $u=0$, используя свободу выбора, остается пространство, описываемое $(1,y,z,0) \sim (1,\lambda y, \lambda z, 0)$, которое является исключительным дивизором P^1 , параметризованный y и z . Дивизор в алгебраическом многообразии – это линейная комбинация неприводимых гиперповерхностей с целыми коэффициентами. В торическом случае всегда появляются дивизоры, соответствующие гиперповерхностям, полученными исчезновением одной из однородных координат. Таким образом, векторы v_i можно рассматривать как соответствующие торические дивизоры, определяемых $z_i=0$. В данном случае имеется еще одна особенность в точке $x=z=0$, локально выглядящей как C^2/Z_3 , которую можно регулировать раздутием, вводя два дополнительных дивизора, соответствующих лучам между v_x и v_z .

Торические многообразия V_Σ , связанные решетчатым многогранником Σ

В торическом многообразии, описываемым веером Σ , однородные координаты z_i привязаны к каждому вектору u_i , порождающего одномерные конусы. Торические дивизоры D_i многообразия V – это гиперповерхности, определяемые уравнениями $z_i=0$. Поскольку однородные координаты z_i сопоставлены каждому одномерному конусу u_i в веере Σ , вектора u_i соответствуют торическим дивизорам, определяемыми равенством $z_i=0$.

Можно показать, что каноническое расслоение V задается формулой $K_{V_\Sigma} = \mathcal{O}(-\sum_i D_i)$, которая может помочь понять, является ли торическое многообразие Калаби-Яу или нет, что связано с одним из определений Калаби-Яу многообразий. Многообразие Калаби-Яу – это келерово многообразие (M, J, g) с тривиальным каноническим расслоением. Дивизор $D = \sum_i a_i N_i$ можно связать с линейным расслоением с мероморфным сечением так, чтобы мероморфное сечение имело нуль порядка a_i вдоль N_i , если $a_i > 0$, и полюс порядка $-a_i$ вдоль N_i , если $a_i < 0$. N_i – это неприводимые гиперповерхности, то есть гиперповерхности, которые нельзя записать как объединение двух гиперповерхностей. В торическом случае торические дивизоры D_i , определенные равенством $z_i=0$, являются неприводимыми гиперповерхностями. Следовательно, на основе указанного выше соответствия торический дивизор D_i ассоциирован с линейным расслоением $\mathcal{O}(D_i)$ с сечением s , имеющим нуль порядка один вдоль D_i ; таким образом, сечение s – это просто z_i . Отсюда следует, что каждая однородная координата z_i является сечением линейного рас-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

слоения $\mathcal{O}(D_i)$, ассоциированного с торическим дивизором D_i . Моном z^{a_1}, \dots, z^{a_m} при $a_i > 0$ имеет нули порядка a_i вдоль D_i , а при $a_j < 0$ – полюсы порядка $-a_j$ вдоль D_j . Следовательно, сечение линейного расслоения $\mathcal{O}(\sum_i a_i D_i)$. Выбрав для некоторого $v \in M$, $a_i = \langle u_i, v \rangle$, $i = 1, \dots, m$, соотношения эквивалентности торического многообразия для монома:

$(\lambda^{q_a^1} z_1)^{\langle u_1, v \rangle} \dots (\lambda^{q_a^m} z_m)^{\langle u_m, v \rangle} = \lambda^d (z_1)^{\langle u_1, v \rangle} \dots (z_m)^{\langle u_m, v \rangle}$
 $d = \sum_{i=1}^m q_a^i \langle u_i, v \rangle$ – этот моном, благодаря $\sum_{i=1}^m q_a^i u_i = 0$, инвариантен относительно отношений эквивалентности. Следовательно, для тривиального линейного расслоения $\mathcal{O}(\sum_i \langle u_i, v \rangle D_i) \sim 0$, и $\langle u_i, v \rangle = 1$ для всех i . X_Δ – торическое многообразие, определяемое веером Σ , является Калаби-Яу тогда и только тогда, когда векторы u_i , порождающие одномерные конусы Δ , все лежат в той же аффинной гиперплоскости [9].

Многогранник в M_R – это выпуклая оболочка конечного числа точек в M_R , которое также можно рассматривать как пересечение конечного числа полупространств. Если многогранник $\Delta \subset M_R$ содержит начало 0, его дуальный многогранник

$$\Delta^* = \{v \in N_R : \langle u, v \rangle \geq -1 \text{ для всех } u \in \Delta\}$$

также является многогранником, содержащим 0, и $(\Delta^*)^* = \Delta$. Решетчатый многогранник в M_R – это многогранник с вершинами в M . Многогранник $\Delta^* \subset M_R$, содержащий 0, называется рефлексивным, если оба Δ и Δ^* – решетчатые многогранники. В силу выпуклости достаточно рассматривать только те уравнения, которые соответствуют v_i , которые являются вершинами Σ^* . Таким образом, существует двойственность между вершинами Δ^* и грани; аналогично существует двойственность между p -мерными гранями Δ и $(n-p-1)$ размерных граней Δ^* . Внутренняя точка u рефлексивного многогранника должна удовлетворять $\langle u, v_i \rangle \geq -1$ для всех v_i , поэтому фактически точка 0 является единственной внутренней точкой решетки.

Для трехмерной пары рефлексивных многогранников $\Delta \in M_R$, $\Delta^* \in N_R$ гладкую поверхность $K3 = CY_2$ можно построить следующим образом. Любая полная триангуляция поверхности Δ^* определяет веер Σ , трехмерные конусы которого являются просто конусами над регулярными треугольниками. Любой точке решетки u_i на границе Δ^* можно сопоставить однородную координату $z_i \in \mathbb{C}$ с правилом, согласно которому несколько точек z_i могут одновременно обращаться в нуль, только если существует такой конус что соответствующие p_i все принадлежат этому конусу. Отношения эквивалентности между однородными координатами задаются формулой $(z_1, \dots, z_n) \sim (\lambda q_a^1 z_1, \dots, \lambda q_a^m z_m)$ для любого $\lambda \in \mathbb{C}^*$ с любым

набором целых чисел q_i а таким, что $\sum q_i u_i = 0$. Эта конструкция приводит к гладкому компактно-му трехмерному торическому многообразию M (гладкое, потому что образующие каждого конуса также являются образующими N , компактное, потому что веер заполняет N_R). Локусы $z_i = 0$ являются торическими дивизорами D_i . Каждой точке q_k решетки M можно сопоставить моном $m_k = \prod_i z_i^{\langle q_i, u_i \rangle + 1}$. Гиперповерхность, определяется нулем общего многочлена $F = \sum c_k m_k$ однородно преобразуется, и можно показать, что он определяет гиперповерхность $K3$ в M (фактически, она определяет семейство гиперповерхностей в зависимости от коэффициентов c_k). Заметим, что многогранник $\Delta^* \in N_R$ дает веер объемлющего торического многообразия, а многогранник $\Delta \in M_R$ дает мономы.

Рассматриваемые семейства $F(\Delta)$, состоят из комплексных $(n-1)$ -мерных проективных алгебраических компактификаций Δ -регулярных аффинных гиперповерхностей, определенных полиномами Лорана f с фиксированным n -мерным многогранником Ньютона Δ в n -мерном алгебраическом торе $T = (\mathbb{C}^*)^n$. Если семейство $F(\Delta)$, определяемое многогранником Ньютона, состоит из $(n-1)$ -мерных многообразий Калаби-Яу, то дуальный, или полярный, многогранник Δ^* в дуальном пространстве определяет другое семейство $F(\Delta^*)$ многообразий Калаби-Яу, так что мы получаем замечательную двойственность.

Из условия Δ -регулярности следует, что особенности гиперповерхности индуцируются только особенностями объемлющего торического многообразия V_Δ . Основным следствием этого факта является то, что разрешение особенности V_Δ сразу же порождает разрешение особенностей всех Δ -регулярных гиперповерхностей, т.е. мы получаем одновременное разрешение всех членов семейства $F(\Delta)$.

Гиперповерхность, определяемая обращением в нуль типичного многочлена F , определяемым многогранником Δ , является гладким многообразием Калаби-Яу для $n \leq 4$ [9]. Для $n \leq 3$ рефлексивность обеспечивает гладкость лежащее в основе торического многообразия, тогда как для $n=4$ (трехмерные многообразия Калаби-Яу) торическое многообразие может иметь точечные особенности. Можно показать, что многочлен F определяет сечение антиканонического расслоения торического многообразия, а геометрическое место нулей такого сечения описывает многообразие тривиального канонического класса. Если это многообразие гладкое, что при $n \leq 4$ гарантируется рефлексивностью, оно таким образом, является многообразием Калаби-Яу [9].

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Мультинарная алгебра рефлексивных проективных чисел и новые симметрии в торической геометрии

CY_n -пространство (n – комплексная размерность) может быть определено как четверка $(M; J; g; \Omega)$, где $(M; J)$ – комплексное компактное $n=(2m-2)$ -мерное многообразие с комплексной структурой J , g -кэлера метрика с $SU(n)$ группой голономии и $\Omega=(n,0)$ – ненулевой параллельный тензор голоморфного объема. Существование параллельной формы типа $(n,0)$ означает, что кривизна Риччи для кэлера метрики многообразия равна нулю. Для проективных пространств P^m (m -комплексная размерность) существует утверждение, называемое теоремой Чоу, о том, что каждое аналитическое компактное (замкнутое) подмногообразие в P^m может быть задано набором полиномиальных уравнений. Множество нулей квазиоднородных полиномиальных уравнений степени d :

$$F(x_1, \dots, x_m) \equiv \sum_{\vec{\mu}} c_{\vec{\mu}} x^{\vec{\mu}} = 0, x^{\vec{\mu}} = x_1^{\mu_1} \dots x_m^{\mu_m},$$

заданных в весовом проективном пространстве $P^{m-1}[k_1, \dots, k_m]$, $(k_1 + \dots + k_m) = d$, точки которого удовлетворяют соотношениям эквивалентности $(x_1, \dots, x_m) \sim (\lambda^k x_1, \dots, \lambda^m x_m)$, а мономы условию $\vec{\mu} \cdot \vec{k} = d$, при некотором выборе весовых векторов определяют алгебраические Калаби-Яу многообразия.

Другие примеры компактных комплексных многообразий могут быть получены, как полные пересечения таких нескольких квазиоднородных полиномиальных ограничений, где каждый полином F_i определяется некоторым весовым вектором $\vec{k}_i, i = 1, \dots, r$.

В результате классификации Берже существует несколько бесконечных рядов пространств с группами голономии $SO(n), U(n), SU(n), Sp(n) \times Sp(1), Sp(n)$, а также пространства с некоторыми исключительными группами голономии $G(2), Spin(7), Spin(16)$. Для суперструнных теорий особый интерес представляли Калаби-Яу пространства с $SU(n)$ -группой голономии, в частности, пространства $CY_2=K3$ с группой голономии $SU(2)$ и CY_3 -пространства с группой голономии $SU(3)$, содержащие $K3$ -пространства как подпространства, и которые были связаны с аффинными алгебрами Ли $A_r^{(1)}, D_r^{(1)}, E_6^{(1)}, E_7^{(1)}, E_8^{(1)}$ и др. [10-15]. В этой связи возник интерес к поискам новых n -арных ($n > 2$) алгебр с изучения пространств более высокой размерности $CY_n, n=3,4, \dots$ в рамках универсальной алгебры рефлексивных проективных чисел [16].

Причиной поиска какой-либо алгебры в огромном множестве Калаби-Яу пространств стала их проглядываемая, хотя еще до конца не

ясная, закономерность изменения алгебраической структуры с ростом размерности. Поэтому возникли две концепции, одна из которых состояла в классификации самих Ньютоновских рефлексивных многогранников 2-х, 3-х, 4-х размерностей, соответствующих комплексной размерности $K3$ -, CY_3 -, CY_4 -пространств [12]. Так авторы этого направления за 20 лет непрерывной работы на нескольких компьютерах для случая CY_4 нашли для 322 383 760 930 весовых векторов! [13] Другой концепцией стали сами весовые вектора

$$\vec{k} = (k_1, \dots, k_m) \quad m = 1, 2, 3, \dots,$$

для которых удалось создать алгебраический подход [14,15]. Основой для создания алгебраического подхода к классификации пространств Калаби-Яу CY_n ($n=m-2$) стали алгебраическая структура того множества «рефлексивных» весовых векторов

$$\vec{k} = (k_1, \dots, k_m) \quad m = 1, 2, 3, \dots,$$

и предложенные правила мультинарной композиции с соответствующими обратными операциями, начиная от размерности один до бесконечности, которые определяют комплексные весовые проективные ториковые пространства $P^{m-1}[k_1, k_2, \dots, k_m]$ и которые соответствуют, начиная с $m=3, n=1$, Калаби-Яу пространствам с соответствующими $SU(n)$ -группами голономий. Изучение пространств Калаби-Яу, определяемых одним рефлексивным проективным весовым вектором возможно в любом измерении на основе геометрической визуализации всех мономов

$$\{x^{\vec{\mu}}\}_{\alpha} = \{x_1^{\mu_1}, \dots, x_m^{\mu_m}\}_{\alpha},$$

задающих рефлексивный Ньютоновский многогранник и его зеркальный, определяющие Калаби-Яу пространства. Оказался удивительным тот факт, что все рефлексивные весовые векторы размерности n могут быть получены из множества рефлексивных векторов меньшей размерностью: $1, \dots, n-1$, начиная с $k_1=(1)$ [1], и образуют универсальную алгебру с мультинарными законами композиции $g_r, g_r^{(-1)}, r=1, 2, 3, \dots, n-1, n$. Используя этот закон композиции, можно убедиться, как CY_n -пространства могут быть получены из низших размерностей $r=1, \dots, n-1$, генерируя таким образом алгебраическую классификацию рефлексивных проективных векторов чисел размерности n с представлениями этой алгебры внутри множеств рефлексивных векторов определенной r -арити. Например, композиция арити $r=2$ в случае $CY_2=K3$ -пространств дает 90-рефлексивных векторов из полного числа 95. Эти 90 векторов образовали 22 представления универсальной алгебры, характеризующимися одинаковыми CY_1 -рефлексивными слоями в со-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ответствующих $K3$ -пространствах. Четыре из оставшихся рефлексивных весовых векторов могут быть получены в этой алгебре с учетом закона композиции арити $r=3$ -, а оставшийся последний $k=(7,8,9,12)$ [36] отвечает в этой алгебре арити $r=4$ [9,10] (см. таблицу 1).

В таблице 1 $100=1(a)+1(bb)+3(ccc)+95(CY_2)$ -рефлексивных проективных векторов размерностей $dim=1,2,3,4$, образуют множество 10270-расширенных 5-мерных рефлексивных векторов $k_{cx}=(0,k_1,k_2,k_3,k_4)$ для построения классификации всех рефлексивных проективных векторов для SU_3 . Цветом помечены рефлексивные греческие проективные весовые вектора $(1+1+3+14=19)$. Число алгебраических многообразий CY_n очень велико и очень быстро растет с размерностью n пространств [13]. И поэтому особенно нужен алгебраический подход, позволяющий ввести понятия представлений со старшими рефлексивными числами. Например, количество старших рефлексивных векторов арити $r=2$ – равно 22 для CY_2 и уже 4242 для CY_3 -пространств [14,15]. В случае CY_3 для получения 4242-представлений арити $r=2$ используются 100 рефлексивных векторов с их дальнейшими всевозможными расширениями до размерности 5 за счет включения нулей (всего 10270) (см. таблицу 1). Универсальная алгебра проективных весовых векторов позволяют определить структуру Ньютоновских рефлексивных многогранников через графы Берже [16]. Графы Берже и соответствующие матрицы Берже могут быть построены непосредственно из рефлексивных весовых чисел

$$\vec{k} = (k_1, \dots, k_{n+2}) [d].$$

Множество рефлексивных $CY_{3..}$ многогранников позволяют нам рассматривать целый класс графов Берже, которые можно соответственно отобразить в класс матриц Берже (напоминающими матрицы Картана) со следующими правилами [16]:

$$B_{ij} \in \mathbb{Z}; B_{ij} = B_{ji}; B_{ii} = 2, 3, 4, \dots;$$

$$B_{ij} = 0, -1, i \neq j; \text{Det } B = 0$$

В качестве примера приведем на двумерном рисунке 4-х мерный многогранник для Калаби-Яу пространства CY_3 , уравнение для которого задается весовым вектором $k=(1,1,2,8,12)$ [24] (см. рисунок 3). Количество точек в целочисленной решетке Z_5 определяется уравнением $\mu_1 + \mu_2 + 2\mu_3 + 8\mu_4 + 12\mu_5 = 24$ [14]. На рисунке многогранника даны три 3-х мерных сечения $\mu_5=0, \mu_5=1, \mu_5=2$. Только одна точка, соответствующая моному $x_1 x_2 x_3 x_4 x_5$, является внутренней точкой 4-х мерной пирамиды, равноудаленной от ее грани, все остальные точки являются граничными. В соответствии с алгеброй рефлексивных проективных весовых векторов [14,15] это Калаби-Яу пространство содержит подструктуры, связанные с бинарной операцией пары $K3=CY_2$ -пространств (треугольная пирамида $k_{K3}=(1,1,4,6)$ [2] – красный цвет, относительно которой возникает граф Берже) $(1,1,2,8,12)$ [24] $CY_3=(0,1,1,4,6)_{K3} + (1,0,1,4,6)_{K3}$.

Подструктуры, связанные с тернарной операцией, в которой приняли участие три эллиптических CY_1 -кривых с весовым проективным век-

Таблица 1

(a)	(1)[1]	6.	(1,1,2,4)[8]	16.	(1,2,4,5)[12]	26.	(1,3,5,9)[18]	36.	(1,5,7,8)[21]
(bb)	(1,1)[2]	7.	(1,1,3,4)[9]	17.	(1,2,4,7)[14]	27.	(1,3,7,10)[21]	37.	(1,5,7,13)[26]
(ccc)	(1,1,1)[3]	8.	(1,1,3,5)[10]	18.	(1,2,5,7)[15]	28.	(1,3,7,11)[22]	38.	(1,5,12,18)[36]
(ccc)	(1,1,2)[4]	9.	(1,1,4,6)[12]	19.	(1,2,5,8)[16]	29.	(1,3,8,12)[24]	39.	(1,6,8,9)[24]
(ccc)	(1,2,3)[6]	10.	(1,2,2,3)[8]	20.	(1,2,6,9)[18]	30.	(1,4,5,6)[16]	40.	(1,6,8,15)[30]
1.	(1,1,1,1)[4]	11.	(1,2,2,5)[10]	21.	(1,3,3,4)[12]	31.	(1,4,5,10)[20]	41.	(1,6,14,21)[42]
2.	(1,1,1,2)[5]	12.	(1,2,3,3)[9]	22.	(1,3,4,5)[13]	32.	(1,4,6,7)[18]	42.	(2,2,3,5)[12]
3.	(1,1,1,3)[6]	13.	(1,2,3,4)[10]	23.	(1,3,4,7)[15]	33.	(1,4,6,11)[22]	43.	(2,2,3,7)[14]
4.	(1,1,2,2)[6]	14.	(1,2,3,5)[11]	24.	(1,3,4,8)[16]	34.	(1,4,9,14)[28]	44.	(2,3,3,4)[12]
5.	(1,1,2,3)[7]	15.	(1,2,3,6)[12]	25.	(1,3,5,6)[15]	35.	(1,4,10,15)[30]	45.	(2,3,4,5)[14]
46.	(2,3,4,7)[16]	56.	(2,3,10,15)[30]	66.	(3,4,5,6)[18]	76.	(3,5,6,7)[21]	86.	(4,5,18,27)[54]
47.	(2,3,4,7)[18]	57.	(2,4,5,9)[20]	67.	(3,4,5,7)[19]	77.	(3,5,11,14)[33]	87.	(4,6,7,11)[28]
48.	(2,3,5,5)[15]	58.	(2,4,5,11)[22]	68.	(3,4,5,8)[20]	78.	(3,5,11,19)[38]	88.	(4,6,7,17)[34]
49.	(2,3,5,7)[17]	59.	(2,5,6,7)[20]	69.	(3,4,5,12)[24]	79.	(3,5,16,24)[48]	89.	(5,6,7,9)[27]
50.	(2,3,5,8)[18]	60.	(2,5,6,13)[26]	70.	(3,4,7,10)[24]	80.	(3,6,7,8)[24]	90.	(5,6,8,11)[30]
51.	(2,3,5,10)[20]	61.	(2,5,9,11)[27]	71.	(3,4,7,14)[28]	81.	(4,5,6,9)[24]	91.	(5,6,8,19)[38]
52.	(2,3,7,9)[21]	62.	(2,5,9,16)[32]	72.	(3,4,10,13)[30]	82.	(4,5,6,15)[30]	92.	(5,6,22,33)[66]
53.	(2,3,7,12)[24]	63.	(2,5,14,21)[42]	73.	(3,4,10,17)[34]	83.	(4,5,7,9)[25]	93.	(5,7,8,20)[40]
54.	(2,3,8,11)[24]	64.	(2,6,7,15)[40]	74.	(3,4,11,18)[36]	84.	(4,5,7,16)[32]	94.	(7,8,10,25)[50]
55.	(2,3,8,15)[28]	65.	(3,3,4,5)[15]	75.	(3,4,14,21)[42]	85.	(4,5,13,22)[44]	95.	(7,8,9,12)[14]

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

тором (треугольник Вейерштрасса $k_{CYI}=(1,2,3)$ [6] с 7-ю точками – синий цвет):

$$(1,1,2,8,12)[24]_{CYI}=(1,0,0,2,3)[6]_{CYI}+(0,1,0,2,3)[6]_{CYI}+2(0,0,1,2,3)[6]_{CYI}$$

Для сравнения приведем аффинный граф Берже (см. рисунок 4), определенный через расширенный рефлексивный вектор $(0; 1; 1; 1; 1)$ в рефлексивном Ньютоновском 4-х мерном многограннике

$$k=(1,1,2,3,4)[11]=(0,1,1,1,1)[4]+(1,0,1,2,3)[7].$$

Графы и соответствующие им матрицы Берже могут соответствовать n-арным алгебрам [16]. Например, ниже приводится декодирование аффинного графа Берже $Ver_{12}^{(1)}$ -тернарное расширение $E_6^{(1)}$ – в 4х мерном многограннике CY_3 , используя метод «простых корней» в ортонормированном базисе $\{e_i\}_{i=1,2,\dots,12}$ (см. рисунок 4):

$$\begin{aligned} a_1=e_1-e_2, a_2=e_2-e_3, a_3=e_3-e_4, a_4=e_4-e_5-e_6, a_5=e_5-e_6 \\ a_6=e_6-e_7, a_7=e_7-e_8 \\ a_8=e_9-e_{10}, a_9=-1/2(e_9-e_{10}+e_1+e_2+e_3+e_4+e_{11}-e_{12}), \\ a_{10}=e_{11}-e_{12} \\ a_{11}=e_9+e_{10}, a_{12}=-1/2(e_9+e_{10}-e_5-e_6-e_7-e_8+e_{11}+e_{12}), a_{13}=(\\ e_{11}+e_{12}). \end{aligned}$$

Из приведенных корней можно построить матрицу Берже $B_{ij}=a_i a_j$; $i, j=1, \dots, 13$ аналогично конструкции матриц Картана для бинарных групп Ли. Заметим, что в матрице Берже 4-узел – корень длиной равной три, который выходит за рамки матриц классификации Картана-Ли (см. таблицу 2).

Анализируя CY_n -пространства с $n=3,4,5,\dots$, прослеживается закономерность последовательного роста в матрицах Берже максимальных значений простых корней $B_{ii}=3,4,5,\dots$, что и вызвало интерес к поискам мультинарных алгебр и симметрий, в частности, тернарных и выше [3,4,16-19].

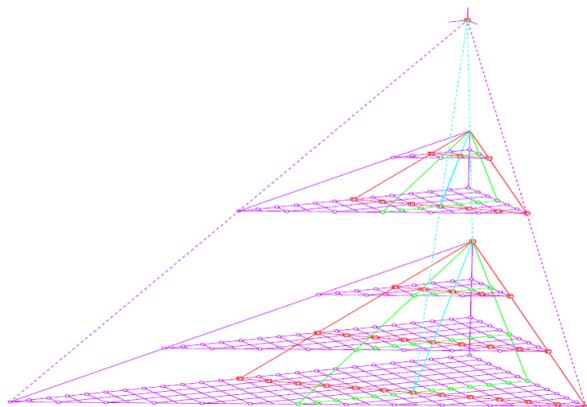


Рис. 3. Пример 4-х мерного рефлексивного многогранника $(1,1,2,8,12)$ [24] с эллиптическими- и КЗ-слоями, соответствующими тернарной и бинарной арити универсальной алгебры. Квадратные символы слева образуют граф Берже, и круглые символы справа образуют диаграмму для исключительной алгебры $E_8^{(1)}$

Таблица 2

Матрица Берже для рефлексивного расширенного весового вектора $k(ex)=(0,1,1,1,1)$

2	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1	2	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1	2	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-1	3	-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0
0	0	0	-1	2	-1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-1	2	-1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-1	2	-1	0	0	0	0	0
0	0	0	-1	0	0	-1	2	-1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-1	2	-1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-1	2	-1	0	0
0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	2	-1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	2	-1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	2

Заключение

Новые алгебры и соответствующие группы симметрий могли бы пролить свет на появление все новых и новых структур ториковой проективной геометрии с ростом их размерности 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 Ли, привлекая многомерные пространства с новыми алгебраическими и топологическими структурами, когда симметричные римановы пространства становятся уже недостаточными для дальнейшего проникновения в тайны вселенной, в основы современной квантовой физики и за ее пределами, касающиеся расширения самих законов композиции в сторону проблемы многих тел.

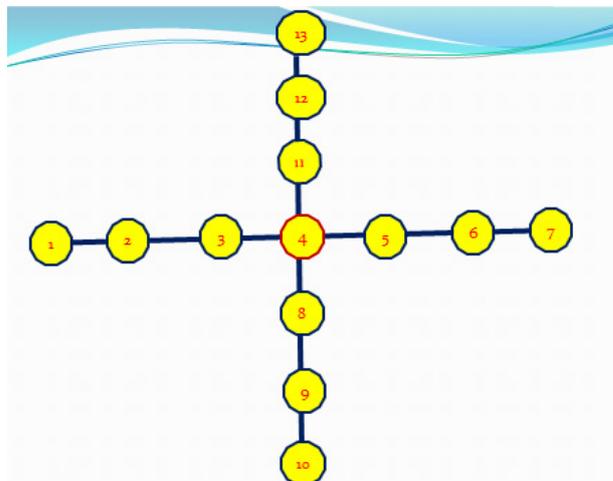


Рис. 4. Граф Берже $Ver_{12}^{(1)}$ для расширенного проективного веса $k_{(ext)}=(0,1,1,1,1)$, который извлечен из 4-х мерного многогранника на рисунке 3. В кружочках отмечены «простые корни» $a_i, i=1,2,3,\dots,13$

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Литература

1. Волков Г.Г., Смуров С.В., Царьков А.Н. Многомерные комплексные проективные пространства в квантовой физике и квантовой информации// Известия Института инженерной физики, 2020. №4(58). С.84-94.
2. Смуров С.В., Волков Г.Г., Столбов С.Н., Царьков А.Н. Новые симметрии многомерной геометрии в квантовой физике и квантовой информации// Известия Института инженерной физики, 2020. №3(57). С.85-95.
3. 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.
4. Царьков А.Н., Смуров С.В., Волков Г.Г., Масликов А.А., Капитонов И.Ю. Симметрично-групповые расширения аксиом квантовой физики в динамике квантовых систем// Известия Института инженерной физики, 2019. №4(54). С.84-92.
5. Данилов В.И. Алгебраические многообразия и схемы (<http://lib.mexmat.ru/books/2865>).
6. Cox D. The Homogeneous Coordinate Ring of a Toric Variety, J. Alg. Geom. 4 (1995) 17, alggeom/9210008.
7. W. Fulton, Introduction to Toric Varieties (Princeton Univ. Press, Princeton 1993).
8. J.P. Brasselet, Introduction to toric varieties/ Workshop on "The geometry and topology of Singularities", Cuernavaca (2007).
9. V. Batyrev, Dual Polyhedra and Mirror Symmetry for Calabi-Yau Hypersurfaces in Toric Varieties, J. Algebraic Geom. 3 , 493 (1994).
10. P. Aspinwall, K3 Surfaces and String Duality hep-th/9611137(1996).
11. P. Candelas, A.Font, duality between the Webs of Heterotic and type IIStrng Theory.hep-th/9603170(1996).
12. M. Kreuzer, H. Skarke, Reflexive Polyhedra, Weights and Toric Calabi-Yau Fibrations, HUB-EP-00/03, TUW-00/01, math.AG/0001106, 2000.
13. F.Schöller, H. SkarkeAll Weight Systems for Calabi-Yau Fourfolds from Reflexive Polyhedra arXiv:1808.02422v1 [hep-th] , 2018
14. F. Anselmo, J. Ellis, D. Nanopoulos, G. Volkov, 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) 605-698.
15. F. Anselmo, J. Ellis, D. V. Nanopoulos, G. Volkov, Results from an Algebraic Classification of Calabi-Yau Manifolds Phys.Lett.B499: 187-199, 2001.
16. G. Volkov. Hunting for the New Symmetries in Calabi-Yau Jungles, Int.J. Mod. Phys A19 (2004) 4835-4860, hep-th/0402042. 24.
17. L.N. Lipatov, A. Sabio-Vera, V.N. Velizhanin, G.G. Volkov. 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) Springer Berlin Heidelberg New York; Int.J.Mod. Phys. A21 (2006) 2953-3006, hep-th/0501101.
18. G. Volkov. Ternary "Quaternions" and Ternary $TU(3)$ algebra, arXiv: 1006.5627 (2010)
19. A. Maslikov, G.Volkov. 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).

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 629.78:681.51

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ИМПУЛЬСНОЙ ПРОГРАММЫ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ СБЛИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО РОБОТА С ОРБИТАЛЬНЫМ ОБЪЕКТОМ ЗА ЗАДАННОЕ ВРЕМЯ

ALGORITHM FOR CALCULATING THE IMPULSE PROGRAM OF AUTONOMOUS CONTROL OF THE APPROACH OF A SPACE ROBOT WITH AN ORBITAL OBJECT FOR A GIVEN TIME

Владимир Леонидович Захаров
доктор военных наук, профессор
действительный член АВН
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 Владимирович Бурмистров
кандидат технических наук
преподаватель 21 кафедры
ВКА имени А.Ф. Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, д. 13
Тел.: 8 (812) 347-95-21

Дмитрий Вячеславович Смирнов
почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, доцент
действительный член АИИ
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

Вячеслав Иванович Миронов
доктор технических наук, профессор
профессор 21 кафедры
ВКА имени А.Ф. Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, д. 13
Тел.: 8 (812) 347-95-21

Аннотация

Рассмотрена задача определения необходимого импульса скорости для сближения космического робота с орбитальным объектом. Представлены алгоритм и результаты численных расчетов импульсной программы управления движением космического робота при его перелете в окрестность орбитального объекта за заданное время в центральном гравитационном поле Земли при использовании метода Хэррика.

Ключевые слова: космический робот, программа управления, импульс скорости.

Summary

The problem of determining the required velocity impulse for the approach of a space robot with an orbital object is considered. An algorithm and results of numerical calculations of the impulse program for controlling the motion of a space robot during its flight to the vicinity of an orbital object for a given time in the central gravitational field of the Earth using the Harrick method are presented.

Keywords: spacecraft-robot, the iteration terminal control, pointing accuracy.

Введение

Реализация современных программ развития космической техники связана с разработкой маневрирующих космических роботов (КР), применение которых предполагает сближение с интересующим орбитальным объектом (ОО) для решения широкого круга специфических задач. С этой целью необходимо наиболее тщательно рассматривать вопросы, связанные с разработкой автономных систем управления КР и их алгоритмического обеспечения.

При синтезе траекторий встречи КР и ОО в качестве последнего участка рассматривается отрезок орбиты, обеспечивающий переход КР в расчетную точку встречи с ОО, т.е. в некоторую точку на орбите ОО, куда ОО придет одновременно с КР. Этап сближения аппроксимируется последним импульсом (в точке встречи) для уравнивания векторов скорости КР и ОО, например, в случае двухимпульсного маневра: первый импульс обеспечивает переход в точку встречи, а второй – уравнивание скорости КР и ОО в этой точке.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Поскольку второй импульс аппроксимирует этап сближения, мы не будем подробно исследовать его характеристики, тем более, что при известных орбите ОО и переходной орбите КР величина и направление импульса, необходимого для уравнивания скоростей, определяются довольно просто. Таким образом, задача сводится к определению необходимого импульса скорости для перевода КР на орбиту, по которой он придет в точку встречи с ОО в заданный момент времени.

Решение этой задачи фактически заключается в определении орбиты по двум радиусам-

векторам положения летательных аппаратов на орбитах и времени перехода КР в окрестность ОО. Для ее решения применяется метод Гаусса, методы, основанные на уравнении Эйлера-Ламберта, и другие.

Область применения метода Гаусса ограничена малыми угловыми дальностями перехода. Одним из способов преодоления этого недостатка является применение метода Хэррика, приведенного в работе [1].

Целью статьи является разработка алгоритма автономного управления сближением КР с ОО, предназначенного для определения необходимого импульса скорости для перевода КР на орбиту, по которой он придет в точку встречи с ОО в заданный момент времени с использованием метода Хэррика.

Алгоритм автономного управления сближением космического аппарата с орбитальным объектом

При расчете импульсных программ управления сближением КР и ОО в центральном гравитационном поле Земли воспользуемся методом Хэррика [2]. Суть метода состоит в итерационном решении модифицированного уравнения Ламберта методом Ньютона относительно неизвестного фокального параметра p переходной траектории. Данный метод может использоваться при синтезе алгоритмов расчета квазиоптимальных программ управления сближением в качестве приближенного корректирующего оператора [2].

Схема алгоритма автономного управления сближением КР с ОО на основе применения метода Хэррика представлена на рисунке 1, работа которого выполняется пошагово в следующей последовательности.

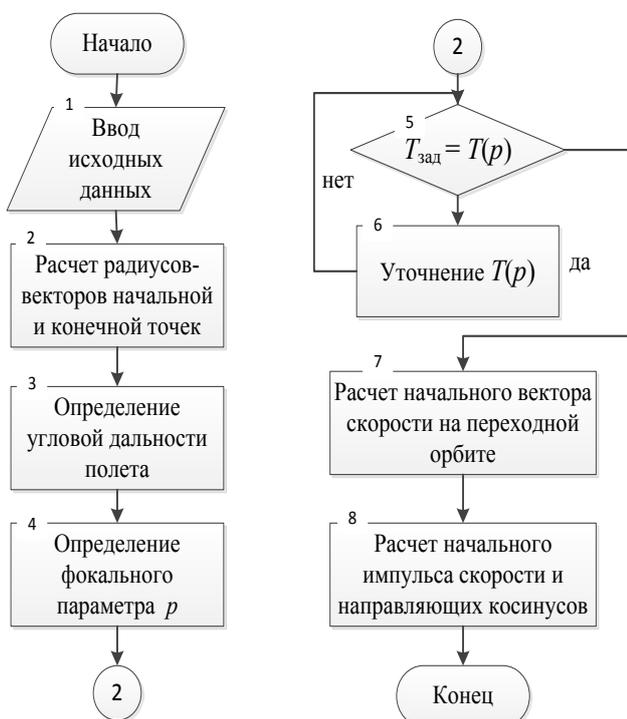


Рис. 1. Схема алгоритма автономного управления сближением КР с ОО

Таблица 1
Исходные данные

Рассматриваемые объекты	Высота круговой орбиты, км	Аргумент широты u	Наклонение орбиты i , град
КА	500 км	0	60
ОО	1000 км	5	60

Таблица 2
Результаты расчетов

№ изм.	ТЗАД, с	ΔV , км/с	a , км	p , км	e	φ , град	ТПЕРИОДА, с
1	787	0,550	7873	7735	0,13232	50,0	6953
2	1574	0,307	7140	7124	0,04775	95,0	6004
3	2362	0,221	7087	7075	0,04014	140,0	5937
4	2974	0,196	7118	7107	0,03953	175,0	5976
5	3149	0,203	7129	7118	0,03972	185,0	5991
6	3324	0,216	7141	7130	0,04008	195,0	6005

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Шаг 1. Ввод исходных данных для решения поставленной задачи (блок 1).

Шаг 2. Производится расчет радиусов-векторов начальной \vec{r}_1 и конечной \vec{r}_2 точек переходной орбиты (блок 2)

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{X_{10}^2 + Y_{10}^2 + Z_{10}^2}; \\ r_2 &= \sqrt{X_{20}^2 + Y_{20}^2 + Z_{20}^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где X_{10}, Y_{10}, Z_{10} – координаты начальной точки;
 X_{20}, Y_{20}, Z_{20} – координаты конечной точки.

Шаг 3. Определяется угловая дальность полета φ из начальной точки в окрестность ОО (блок 3)

$$\varphi = \arccos \frac{r_1 r_2}{r_1 r_2}. \quad (2)$$

Шаг 4. Производится итерационное решение уравнения Херрика для определения фокального параметра p переходной траектории за заданное время (блок 4)

$$T(p) = \sqrt{\frac{a^3(p)}{\mu}} (M_2(p) - M_1(p)), \quad (3)$$

где a – большая полуось переходного эллипса;
 M_1, M_2 – средние аномалии начальной и конечной точек переходной орбиты;
 μ – гравитационная постоянная Земли.

Уравнение (3) решается методом Ньютона с помощью выражения

$$p_{i+1} = p_i + \left(\frac{\partial T(p)}{\partial T} \right)_i^{-1} (T_{\text{зад}} - T(p_i)), \quad (4)$$

где i – номер итераций;
 $T(p)$ – уточненное значение времени перелета из начальной точки орбиты в конечную, соответствующее уточненному значению фокального параметра p переходной орбиты.

$$\left(\frac{\partial T(p)}{\partial T} \right)_i$$

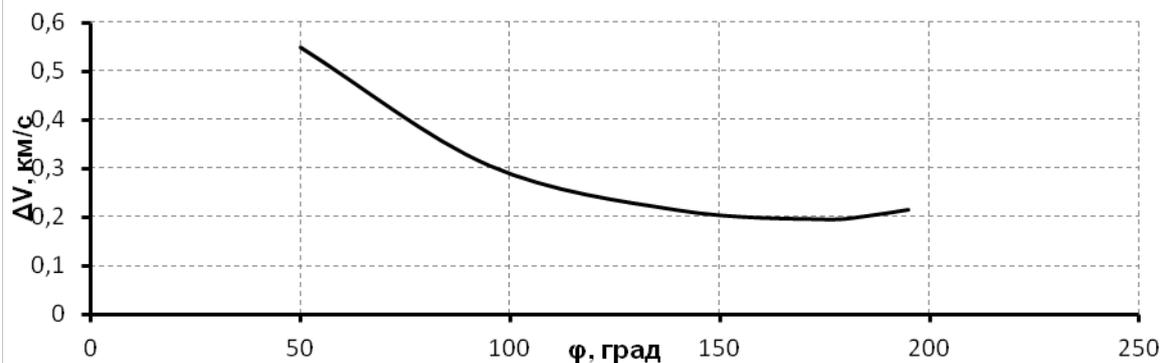


Рис. 2. Зависимость требуемого приращения скорости от угловой дальности φ между КР и ОО

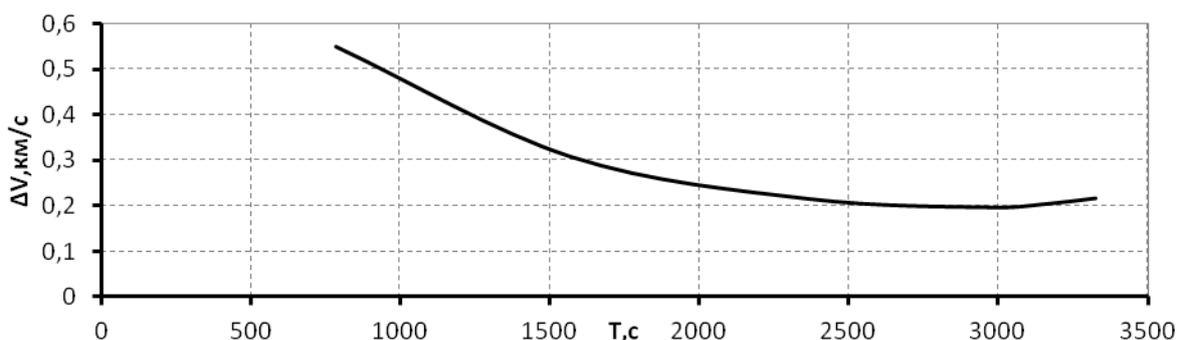


Рис. 3. Зависимость требуемого приращения скорости от заданного времени

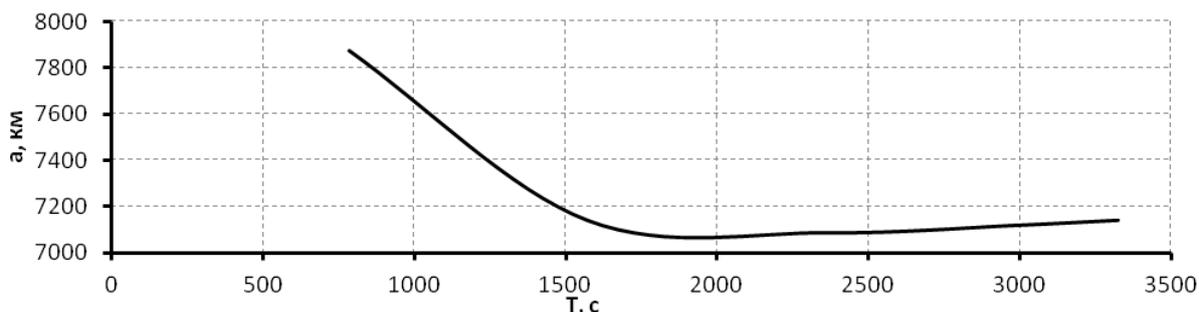


Рис. 4. Изменение большой полуоси переходной траектории в зависимости от заданного времени

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

вычисляются методом конечных разностей.

Шаг 5. Расчет функции $T(p)$ (блок 5) производится в следующей последовательности:

- вычисление тригонометрических функций от f_1 и f_2 – истинных аномалий начальной и конечной точек переходной орбиты из уравнений

$$e \cos f_j = \frac{p}{r_j} = 1, j = \overline{1, 2}$$

$$e \sin f_2 = \frac{e \cos f_1 - e \cos f_2 \cdot \cos \varphi}{\sin \varphi}; \quad (5)$$

$$e \sin f_1 = \frac{e \cos f_1 \cdot \cos \varphi - e \cos f_2}{\sin \varphi};$$

- расчет эксцентриситета e переходной орбиты КР из условия

$$e = \sqrt{(e \cos f_1)^2 + (e \sin f_2)^2}; \quad (6)$$

- определение эксцентрических аномалий E_1 и E_2 начальной и конечной точек переходной орбиты

$$\cos E_1 = \frac{r_1}{p} \cos f_1 + e; \quad (7)$$

$$\sin E_2 = \frac{r_2}{p} \sqrt{1 - e^2} \sin f_2;$$

- расчет средних аномалий M_1 и M_2 начальной и конечной точек переходной орбиты путем решения уравнений Кеплера

$$M_i = E_i - e \sin E_i, \quad (8)$$

где $E_i = \arctg\left(\frac{\sin E_i}{\cos E_i}\right)$;

- вычисление большой полуоси a переходной орбиты КР

$$a = \frac{p}{1 - e^2}. \quad (9)$$

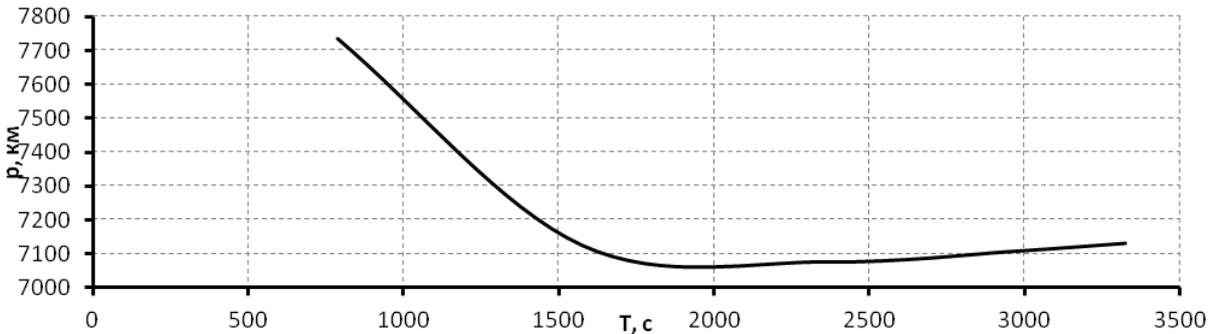


Рис. 5. Зависимость фокального параметра от заданного времени

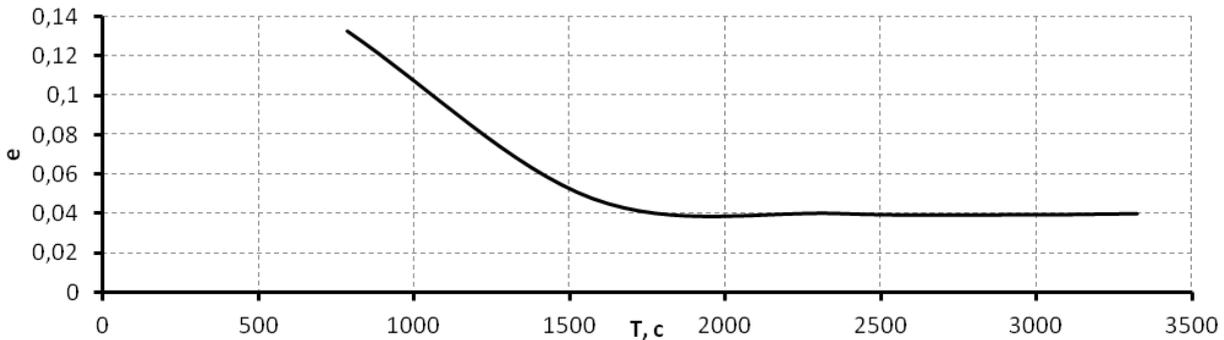


Рис. 6. Зависимость эксцентриситета от заданного времени

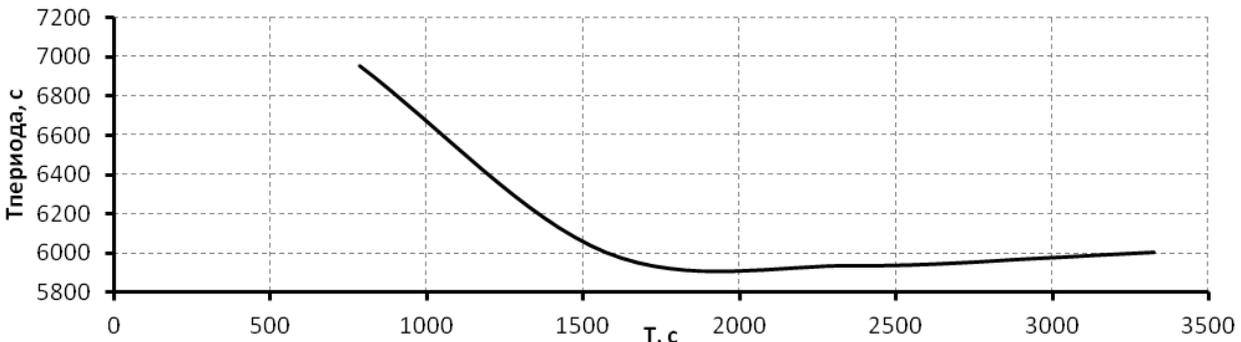


Рис. 7. Зависимость периода обращения переходной траектории от заданного времени

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Шаг 6. Расчет начального вектора скорости \vec{V}_0 на переходной орбите КР (блок 7)

$$\vec{V}_0 = \frac{\sqrt{\mu p}}{r_1 r_2 \sin \varphi} \left\{ \vec{r}_2 - \left[1 - \frac{r_2}{p} (1 - \cos \varphi) \right] \vec{r}_1 \right\}. \quad (10)$$

Шаг 7. Вычисление начального импульса скорости $\Delta \vec{V}_1$ КР и его направляющих косинусов $\vec{\alpha}$ (блок 8)

$$\Delta \vec{V}_1 = \vec{V}_0 - \vec{V}_1, \quad \vec{\alpha} = \frac{\Delta \vec{V}_1}{|\Delta \vec{V}_1|}, \quad (11)$$

где \vec{V}_1 – начальная скорость КА;
 $\Delta \vec{V}_1 = \Delta V_1$ – модуль импульса скорости.

Таким образом, разработан алгоритм расчета импульсной программы управления полетом КР в центральном гравитационном поле Земли за заданное время. Задачей разработанного алгоритма является определение необходимого импульса скорости $\Delta \vec{V}_1$, обеспечивающего перелет из начального положения \vec{r}_1 в конечную точку прицеливания \vec{r}_2 за заданное время $T_{зад}$.

Результаты численных исследований

Приведены результаты расчета импульсной программы управления движением КР при его перелете в окрестность ОО за заданное время в центральном поле Земли.

Расчеты проводились при изменении угловой дальности полета φ в диапазоне от 50 до 195 град и в соответствии с этим, заданное время полета $T_{зад}$ изменялось в диапазоне от 700 до 3500 с. Параметры исходного состояния КР и ОО приведены в *таблице 1*.

Результаты расчетов представлены в *таблице 2* и на *рисунках 1-6* в виде графиков.

В *таблице 2* приведены значения требуемых затрат характеристической скорости ΔV для перевода КР в окрестность ОО в соответствии с заданной угловой дальностью φ и временем полета $T_{зад}$, а также основные параметры переходных траекторий: большая полуось a , фокальный параметр p , эксцентриситет e и период переходной орбиты T_n .

На *рисунке 2* показано изменение характеристической скорости ΔV от угловой дальности полета φ , а на *рисунках 3-7* приведены графики зависимостей необходимых затрат скорости, а также большой полуоси, фокального параметра, эксцентриситета и периода переходной траек-

тории от заданного времени полета.

Полученные результаты численных расчетов показали, что применение метода Хэррика позволяет с высокой точностью перейти с орбиты ожидания в заданную окрестность ОО за заданное время.

Заключение

По результатам расчетов можно сделать следующие основные выводы:

- необходимые затраты характеристической скорости КР существенно зависят от его угловой дальности и времени перелета в окрестность ОО;
- для принятого в *таблице 1* варианта исходного состояния КР и ОО оптимальное значение угловой дальности и времени полета значительно отличаются от оптимальных условий перелета;
- минимальные затраты характеристической скорости слабо зависят от точности задания оптимального времени перелета. При отклонении от оптимального времени перелета до 200 секунд скорость изменяется лишь на 7 м/с. Это позволяет приближенно задавать время перелета в окрестность ОО.

Результаты исследований могут быть использованы для разработки программы управления КР при полете в заданную окрестность ОО в нецентральной гравитационном поле Земли с конечной тягой с использованием метода приближенного корректирующего оператора [3].

Литература

1. Бэттин Р. Навигация, наведение и стабилизация в космосе/ Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1966. 448 с.
2. Миронов В.И., Миронов Ю.В., Макаров М.М., Бурмистров В.В. Применение метода Хэррика-Лиу для расчета программы управления сближением космических аппаратов в нецентральной гравитационном поле Земли с конечной тягой// Сборник трудов ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014. №645. С.171-176.
3. Миронов В.И., Миронов Ю.В., Юсупов Р.М. Метод приближенного корректирующего оператора в задачах вариационного оценивания параметров движения космических аппаратов// Известия вузов. Приборостроение, 2011. №3. С.11-17.



ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА



УДК 007.52

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ РЕАЛИЗАЦИИ ГРУППОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ НАЗЕМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

PROBLEMATIC ISSUES OF IMPLEMENTATION OF GROUP APPLICATION OF GROUND-BASED ROBOTIC SYSTEMS FOR MILITARY PURPOSES

Евгений Александрович Антохин

научный сотрудник
ФГБУ «46 ЦНИИ» МО РФ
Адрес: 129327, Москва,
Чукотский проезд, д. 10

Аннотация

В статье рассмотрены основные проблемные вопросы, препятствующие практической реализации группового применения наземных робототехнических комплексов военного назначения, предложены пути их решения.

Ключевые слова: наземный робототехнический комплекс военного назначения; групповое применение; автономные наземные робототехнические комплексы военного назначения; дистанционно управляемые наземные робототехнические комплексы военного назначения; стратегия группового управления; группировки наземных робототехнических комплексов военного назначения; многоагентная система.

Summary

The article considers the main problematic issues that hinder the practical implementation of the group application of ground-based robotic systems for military purposes, and suggests ways to solve them.

Keywords: ground-based robotic system for military purposes, a group application; Autonomous ground robotic systems for military use; remote controlled terrestrial robotic systems for military purposes; the strategy of group management; group ground-based robotic systems for military purposes; a multi-agent system.

На современном этапе отечественного и зарубежного военного строительства внедрение технологий робототехники приобретает характер одного из доминирующих направлений качественного обновления средств вооруженной борьбы [1-3].

Заметные достижения в фундаментальных и технологических областях обеспечили рывок в совершенствовании и миниатюризации процессорной техники, систем интеллектуализации процессов управления, навигации и передачи данных, потребовали необходимость коренного пересмотра устоявшихся основ ведения боевых действий.

Так, в последнее десятилетие в странах НАТО пристальное внимание уделяется вопросам подготовки и ведения сетецентрических войн. В теории разработанная модель сетецентрической войны представляет собой совокупность разведывательной, ударной и информационной составляющих, объединенных в единую систему органами управления и средствами передачи данных. Важным условием эффективного функционирования такой системы является непрерывный процесс оптимального целераспре-

деления в масштабах театра боевых действий. Отмечается также, что сетецентрические войны должны характеризоваться не только доведением полного объема разведывательной информации до каждой боевой единицы в масштабе реального времени, но и высоким уровнем автономности и самоорганизации всех элементов боевого порядка войск (сил) [4].

Реализуя указанные представления, зарубежные военные аналитики рассматривают групповое применение в качестве дальнейшего эволюционного этапа повышения боевых возможностей наземных робототехнических комплексов военного назначения (НРТК ВН) [4,6].

Отечественные военные эксперты также видят практическую реализацию группового применения автономных НРТК ВН как дальнейшую ступень повышения эффективности их использования в современном бою [7,8].

Согласованное применение разнородных групп НРТК ВН способно увеличить масштабы театров военных действий, расширить спектр решаемых задач, повысить вероятность достижения поставленных целей в проводимых операциях.

Проблемные вопросы практической реализации группового применения НРТК ВН

В настоящее время развитие теории и практики реализации группового применения НРТК ВН сдерживается нерешенностью ряда научно-технических проблем. В данной работе предлагается рассмотреть более подробно основные из них.

1. Необходимость повышения автономности существующих образцов НРТК ВН.

подавляющее большинство разрабатываемых и принятых на вооружение (снабжение) роботизированных образцов вооружения представляют из себя классические дистанционно управляемые платформы, способные выполнять в автономном режиме лишь ряд отдельных функций.

Анализ применения НРТК ВН данного типа в локальных вооруженных конфликтах современности выявил целый набор присущих им недостатков, особенно в вариантах оснащения огневыми средствами. Указанные образцы требуют постоянного контроля оператором процесса боевого управления:

- проведения разведки обстановки и поиска целей;
- отслеживания передвижения робота на местности, преодоления им препятствий и заграждений;
- выбора боеприпасов, ведения огня и оценки результатов стрельбы.

В таких условиях координация согласованных действий нескольких операторов для решения задачи организации группового применения будет крайне затруднена, а при росте численного состава группировки роботов практически невозможна.

В этой связи дальнейшее развитие военной робототехники российские и иностранные специалисты связывают с повышением уровня автономности НРТК ВН, когда часть функционала оператора будет передана на бортовую информационно-управляющую систему робота.

Российские инженеры указывают следующие проблемы, препятствующие достижению требуемого уровня автономности отечественных НРТК ВН в целях дальнейшей реализации их группового применения.

- отсутствие отечественной элементной базы для построения систем технического зрения, обеспечивающих определение геометрической и опорной проходимости несущих грунтов (тепловизоров, датчиков различной природы, 2D и 3D активных сканирующих дальномеров, в том числе комплексированных с видеокамерами);
- отсутствие отечественных высокоточных

бортовых средств навигации и построения геометрии окружающего пространства, необходимых для применения НРТК ВН в условиях плотной городской застройки, внутри зданий и сооружений;

- нерешенные вопросы автономного применения целевой нагрузки, включая разработку алгоритмов обнаружения и распознавания типа цели, опознавания «свой-чужой», наведения оружия или иных средств;

- трудности при построении скрытых каналов управления, в разработке силовых установок НРТК ВН, трансмиссии, двигателей и ряд других [9-11].

2. Низкий уровень проработки вопросов стандартизации и унификации при разработке и создании НРТК ВН.

В сухопутных войсках США разработаны и действуют ряд нормативно-технических документов по созданию наземных образцов безэкипажных машин. Указанные документы данные документы, в том числе и в целях унификации и стандартизации комплектующих и программного обеспечения,

устанавливают требуемые классификационные признаки НРТК ВН, разрабатываемых в интересах оборонного ведомства. Данные признаки представляют собой номенклатуру требований, предъявляемых к наземным безэкипажным машинам и их компонентам, как к отдельным боевым единицам, так и к перспективным составным элементам разнородных групп [4].

Состояние отечественных разработок в рассматриваемой области в целом можно охарактеризовать следующим образом:

- не выработаны действенные механизмы взаимодействия межведомственной и межвидовой унификации НРТК ВН и их базовых компонентов;
- требуется разработка нормативно-технических документов, устанавливающих требования в рассматриваемой области
- не налажен выпуск необходимой унифицированной элементной базы;
- российский рынок характеризуется большим разнообразием номенклатуры существующих и разрабатываемых однотипных образцов НРТК ВН;
- большая часть компонентов НРТК ВН российской разработки предназначены для использования только в конкретных образцах и не могут быть выделены из общей конструкции;
- существующие и разрабатываемые НРТК ВН, зачастую даже одного производителя, уникальны по своим техническим решениям, компоновке и программному обеспечению, что крайне затрудняет или вообще исключает возможность

их использования при создании других аналогичных образцов военной робототехники [6].

Полагается целесообразным решение данных проблемных вопросов начать с унификации и стандартизации протоколов обмена информацией и языков программирования, а в дальнейшем перейти к созданию типоразмерного ряда унифицированных компонентов НРТК ВН отечественного производства.

3. Требуется разработка типовых тактических сценариев, эффективных форм и способов группового применения НРТК ВН.

Всесторонние исследования иностранных военных специалистов, направленные на внедрение образцов военной робототехники в войска, в настоящее время базируются на детальном изучении эффективных способов и методов их применения при выполнении широкого спектра тактических задач в составе как однотипных, так и разнородных групп [12].

Для достижения заданных целей иностранные эксперты проводят научно-практические мероприятия, направленные на решение следующих задач:

- формирование баз данных эффективных способов применения безэкипажных машин боевого и обеспечивающего назначения в ходе согласованных групповых действий;
- разработка моделей представления многоагентных робототехнических группировок как объектов сетецентрического управления;
- отработка типовых тактических сценариев боевого применения НРТК ВН в составе группировок с применением расчетно-моделирующих комплексов, созданных на базе технологий виртуальной реальности [13].

Результатом проведения данных работ стала разработка принципиально новых методических подходов к проведению испытаний НРТК ВН, основанных на моделировании типовых тактических сценариев (эпизодов) боевого применения как отдельных роботизированных образцов ВВСТ, так и их группировок различного состава и численности.

Полученный опыт позволил военным специалистам США, Германии и Израиля не только обосновать необходимый объем контрольных и войсковых испытаний НРТК ВН, определить их порядок и правила проведения, но и дал возможность расширить номенклатуру наземных безэкипажных машин различного назначения, разрабатываемых в интересах Сухопутных войск [14-16]. Эффект от практического применения аналогичных подходов оказался достаточно высоким и в других странах [17].

Приходится отметить, что отечественные исследования, направленные на разработку типовых тактических сценариев боевого применения отдельных НРТК ВН и их групп, до настоящего времени не завершены, роль и место наземных

роботов в структуре и иерархии подразделений тактического звена сухопутных войск окончательно не сформированы.

Ряд возможных вариантов боевого применения группировок автономных НРТК ВН предложены в работах [18,19].

4. Решение организационно-правовых вопросов применения оружия автономными НРТК ВН.

На заседаниях, проводимых под эгидой ООН в рамках уточнения Конвенции о запрещении или ограничении применения различных видов вооружения, неоднократно обсуждалась проблема о необходимости установки моратория на развитие автономных боевых роботов (Lethal autonomous robotics – LAR) [20]. Однако разработка автономных образцов робототехники ударного (боевого) предназначения с целью создания военного превосходства во многих странах продолжается.

Анализ применения автономного роботизированного вооружения в локальных конфликтах современности лишней раз указывает на актуальность рассматриваемой проблемы.

Так, в результате применения ударных автономных беспилотных аппаратов 24 мая 2012 года во время обстрела Эссо Кхел (Esoo Khel) погибло 2 мирных жителя, а 26 мая того же года в районе Миран Шах Базар (Miran Shah Bazaar) был разрушен ряд жилых зданий, что привело к гибели еще 6 человек.

В 2007 года американские военные перебросили в Ирак для проведения испытаний три опытных образца наземного робота Swords, вооруженных пулеметами M249. По результатам проведенных научно-технических экспериментов командованию армии США пришлось отказаться от боевого применения указанных роботов. Причиной тому стал ряд инцидентов, в ходе которых робот неоднократно самопроизвольно разворачивал оружие в сторону позиций своих подразделений и открывал огонь без команды оператора.

Указанные факторы требуют безотлагательного рассмотрения всех правовых, гуманитарных и этических аспектов для полного урегулирования вопросов применения оружия автономными роботизированными образцами ВВСТ в случаях отсутствия непосредственного управления оператором [21].

По мнению авторов, на современном этапе развития военной робототехники все без исключения нормативно-правовые акты, регламентирующие принципы применения автономных НРТК ВН, должны основываться на утверждении, что все случаи применения вооружения и решения о проведении маневра должны санкционироваться оператором.

5. Выбор оптимальной стратегии группового управления НРТК ВН.

Среди возможных стратегий группового управления НРТК ВН выделяют централизованную и децентрализованную. Кроме того, известны также смешанные (комбинированные) стратегии, которые совмещают в себе принципы как централизованного, так и децентрализованного управления [22-26].

Стратегии централизованного управления в свою очередь подразделяются на стратегии, использующие принцип единоначалия, и стратегии, базирующиеся на применении принципа иерархического управления.

Концептуальная суть стратегии централизованного единоначального управления заключается в обязательном присутствии в составе группы робота-лидера, который выполняет функции по планированию и управлению действиями всех остальных агентов системы. Основные преимущества указанной стратегии – простота ее организации и алгоритмизации. Вместе с тем, сложность реализации стратегии централизованного единоначального управления растет по экспоненте с повышением числа объектов в группе, обуславливая увеличение времени принятия управленческих решений.

Данный недостаток несколько нивелируется при централизованной иерархической организации стратегии группового управления, когда робот-лидер (командир 1 уровня) санкционирует работу ограниченного числа подчиненных – руководителей 2 уровня и т.д. При таком подходе существенно снижается сложность задачи, решаемой каждым роботом -лидером в отдельности, возрастает оперативность управления.

Отдельно стоит выделить общий недостаток, присущий централизованным стратегиям группового управления, – это низкая живучесть системы. Уничтожение робота-лидера приводит к полной недееспособности группы в целом (или ее части, в случае реализации иерархической стратегии управления).

Суть децентрализованного управления кроется в отсутствии в группе робота-лидера, когда каждый агент системы самостоятельно принимает решение о дальнейших действиях, стремясь внести наибольший вклад в решение поставленной задачи. Такие системы обладают сравнительно более высокой живучестью. Выход из строя любого из членов группы, ввиду их равенства, не приводит к недееспособности системы, а следовательно, и к срыву выполнения поставленных задач. Кроме того, задача по алгоритмизации действий каждого агента системы в отдельности представляется сравнительно

несложной, так как он не пытается оптимизировать функционирование оставшихся членов группы.

К недостаткам стратегии децентрализованного управления следует отнести необходимость реализации высокой интеллектуальности всех членов группы. Кроме того, децентрализованная стратегия не гарантирует оптимального решения групповой задачи, поскольку решение принимается каждым членом группы по отдельности.

По мнению авторов, на начальном этапе реализации группового применения НРТК ВН (при пока еще незначительном численном составе группировок) в качестве основы должна быть положена единоначальная стратегия, реализующая основной принцип строительства и управления армейскими формированиями. При таком подходе в группе автономных роботов в каждый конкретный момент времени должен быть определен единственный робот-лидер, что позволит реализовать режим «ведущий – ведомый».

Возможные способы организации группы автономных НРТК ВН на основе соблюдения принципа единоначалия с применением на разных этапах боевой работы роботов-лидеров предложены в работах [27-29].

6. Разработка методического аппарата оценки эффективности боевого применения группировок НРТК ВН.

Большая часть существующих подходов применима исключительно для оценки экипажных образцов ВВСТ, они не позволяют учесть конструктивные особенности и специфику боевого применения НРТК ВН [30-32]. Исследованиям в области оценки одиночного применения отдельных роботизированных образцов ВВСТ посвящены, например, работы [33-35].

В сложившихся условиях разработка методического аппарата оценки эффективности применения группировок НРТК ВН различного состава и численности с учетом эффекта эмерджентности представляется крайне актуальной комплексной задачей, требующей проведения исследований по следующим направлениям:

- а) разработка математических моделей применения группировок НРТК ВН;
- б) разработка методик определения оптимального состава и численности группировок НРТК ВН для решения конкретной боевой задачи;
- в) разработка методики оценки эффективности группировок НРТК ВН;
- г) анализ и обобщение закономерностей влияния ограничивающих факторов и различных

условий боевой обстановки на эффективность применения группировок НРТК ВН;

д) обоснование способов повышения эффективности решения боевых задач группировкой НРТК ВН в условиях ресурсных ограничений.

7. Разработка алгоритмов планирования выполнения задач группировкой НРТК ВН.

При организации группового управления НРТК ВН, направленного на согласованное решение боевых и обеспечивающих задач, роботы должны взаимодействовать друг с другом с тем, чтобы как можно более эффективно достичь поставленных целей в условиях быстро изменяющейся обстановки современного боя. Группа роботов должна функционировать как единая система, а действия каждого ее агента должны направляться на получение наибольшего общего эффекта.

В этой связи алгоритмы планирования и управления групповыми действиями РТК ВН должны разрабатываться с учетом необходимости их реализации в режиме реального времени на основе бортовых вычислительных устройств.

Решение указанных вопросов представляется многокритериальной научно-технической задачей, которая затрагивает не только методы распределения подзадач между отдельными членами группировки НРТК ВН, но и аспекты планирования траекторий движения в такой мультиагентной системе (выдерживание заданных интервалов и дистанций в бою, предотвращение столкновений, обеспечение минимизации пройденного пути и т.д.) [36].

Выводы

1. Реализация группового применения автономных НРТК ВН является мировой тенденцией дальнейшего развития военной робототехники.

2. Групповое применение разнородных, а в перспективе и разнородных группировок НРТК ВН позволит существенно повысить боевые возможности войсковых формирований.

3. Для своевременного и качественного решения первоочередных задач реализации группового применения НРТК ВН уже сегодня требуется инициация проведения соответствующих научных и экспериментальных исследований по единой государственной программе.

Литература

1. Антохин Е.А., Максютин А.Н., Паничев В.А. Актуальные вопросы развития роботизированного вооружения Сухопутных войск// Известия ВА РВСН им. Петра Великого, 2018. №280. С.21-27.
2. Александров В.А., Ветлугин Р.С., Макаренко А.Н. Взгляды военных специалистов США на боевое применение наземных робототехнических

комплексов// Зарубежное военное обозрение, 2018. № 6. С.39-43.

3. Корчак В.Ю., Машков К.Ю., Рубцов И.В. Проблемные вопросы развития наземной военной робототехники// Стратегическая стабильность, 2017. № 4. С.36-40.

4. Ветлугин Р., Васильков А. Робототехнические комплексы сухопутных войск США и взгляды военных специалистов на их применение// Зарубежное военное обозрение, 2016. № 6. С.55-59.

5. Цариченко С.Г., Антохин Е.А., Чернова П.Д., Дементей В.П. Состояние и проблемы стандартизации и унификации наземных робототехнических комплексов военного назначения// Робототехника и техническая кибернетика, 2020. №1(8). С.18-23.

6. Антипова С.А., Волков М.Н. Краткий обзор основных направлений разработки и применения робототехнических комплексов Вооруженными Силами США// Сборник «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях», 2019. С.150-154.

7. Рубцов И.В., Носков В.П., Лапшов В.С. Опыт реализации и внедрения режимов автономного управления в робототехнических комплексах специального назначения как основа и перспектива организации группового управления гетерогенными роботами// Материалы десятой Всероссийской мультиконференции по проблемам управления. В 3 т. Т. 3. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2017. С.309-311.

8. Лапшов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В., Рудианов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С. Формирование моделей виртуальной реальности и информационно-навигационных полей для обеспечения автономного функционирования робототехнических комплексов специального назначения// Известия ЮФУ. Технические науки, 2017. № 1/2 (186/187). С.248-265.

9. Рудианов Н.А., Хрущев В.С. Концептуальные вопросы построения и применения автономных робототехнических комплексов военного назначения// Военная мысль, 2019. № 6. С.55-61.

10. Шеремет И.Б., Рудианов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С. Проблемы развития роботизированного вооружения СВ// Известия ЮФУ. Технические науки, 2013. №3(140). С.45-49.

11. Кудряшов В.Б., Лапшов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В. Проблемы роботизации вооружения и военной техники в части наземной составляющей// Известия ЮФУ. Технические науки, 2014. №3(152). С.42-57.

12. Корнилов В.И., Наумов В.Н., Пантелеев А.А., Соколенко В.Н. Типовые сценарии применения и технические требования, предъявляемые за рубежом к испытаниям наземных робототехнических комплексов военного назначения// Сборник рефератов депонированных рукописей. Серия Б, 2012. №96. С.32-41.

13. Благодарящев И.В., Антохин Е.А., Федюлин А.М., Паничев В.А. Опыт применения имитационного моделирования боевых действий на базе технологий виртуальной реальности для оценки

- наземных робототехнических комплексов военного назначения// Робототехника и техническая кибернетика, 2019. Т.7. №2. С.94-99.
14. LarsApfel. ELROB 2010 Militärische Aufgabenstellungen in einsatznahen Szenarien// Strategie und Technik, 2010. №4 (April). Pp.18-21.
15. KlausRuhlid. Multirobotersysteme// Strategie und Technik, 2009. №12 (Dezember). Pp.84-91.
16. Achim Hesse. Bodengebundene unbemannte Systeme// Strategie und Technik, 2010. №4 (April). Pp.14-17.
17. Состояние и перспективы развития за рубежом безэкипажных наземных машин, используемых в интересах сухопутных войск. (По материалам зарубежной печати 2005-2012 гг.)// «Сборник переводов статей» НИИЦ БТ 3 ЦНИИ МО РФ. Специальный выпуск по зарубежным безэкипажным наземным машинам и системам, 2012. С.151.
18. Шеремет И.Б., Рудианов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С. Групповое применение наземных РТК при ведении боевых действий в составе общевойсковых формирований сухопутных войск// Материалы десятой Всероссийской научно-технической конференции «Перспективные системы и задачи управления». В 2-х т. Т.1. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. С.255-261.
19. Шеремет И.Б., Рудианов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С. Распределение функций между командными пунктами и бортовыми вычислительными системами при групповом управлении наземными робототехническими комплексами военного назначения// Материалы 8-й Всероссийской мультиконференции по проблемам управления. В 3-х т. Т.2. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. С.194-196.
20. Report of the Special Reporter on extrajudicial, summary or arbitrary executions, Christof Heyns// UN General Assembly. URL: http://www.ohchr.org/Documents/HRBodies/HRCouncil/RegularSession/Session23/A-HRC-23-47_en.pdf (date of access: 5.11.2019).
21. Тиханычев О.В. О правовых и этических аспектах автономного использования робототехнических комплексов в сфере вооруженного противоборства// Вопросы безопасности, 2019. № 3. С.33-42.
22. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009. 278 с.
23. Каляев И.А., Шеремет И.А., Военная робототехника: выбор пути// Мехатроника, автоматизация, управление, 2008. №2. С.32-34.
24. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Александрова Р.И. Смешанные стратегии группового управления в многоагентных робототехнических системах// Известия ЮФУ. Технические науки, 2015. №7. С.8-13.
25. Каляев И.А. Принципы организации децентрализованных систем управления коллективов микроботов// Мехатроника, автоматизация, управление, 2000. №6. С.16-26.
26. Каляев И.А. Принципы коллективного принятия решения и управления при групповом взаимодействии роботов// Мобильные роботы и мехатронные системы: мат. науч. школы-конф. М.: Изд-во МГУ, 2000. С.204-221.
27. Шеремет И.Б., Рудианов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С. Групповое применение наземных РТК при ведении боевых действий в составе общевойсковых формирований Сухопутных войск// Материалы десятой Всероссийской научно-технической конференции «Перспективные системы и задачи управления». В 2-х т. Т.1. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. С.255-261.
28. Шеремет И.Б., Рудианов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С. Распределение функций между командными пунктами и бортовыми вычислительными системами при групповом управлении наземными робототехническими комплексами военного назначения// Материалы 8-й Всероссийской мультиконференции по проблемам управления. В 3-х т. Т.2. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. С.194-196.
29. Рудианов Н.А., Гурджи А.И. Рябов А.В., Хрущев В.С. Роль и место роботов-лидеров в группах автономных РТК военного назначения// Сборник материалов 12-й Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». В 3-х т. Т. 2. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2017. С.246-250.
30. Мельников А.В., Рогозин Е.А. Методика оценки эффективности функционирования беспилотного летательного аппарата на основе вероятностной модели динамического конфликта// Моделирование систем и процессов, 2017. Т.10. №4. С.64-71.
31. Бутырский Е.Ю., Козлов А.В., Шклярчук О.Н. Некоторые аспекты сравнительной военно-экономической оценки перспективных образцов вооружения и военной техники в интересах технического оснащения ВМФ РФ// Национальная безопасность и стратегическое планирование, 2016. №2-1(14). С.37-43.
32. Строгалев В.П., Гунько Д.В., Нагапетян О.В. Обоснование системы вооружения боевой машины поддержки танков// Оборонная техника, 2007. №3-4. С.3-6.
33. Гривачев А.В., Авдеев В.О., Варганов В.В. Титенко Е.А. Модифицированный метод анализа иерархий для оценки наземных робототехнических комплексов // Экстремальная робототехника, 2018. Т.1. №1. С.409-416.
34. Павлов Е.В., Ершов В.И., Осипов Ю.Н. Оценка эффективности применения робототехнического комплекса многорежимного пожаротушения в чрезвычайных ситуациях// Пожарная безопасность, 2018. №4. С.22-27.
35. Ефремов Е.В. Применение стохастической модели для оценок эффективности наземных робототехнических комплексов // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире, 2015. №10-1. С.13-17.
36. Ермолов И.А., Хрипунов С.П. Проблемы группового применения робототехнических комплексов и пути их решения// Экстремальная робототехника, 2018. Т.1. № 1. С.279-285.

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ



УДК 355.237

ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДГОТОВКИ (ПЕРЕПОДГОТОВКИ) СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ ВС РФ И ПРЕДПРИЯТИЙ ОПК В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ПОДХОДОВ В ОРГАНИЗАЦИИ ПРОХОЖДЕНИЯ ВОЕННОЙ СЛУЖБЫ

PROBLEMS OF INCREASING THE EFFICIENCY OF TRAINING (RETRAINING) OF SPECIALISTS FOR THE AF OF THE RF AND ENTERPRISES OF THE MIC IN THE CONTEXT OF CHANGING APPROACHES TO THE ORGANIZATION OF MILITARY SERVICE

Виктор Николаевич Тищенко

*кандидат технических наук
ведущий специалист
МОУ «ИИФ»*
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер. 1а
Тел.: +7(4967) 35-31-93
E-mail: rino-152@iifmail.ru

Анатолий Витальевич Рут

*кандидат технических наук
Главное управление кадров МО РФ*
Адрес: 119160, Москва,
1-й Хорошевский проезд, д. 3
Тел.: +7 (495) 693-54-90
E-mail: guk@mil.ru

Владимир Анатольевич Грачёв

*почётный работник ВПО РФ
кандидат педагогических наук
советник президента
МОУ «ИИФ»*
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93

Евгений Валерьевич Умников

*ведущий инженер
МОУ «ИИФ»*
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер. 1а
Тел.: +7(4967) 35-31-93
E-mail: rtk@iifmail.ru

Аннотация

В статье рассмотрена предполагаемая структура и функционал средств обеспечения информационной БВ статье рассмотрены исторические аспекты военного образования, обоснована необходимость создания системы мониторинга в рамках НИР в которой предлагается оценить существующую систему подготовки специалистов и на основе проведенных теоретических исследований обеспечить повышение эффективности подготовки военных специалистов.

Ключевые слова: система мониторинга, система подготовки военных специалистов, повышение эффективности военного образования.

Summary

The article considers the historical aspects of military education, justifies the need to create a monitoring system within the framework of research and development, which offers to evaluate the existing system of training specialists and, based on theoretical studies, to ensure an increase in the effectiveness of training military specialists.

Keywords: monitoring system, education system for military specialists, improving the effectiveness of military education.

Введение

Система подготовки кадров (военных специалистов) для Вооруженных сил Российской Федерации (ВС РФ), других войск, воинских формирований и органов является неотъемлемой частью военной организации государства

и неразрывно связана с системой образования страны. Основное предназначение системы – подготовка квалифицированных кадров для военной службы как особого вида государственной службы.

Любые изменения в организации прохожде-

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

ния военной службы, развитие средств вооруженной борьбы, усложнение разрабатываемой военной техники, изменение форм и способов ведения боевых действий, а также изменения в общей системе высшего и профессионального образования России вызывают необходимость адекватных преобразований и в системе подготовки военных специалистов, которые должны заранее прогнозироваться, просчитываться и реализовываться в рамках единого замысла (стратегии).

Практика показывает, что все крупные преобразования в системе подготовки военных кадров неразрывно связаны и являются результатом проводимых научных исследований в области подготовки кадров.

Современный облик системы военного образования в своей основе сложился в 1970-1980 гг. В 1969-1972 гг. по инициативе Главного управления военно-учебных заведений была проведена комплексная научно-исследовательская работа «Система», которая послужила основой реформы (преобразований) в системе военного образования 1972-1976 гг.

В ходе этой реформы впервые были введены уровни военного образования (среднее военно-специальное, высшее военно-специальное и высшее военное), научно обосновано и установлено минимальное время на изучение общеобразовательных, общинженерных и инженерно-технических дисциплин (образец государственного образовательного стандарта). Расширена научная база военных академий. Созданы новые исследовательские лаборатории и научные группы для изучения вопросов развития и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ). Введена в практику подготовка научно-педагогических кадров для военных вузов преимущественно в военной адъюнктуре.

Создание российских Вооруженных сил, изменение принципов и основ получения высшего образования потребовали новых кардинальных преобразований в системе подготовки кадров. По итогам НИР «Альбом» (1990-1993 гг.) и «Обучение» (1992-1996) была разработана Концепция развития системы военного образования, утвержденная приказом Министра обороны Российской Федерации 1993 года №191 [1]. В ходе реализации концепции была восстановлена целостность системы военного образования, нарушенная с распадом Советского Союза. Уровни образования и сроки обучения приведены в соответствие с новой структурой образования России. Разработаны макеты квалификационных требований к военно-профес-

сиональной подготовке офицеров как дополнения к государственному образовательному стандарту, которые используются и в настоящее время. Предусмотрено обучение по двум специальностям: военной и родственной ей гражданской, завершено формирование новой нормативно-правовой базы подготовки кадров, соответствующей изменившимся военному законодательству и законодательству в области образования.

Сокращение армии и флота, экономическое состояние государства, переход к контрактному принципу комплектования потребовали поиска новых путей и форм развития системы подготовки военных кадров, отвечающих вызову времени. По итогам комплексной НИР «Приоритет» (1994-1997 гг.), выполненной по заказу Управления военного образования, была разработана Программа совершенствования системы военного образования, утвержденная приказом Министра обороны Российской Федерации 1998 года №338 [2], которая в последующем трансформировалась в федеральную целевую программу «Реформирование системы военного образования в Российской Федерации на период до 2010 года» (утверждена постановлением Правительства Российской Федерации 2002 года №352 [3]).

В ходе реализации данных программных документов была проведена масштабная оптимизация сети и емкости военно-учебных заведений, позволившая сохранить целостность и фундаментальность военного образования. Научно обоснованная филиальная сеть вузов исключила дублирующие функции управления с одновременным сокращением их избыточности. Впервые, после провала 1990-х – начала 2000 годов, проведено целевое финансирование укрупняемых военно-учебных заведений, позволившее в условиях ограниченных ресурсов провести комплексную модернизацию их учебно-материальной базы, начиная от строительства объектов, поставки тренажеров ВВТ и заканчивая обновлением библиотечных фондов, созданием в вузах информационной среды.

Всесторонне были изучены и просчитаны ответные меры на увеличение масштабов увольнения офицеров с военной службы, внедрен новый, экономически эффективный дополнительный источник подготовки военных кадров – учебные военные центры при гражданских вузах. Научно обоснованы и реализованы методики возмещения затрат на обучение курсантов в вузе. Начато создание системы мониторинга экономики и качества военного образования, как прообраза перспективной автоматизированной системы управления повседневной деятельностью ву-

зов – АСУ «Интеграция-СВО». Утвержденная Правительством России федеральная целевая программа, как результат проведенных научных исследований, была первым и на сегодняшний день единственным документом федерального уровня, объединяющем замысел, стратегию, направления и пути развития военного образования в контексте государственной политики в области профессионального образования и военно-строительства.

В последующем аналогичный подход к развитию военного образования, как элемента военно-технического сотрудничества с иностранными государствами, был реализован в ведомственной целевой программе «Развитие высших военно-учебных заведений и учебных центров для обучения (подготовки) иностранных специалистов из состава экипажей и боевых расчетов поставляемых на экспорт вооружения и военной техники», утвержденной приказом Министра обороны Российской Федерации 2012 года №600 [4].

После 2012 года концептуальные и программные документы, отражающие состояние и перспективы развития системы подготовки специалистов для военной организации государства на основе всестороннего анализа принципов и подходов государственной внутренней и внешней политики не разрабатывались.

Вместе с тем, за прошедший период в области развития образования, военного строительства, а также в организации государственной службы произошли существенные изменения, требующие анализа, обобщения и учета при определении направлений развития системы подготовки кадров:

1. Указом Президента Российской Федерации 2012 года №599 [5] сформулированы основы государственной политики в области образования, при реализации которых осуществлен переход на новое поколение государственных образовательных стандартов, ориентированных на развитие способностей и компетенций обучаемых, внедрен принцип нормативно-подушевого финансирования образовательных программ высшего профессионального образования, взят курс на расширение системы повышения квалификации и профессиональной подготовки.

2. Указом Президента Российской Федерации 2012 года №601 [6] определены меры стратегического планирования в области государственного управления, среди которых установлены новые поколения квалификационных требований к должностям государственной гражданской службы на основе компетентного подхода, развитие института наставничества, совершен-

ствование профессионального обучения специалистов.

3. Указом Президента Российской Федерации 2012 года №603 определены ключевые задачи в области строительства военной организации государства, модернизации оборонно-промышленного комплекса. Сформулированы приоритеты в развитии видов и родов войск Вооруженных сил Российской Федерации, определено создание новой системы анализа и стратегического планирования в области национальной безопасности, поставлены задачи по совершенствованию системы образования работников организаций ОПК.

4. Указом Президента Российской Федерации 2012 года №605 [7] существенно увеличена численность военнослужащих, проходящих военную службу по контракту, создан резерв Вооруженных сил Российской Федерации.

Курс на определение целей и стратегических задач развития Российской Федерации в области образования и науки, внедрения цифровых технологий, ускорения технологического развития был продолжен с выходом Указа Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. №204 [8].

Вместе с тем, адекватного реагирования на изменившиеся внутренние и внешние условия функционирования системы профессионального образования *не произошло*.

Модели деятельности военных специалистов, отражающие приоритетные направления развития видов и родов войск, а также требования к эксплуатации перспективных образцов ВВСТ не разрабатывались. Квалификационные требования к должностям военной службы, ориентированные на компетентный подход определения содержания военного образования, не корректировались и не перерабатывались. Изменения в системе профессионального образования рядового и сержантского состава, отражающие изменения его количественного и качественного состава, не просчитывались – и как следствие, по ряду специальностей первичного звена возник острый дефицит специалистов.

Системный и непрерывный мониторинг качества военного образования на основе сопоставления данных о профессиональной деятельности выпускников и содержания образовательных программ не проводится. Единые методики такого мониторинга не разрабатывались. С 2000 года не уточнялись показатели и критерии комплексной оценки эффективности реализации военными вузами профессиональных образовательных программ.

Новации, произошедшие в системе формирования кадрового состава государственной

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

гражданской службы, связанные с внедрением системы государственного кадрового заказа, определением содержания и этапов профессионального развития государственного служащего в системе подготовки кадров для военной службы отражения не нашли.

В связи с этим назрела задача разработки комплексной стратегии развития системы подготовки специалистов, как в интересах Вооруженных сил Российской Федерации, так и предприятий ОПК, отражающей основные тенденции развития профессионального образования в стране, военного строительства, а также организации государственной службы. Для решения этого вопроса целесообразно провести научно-исследовательскую работу, в которой оценить существующую систему подготовки специалистов и на основе проведенных теоретических исследований обеспечить повышение эффективности подготовки военных специалистов. Основным элементом этой работы была бы постоянная система мониторинга эффективности подготовки (переподготовки) специалистов (рисунк 1) в виде программного продукта.

Указанная система позволит всесторонне в динамике учесть изменения в комплексной оценке влияние внешних и внутренних факторов на Программу государственной подготовки и более рационально осуществлять планирование кадрового заказа в интересах ВС РФ на среднесрочную и долгосрочную перспективу.

Данная система была бы в подпор специалистам планирования кадрового заказа за счет широкого функционала, гибкости, универсальности и в общем позволит:

- провести комплексный анализ совокупности угроз и вызовов обеспечения безопасности

государства, всестороннюю оценку степени их влияния на функционирование и развитие системы подготовки специалистов для ВС РФ и предприятий ОПК;

- сформировать концептуальные подходы к содержанию и структуре системы подготовки специалистов для ВС РФ и предприятий ОПК в условиях преобразования высшего и профессионального образования, а также необходимость формирования кадрового резерва;

- разработать методики среднесрочного и долгосрочного прогнозирования потребности в специалистах для ВС РФ и предприятий ОПК различного уровня и направленности, практические рекомендации по реализации методик в практической деятельности органов военного управления;

- разработать концепции непрерывного мониторинга состояния системы подготовки кадров для ВС РФ и предприятий ОПК с использованием существующих и перспективных информационных систем, предложений в проекты нормативных правовых актов, реализующих положения концепции;

- сформировать основные направления развития системы подготовки кадров для ВС РФ и предприятий ОПК, разработать проект государственной программы подготовки (переподготовки) специалистов для ВС РФ и ОПК до 2030 года и дальнейшую перспективу.

В целом это даст возможность:

- расширить возможности по подготовке военных специалистов в условиях различных негативных факторов, в том числе недостаточного финансирования, вызванного финансовыми кризисами различного масштаба;

- реализовать возможность постоянного мо-

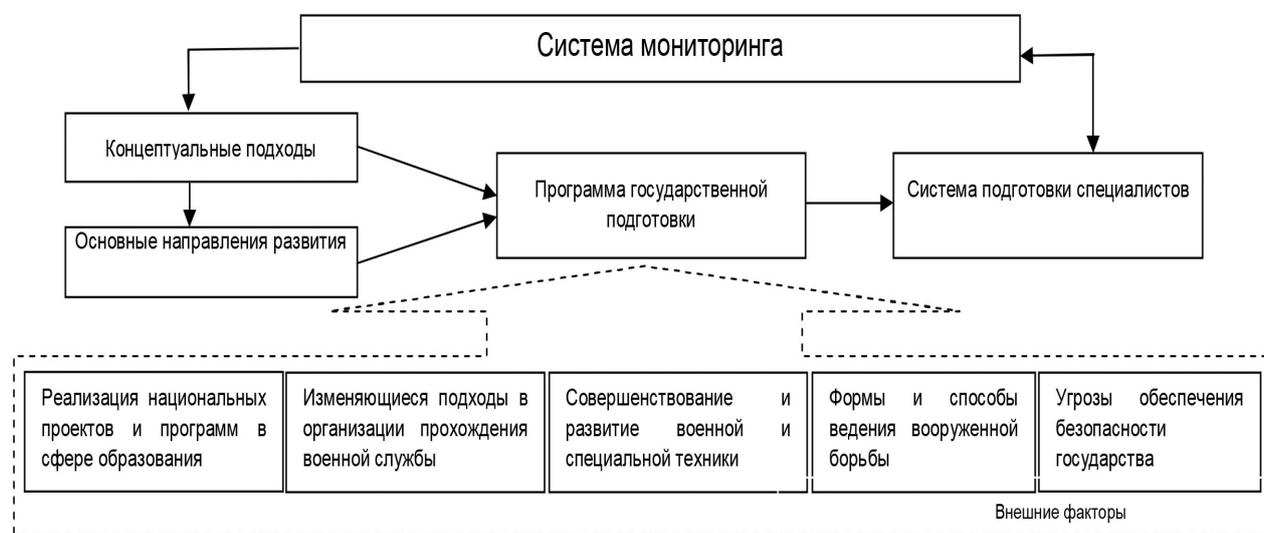


Рис. 1. Структура системы мониторинга

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

мониторинга состояния системы военного образования, своевременно осуществлять подготовку мер, направленных на недопущение снижения эффективности ее функционирования;

● сформировать проект комплексной государственной программы подготовки (переподготовки) специалистов для ВС РФ и предприятий ОПК до 2030 года и дальнейшую перспективу, разработать систему контроля реализации ее требований (положений) и организации уточнения (при необходимости).

Кроме того, реализация полученных результатов работы позволит в кратчайшие сроки формировать меры, направленные на компенсацию возможного снижения уровня укомплектованности Вооруженных сил Российской Федерации компетентными военными кадрами.

Заключение

В данной работе обоснована необходимость создания системы мониторинга в рамках НИР, в которой предлагается оценить существующую систему подготовки специалистов и на основе проведенных теоретических исследований обеспечить повышение эффективности подготовки военных специалистов.

Литература

1. Концепция развития системы военного образования. Приказ Министра обороны Российской Федерации 1993 года №191.
2. Программа совершенствования системы военного образования. Приказ Министра обороны Российской Федерации 1998 года №338.
3. Федеральная целевая программа «Реформирование системы военного образования в Российской Федерации на период до 2010 года». Постановление Правительства Российской Федерации 2002 года №352.
4. Ведомственная целевая программа «Развитие высших военно-учебных заведений и учебных центров для обучения (подготовки) иностранных специалистов из состава экипажей и боевых расчетов поставляемых на экспорт вооружения и военной техники». Утверждена приказом Министра обороны Российской Федерации 2012 года №600.
5. Указ Президента Российской Федерации 2012 года №599.
6. Указ Президента Российской Федерации 2012 года №601.
7. Указ Президента Российской Федерации 2012 года №605.
8. Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. №204.

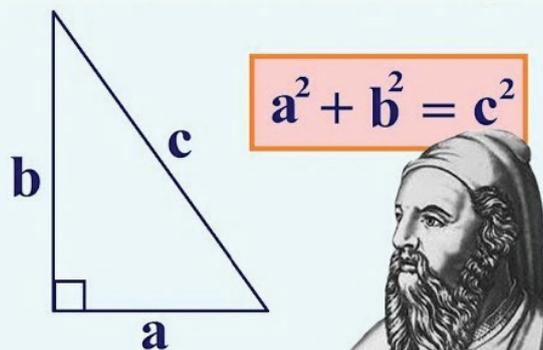


УДК 51

**ТЕОРЕМА ПИФАГОРА. РЕТРОСПЕКТИВА
ФОРМИРОВАНИЯ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА**

**THE PYTHAGOREAN THEOREM.
RETROSPECTIVE OF EVIDENCE FORMATION**

Виктор Васильевич Лесных
преподаватель кафедры физики
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7 (916) 664-64-12
E-mail: viktor-lesnykh@yandex.ru



Аннотация

В статье делается экскурс в историю развития геометрии, что дает возможность наглядно показать изменения в формировании доказательства наиболее известной теоремы этой дисциплины, в ходе формирования абстрактного научного мышления. В качестве иллюстрации этого процесса в статье автор приводит свой вариант доказательства теоремы Пифагора, который считает наиболее близким к первоначальному варианту.

Ключевые слова: геометрия в Греции, геометрия и землемерие, Пифагор, доказательство теоремы, сумма квадратов.

Summary

The article makes an excursion into the history of the development of geometry, which makes it possible to clearly show the changes in the formation of the proof of the most famous theorem of this discipline, in the course of the formation of abstract scientific thinking. As an illustration of this process, the article presents its own version of the proof of the Pythagorean theorem, which he considers to be the closest to the original version.

Keywords: geometry in Greece, geometry and land surveying, Pythagoras, proof of the theorem, sum of squares.

Введение

В конце 2020 года, а конкретно 16 декабря, математическая общественность отмечала событие, которое малоизвестно широкому кругу читателей – *Международный день теоремы Пифагора*. Он празднуется специалистами в области точных наук в тот день, когда сумма квадратов числа месяца и порядкового номера месяца равна квадрату года: $16^2 + 12^2 = 20^2$ (т.е. $256 + 144 = 400$). А это именно 16.12.20 года.

Такое случается далеко не каждый год. Предыдущий день был 15 августа 2017 года: $15^2 + 8^2 = 17^2$.

Что касается самой теоремы Пифагора, то в настоящее время известно более 400 способов ее доказательства. Попробуем предложить и свой. Но для начала немного истории.

Первые геометрические знания были перенесены в Грецию из Египта примерно шесть столетий до нашей эры. Древние авторы связывают этот процесс с Фалесом – основателем известной философской школы. Ему удалось за время своего путешествия в Египет усвоить мудрость жрецов и принести эти знания в Грецию.

Есть предположение, что и Пифагор проходил обучение у жрецов Древнего Египта [1]. Но в противоположность своим египетским учителям, Фалес и Пифагор видели в этих знаниях,

только «чистую» науку и не рассматривали практическое приложение своих исследований. И в этом есть определенная загадка, поскольку «Геометрия, что по-гречески значит «землемерие» наука изначально приземленная» [2].

Развитию «землемерия» в Египте способствовала река Нил. Основные плодородные земли находились в его пойме, а постоянные разливы меняли границы возделываемых участков. Для формирования налоговой политики и планирования съестных запасов требовались методы точного определения границ и площадей сельскохозяйственных угодий.

Пифагор был поклонником «чистых» знаний и не думал о практическом их применении. Такая постановка вопроса в греческой науке привела к удивительным последствиям: «в течение нескольких столетий греки неизмеримо опередили своих учителей-египтян» [1].

**Теорема Пифагора и ее доказательство
в ретроспективе**

Характерной чертой эллинского ума была способность и любовь к отвлеченному мышлению [3]. Результатом такого подхода стала современная формулировка теоремы Пифагора в таком виде: «*В прямоугольном треугольнике квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов: $c^2 = a^2 + b^2$* ».

Но во времена Пифагора, формулировка еще имела «египетский» след и читалась в виде, отражающем ее прикладное содержание: «*Квадрат, построенный на гипотенузе прямоугольного треугольника, равновелик с суммой квадратов, построенных на его катетах*». Геометрическое изображение этой формулировки выглядит так, как это показано на *рисунке 1*.

Эта зависимость, как говорилось выше, была известна еще в древнем Египте (около 1900 г. до н.э.). Связь между катетами и гипотенузой в прямоугольном треугольнике была изображена на вавилонской глиняной табличке (которой около 4000 лет). Однако это знание стало широко использоваться лишь после того, как сам Пифагор заявил о нем (он жил в 6 веке до н. э.).

С глубокой древности математики находят все новые и новые доказательства теоремы Пифагора, и стремление к их преумножению сохранилось и в наше время.

Рассмотрим и мы вариант доказательства этой теоремы, исходя из того, что древние египтяне имели ввиду не степени чисел, определяющих размеры гипотенузы и катетов, а площади прилегающих к ним квадратов:

$$Sa = a \times a = a^2, Sb = b \times b = b^2, Sc = c \times c = c^2.$$

Вычисляя эти значения, они думали о конкретных земельных наделах, а не об абстрактных числах. Им необходимо было убедиться в том, что:

$$Sc = Sa + Sb$$

При таком подходе, можно предположить следующих ход мысли египетских жрецов. Если верно, что площадь квадрата, примыкающего к гипотенузе c прямоугольного треугольника равна сумме площадей квадратов, примыкающих к катетам a и b , то площади этих квадратов, можно вписать в площадь большего квадрата со стороной c (*рисунк 2*).

Возьмем длину наименьшего катета a за основную единицу оценки вписанных площадей в квадрат, со стороной равной длине гипотенузы c . Выразим площадь квадрата катета b суммой площадей трех прямоугольников S_1, S_2, S_3 :

$$S_b = S_1 + S_2 + S_3.$$

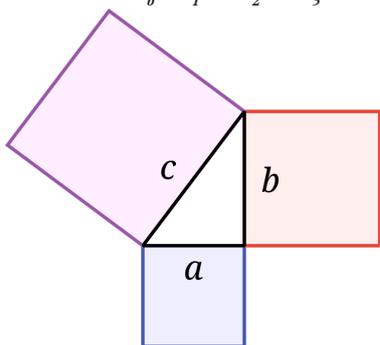


Рис. 1. Графическое изображение теоремы Пифагора

Размеры сторон прямоугольников с площадями S_1, S_2, S_3 определим через значения a и $c - a$. Тогда значения площадей S_1, S_2, S_3 будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} S_1 &= a^*(c-a) = ac - a^2; \\ S_2 &= (c-a)*(c-a) = c^2 - ac - ac + a^2 = c^2 - 2ac + a^2 \\ S_3 &= a^*(c-a) = ac - a^2. \end{aligned}$$

Отсюда площадь квадрата катета b , выраженная через величины a и c , будет иметь следующий вид:

$$S_b = ac - a^2 + c^2 - 2ac + a^2 + ac - a^2.$$

После проведения сокращений равных величин с противоположными знаками (выделены **красным** и **синим** цветами) получим равенство:

$$S_b = c^2 - a^2 \text{ или } S_b = S_c - S_a.$$

Что и требовалось доказать, поскольку после переноса площади квадрата гипотенузы c в левую часть формулы, а площади катета b в правую часть получим равенство в виде:

$$S_c = S_a + S_b$$

Или в «греческой» интерпретации:

$$c^2 = a^2 + b^2$$

Заключение

Изучение истории математики порою дает неожиданные результаты. Ретроспектива вглубь веков позволяет обнаружить исторические точки, в которых наука делала повороты. Приведенное в данной статье очередное доказательство теоремы Пифагора позволяет сделать вывод, что можно делать научные открытия не только в текущей временной точке, но и отойдя назад и выбрав путь, по которому наука могла пойти, но в силу разных причин не пошла.

P.S. Следующий Международный день теоремы Пифагора будет отмечаться 24 июля 2025 года.

Литература

1. Богомолов С.А. Эволюция геометрической мысли. Л.: Культурно-просветительное кооперативное товарищество «Начатки знаний», 1928. 222 с.
2. Народная энциклопедия научных и прикладных знаний. Т.1. Физико-математические науки. М.: Типография товарищества И.Д.Сытина, 1912. 324 с.
3. Шумихин С.А., Шумихина А.М. Число Пи. История длиной в 4000 лет. М.: Эксмо, 2011. 192 с.

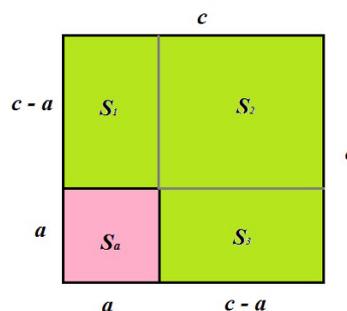


Рис. 2. Графическое изображение суммы квадратов катетов.



Afanasiev Andrey A. Doctor of Technical Sciences, associate professor, employee, Federal state military educational institution of higher education «Academy of the Federal security service of the Russian Federation». Orel, Priborostroitelnaia str., 35.

Antokhin Evgeny A. Research associate. FSBI «46 Central Research institute» of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Moscow, Chukotsky proezd, 10.

Atakishchev Oleg I. Doctor of Technical Sciences, professor. Deputy general director for special projects. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny I., 1a.

Batenkov Kirill A. Doctor of Technical Sciences, associate professor, employee. Federal state military educational institution of higher education «Academy of the Federal security service of the Russian Federation». Orel, Priborostroitelnaia str., 35.

Belov Yuri S. Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of the Department of Computer Software, Information Technologies. Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

Brodsky Maksim S. Researcher. Military space Academy named after A.F. Mozhaiskiy. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

Burmistrov Vladimir V. Teacher. Military space Academy named after A.F. Mozhaiskiy. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

But Gennady S. Candidate of technical Sciences, associate professor. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

Chernousov Maxim S. Adjunct. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Demenkov Maxim Y. Scientific Secretary of the section of the Interdepartmental Scientific Council on Complex Problems of Physics, Chemistry and Biology under the Presidium of the Russian Academy of Sciences. Moscow, Gubkina str., 3.

Dubinin Dmitry P. Teacher of the Department of RVSU VUC at MAI. Moscow, Volokolamsk highway, 4.

Egorov Vladislav V. Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny I., 1a.

Elistratov Alexander V. Leading engineer. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Grachev Vladimir A. Honorary Worker of Higher Professional Education. Candidate of Pedagogical Sci-

es. Advisor to the President of the Institute. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny I., 1a.

Grigoriev Andrey I. Doctor of Technical Sciences, Professor, General Director of the Russian Foundation for Advanced Research. Moscow, Berezhkovskaya nab., 22.

Grishunov Stepan S. Post graduate student of the Department of Computer Software, Information Technologies. Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

Gurkina Elena D. Assistant of the department «Information processing system». Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

Katkov Oleg N. Candidate of Technical Sciences, employee, Federal state military educational institution of higher education «Academy of the Federal security service of the Russian Federation». Orel, Priborostroitelnaia str., 35.

Kazakov Rafael R. Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer. Military Space Academy. A.F. Mozhaiskiy. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

Khamatov Andrey A. Candidate of Technical Sciences, teacher of the Department of «Onboard information and measurement systems». Military Space Academy. A.F. Mozhaiskiy. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

Kolombet Valeriy A. Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Head of the laboratory. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Kozoriz Denis A. Leading Researcher. FSBI «16 TSNIII» OF THE Ministry of Defense of the Russian Federation. Moscow reg., Mytishchi, Komarova str., 17.

Kvashennikov Vladislav V. Doctor of Technical Sciences, the leading scientific employee Joint-stock company «The Kaluga scientific research institute Telemechanical devices». Kaluga, st. Karl Marx, 4.

Lakovshchikov Ivan V. Student. Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

Lesnykh Vadim N. Junior scientist. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Lesnykh Viktor V. Teacher of the Department of Physics. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Mironov Vyacheslav I. Doctor of Technical Sciences, Professor. Professor of 21 departments. Military space Academy named after A.F. Mozhaiskiy. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.



Nikulin Anton S. Student. Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

Nizhnikovsky Evgeny A. Doctor of Technical Sciences, Professor, Full Member of the Russian Academy of Natural Sciences, Deputy Head of the Interdepartmental Scientific Council for Complex Problems of Physics, Chemistry and Biology under the Presidium of the Russian Academy of Sciences. Moscow, Gubkina str., 3.

Petrin Dmitry A. Student. Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

Rozganov Maksim V. Senior Researcher. Military space Academy named after A.F. Mozhaiskiy. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

Rug Anatoly V. Candidate of Technical Sciences. Main Directorate of personnel of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Moscow, 1-st Khoroshevsky proezd, 3.

Salko Andrey E. Laureate of the prize of the government of the Russian Federation in the field of science and technology. Doctor of Technical Sciences, Professor. Deputy Director General for science and technology policy and inter-structural communications. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

Shirokov Sergey E. Head of the 252nd laboratory of the Department of on-Board information and measurement systems. Military space Academy named after A.F. Mozhaiskiy. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

Sinitsyn Sergey V. Candidate of technical Sciences, associate professor. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

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 Udarney I., 1a.

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 Udarney I., 1a.

Tishenko Viktor N. Leading specialist. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

Tkachenko Anastasiya V. Graduate student, assistant of the department «Information processing system». Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

Tzar'kov Alexey N. Honored scientist of Russia, Doctor of Technical Sciences, professor. President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

Umnikov Evgeny V. Leading engineer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

Ustinov Vladimir V. Post-graduate. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Utkin Dmitry R. Candidate of technical Sciences. Researcher. Military space Academy named after A.F. Mozhaiskiy. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

Vanyushin Vladimir M. Doctor of Technical Sciences, Professor. Honorary citizen of the city of Serpukhov. Head of the Serpukhov UES. Moscow reg., Serpukhov, Sovetskaya str., 63.

Vershinin Evgeny V. Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor. Head of Department of «Information processing systems». 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 Udarney I., 1a.

Vologdina Anastasia A. Scientific Secretary of the section of the Interdepartmental Scientific Council on Complex Problems of Physics, Chemistry and Biology under the Presidium of the Russian Academy of Sciences. Moscow, Gubkina str., 3.

Vykrest Aleksandr Y. Employee. Federal state military educational institution of higher education «Academy of the Federal security service of the Russian Federation». Orel, Priborostroitelnaia str., 35.

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 Force. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Zelenevsky Yury V. Doctor of Technical Sciences, associate professor. Researcher. Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow Reg., Balashikha, Karbysheva st., 8.



ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

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.

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 конкурентных, 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 СТАТЕЙ

Для публикации принимаются статьи на русском языке. Рекомендуемый объем статьи – 0,2–0,4 п.л. (8000–16000 знаков).

Тексты должны быть представлены:

- 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 А4.

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:

- рубрика журнала (см. Приложение 1);
- УДК;
- название статьи с переводом на английский язык;
- имя, отчество, фамилия автора (авторов), ученая степень, ученое звание, должность и место работы.

Список литературы (Литература) размещается в конце статьи.

После литературы помещаются:

- список ключевых слов, краткая аннотация (на русском и английском языках).

Завершает рукопись полная информация об авторе (авторах):

- ФИО;
- ученая степень, ученое звание, должность и место работы с переводом на английский язык;
- адрес места работы, контактные телефоны, электронный адрес (по желанию автора – домашний адрес и телефон).

Обращаем особое внимание на:

- точность и правильность библиографического оформления списка литературы (в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008);
- выверенность статьи в компьютерном наборе;
- 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.



CONTENTS

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND SYSTEMS

Kolombet V.A., Lesnykh V.N., Elistratov A.V.	
Spectrum of universal period-tripling system in optical region	2
Ustinov V.V.	
Method of selecting a digital map for correcting the ground navigation system by characteristic points of highways	8
Nizhnikovsky E.A., Vologdina A.A., Demenkov M.Y., Grigoriev A.I., Sal'ko A.E.	
Use of perovskite structures in photoelectrochemical converters	12
Khamatov A.A., Shirokov S.E., Dubinin D.P.	
On the issue of eliminating the consequences of armed conflicts using robotic systems	17
Zakharov V.L., Smirnov D.V., Kazakov R.R.	
Model of the law of distribution of the coordinates of the points of incidence of the separating parts of promising launch vehicles	20

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

Rozganov M.V., Brodsky M.S., Utkin D.R.	
Technical requirement foundation for satellite communications system earth stations based on the active phased array antennas functioning model	24
Vykrest A.U., Batenkov K.A., Katkov O.N., Afanasiev A.A.	
Analysis of signal transmission along the phantom line	29
Zelenevsky V.V., Chernousov M.S., Zelenevsky Y.V., Zelenevsky A.V., Egorov V.V.	
Method for assessing the energy efficiency of binary conventional and block codes with soft and hard decoding	33
Kozoriz D.A.	
Research on the availability of the communication system in the network-centric version of its construction	38

INFORMATION SCIENCE, COMPUTING AND MANAGEMENT

Kvashennikov V.V.	
Comparative analysis of storing of the information in biological systems and in devices electronic memory	42
But G.S., Sinitsyn S.V.	
Mathematical modeling of the process of thermal power accumulation in the turnover water supply system of enterprises	48

Vershinin E.V., Lakovshchikov I.V., Nikulin A.S.	
Application of logistic regression to the problem of binary classification of texts	53
Petrin D.A., Grishunov S.S., Belov Y.S.	
Improving the quality of machine learning models in the problems of image classification based on the data augmentation method	56
Vershinin E.V., Tkachenko A.V., Gurkina E.D.	
The development of a model for predicting cardiovascular diseases using ANN	61
Umnikov E.V., Atakishchev O.I., Vanjushin V.M., Grachev V.A.	
Features of providing information security when modeling RTK with the use of the virtual training space	66
Volkov G.G., Smurov S.V., Tzar'kov A.N.	
On the projective algebraic varieties in toric geometry and quantum physics	73
Zakharov V.L., Smirnov D.V., Burmistrov V.V., Mironov V.I.	
Algorithm for calculating the impulse program of autonomous control of the approach of a space robot with an orbital object for a given time	87

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND ROBOTICS

Antokhin E.A.	
Problematic issues of implementation of group application of ground-based robotic systems for military purposes	92

PROFESSIONAL EDUCATION

Tishenko V.N., Rug A.V., Grachev V.A., Umnikov E.V.	
Problems of increasing the efficiency of training (retraining) of specialists for the AF of the RF and enterprises of the MIC in the context of changing approaches to the organization of military service	98

SCIENTIFIC REVIEWS • SCIENTIFIC CRITIQUES • COMMENTS

Lesnykh V.V.	
The Pythagorean theorem. Retrospective of evidence formation	103

AUTHORS	105
THE ETHICS OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS	107
REQUIREMENTS TO AUTHORS	108



Межрегиональное
общественное
учреждение

«Институт
инженерной
физики»

(МОУ «ИИФ»)

научное, образовательное
и производственное
учреждение