Межрегиональное общественное учреждение
“Институт инженерной физики”
(научное, образовательное и производственное учреждение)

В НОМЕРЕ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

2 **Н.М. Емелин.** Условная оптимизация параметров марковских моделей диагностики информационно-управляющих систем

5 **С.Г. Данилюк, А.А. Мурашко.** Применение вероятностно-лингвистического подхода при решении задачи оценки уязвимости системы обеспечения безопасности эксплуатации важных технических объектов

13 **Е.П. Минаков, С.В. Суровикин.** Методика организации скрытного перемещения наземных объектов

20 **О.С. Ассур.** Разработка метода локального позиционирования объектов на основе алгоритмов корреляционно-экстремальных систем

27 **С.А. Лычагов, А.Н. Фуров, О.П. Кузнецов.** Метод наведения летательного аппарата по линии аналитического визирования

30 **В.Е. Аксёнов, А.Ю. Порядин.** Математическая модель комплексной предстартовой калибровки акселерометров с нелинейной оптимальной оценкой их параметров при подвижной точке разложения с априорной информацией

35 **А.Ю. Порядин.** Методика комплексной предстартовой калибровки акселерометров с нелинейной оптимальной оценкой их параметров при подвижной точке разложения в двух положениях гиростабилизированной платформы с априорной информацией

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

40 **А.Н. Васильев, С.В. Смуров, П.А. Семёнов, Н.С. Кукин, А.А. Бухтияров, Д.О. Капусткин.** Экспериментальное наблюдение оптически детектируемого магнитного резонанса в кристалле алмаза с примесями азота

45 **С.Н. Шиманов, В.А. Цимбал, В.А. Прасолов, С.В. Франков, С.Ю. Бобрус.** Повышение точности синхронизации в ЛЧМ сигналах на основе применения адаптивной сингулярной фильтрации

50 **С.В. Суханов, П.Ю. Одинцов, А.К. Никитин.** Анализ способов захвата сетевого трафика

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

55 **В.А. Коломбет, В.Н. Лесных, Е.В. Коломбет.** Предсказание тактовой частоты процессора будущего поколения компьютеров как пример эффективности использования в технике свойств фрактальной системы утраивающихся периодов

59 **Л.Г. Осовецкий, А.В. Ефимова.** Гарантии выявления недекларированных возможностей в промышленном программном обеспечении

64 **В.П. Карулин.** Задача оптимизации основных параметров модели программного управления ресурсными возможностями совокупности технических устройств

70 **А.А. Евсиков, В.А. Коковин, А.П. Леонов.** Об особенностях моделирования электромеханической части прецизионной цифровой системы с широтно-импульсным управлением

75 **С.В. Смуров, Г.Г. Волков, Н.С. Кукин, А.Р. Мурадова, И.О. Глотова.** Введение в геометрию N-арных комплексных чисел

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

83 **И.А. Бугаков, А.Н. Царьков, А.С. Бутранов.** Интеллектуализация специальной робототехники: ключевые идеи интеллектуального поведения

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

92 **А.Г. Попов, В.М. Дунилин, А.С. Пономарёва, М.Ю. Авилов, Н.Д. Спорыхин, Е.В. Бородай.** О применении фазового метода обработки измерительной информации при исследовании прочности конструкций из бетона

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

96 **Н.М. Емелин, Е.Д. Володина.** Марковская модель оценки реализации плана научно-исследовательской работы студентов

Научно-технический журнал

ИЗВЕСТИЯ Института инженерной физики

№2(40)2016

Издается с апреля 2006 г. Выходит ежеквартально

Решением Президиума ВАК включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий»

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
заместитель генерального директора – директор Департамента телекоммуникационных систем ФГУП «ЦНИИ ЭИСУ», заслуженный деятель науки РФ, заслуженный изобретатель РФ, лауреат Государственной премии РФ, лауреат премии Правительства РФ, доктор технических наук, профессор

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

Анатолий Анатольевич Донченко
заместитель начальника Главного научно-исследовательского испытательного центра робототехники по научно-исследовательской и испытательной работе Министерства обороны РФ, доктор технических наук, профессор

Николай Михайлович Емелин
заместитель директора ФГБНУ «Госметодцентр» по научной работе, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор

Валерий Иванович Николаев
научный референт ОАО «Концерн “Созвездие”», доктор технических наук, профессор

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

Юрий Александрович Романенко
заместитель главы администрации города Протвино, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор

Анатолий Васильевич Тодосийчук
заместитель руководителя аппарата Комитета Государственной Думы по науке и наукоемким технологиям, почетный работник науки и техники РФ, доктор экономических наук, профессор

Игорь Анатольевич Шеремет
заместитель директора Российского фонда фундаментальных исследований по науке, доктор технических наук, профессор

научно-технический журнал
Известия
ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ
№ 2 2016
40

Редакционная коллегия

Олег Николаевич Андрух
кандидат технических наук, доцент
Борис Фёдорович Безродный
доктор технических наук, профессор
Сергей Борисович Беркович
почетный геодезист РФ
доктор технических наук, профессор
Владимир Эрнестович Бородай
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Игорь Александрович Бугаков
заслуженный изобретатель РФ,
доктор технических наук, профессор
Александр Михайлович Вальваков
почетный работник науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор
Вадим Геннадьевич Грибунин
доктор технических наук
Сергей Григорьевич Данилюк
доктор технических наук, профессор
Владимир Владимирович Зеленевский
доктор технических наук, профессор
Николай Николаевич Казаков
член Союза писателей России
Олег Павлович Кузнецов
кандидат технических наук, доцент
Александр Ильич Куприянов
доктор технических наук, профессор
Дмитрий Геннадьевич Митрофанов
заслуженный изобретатель РФ,
доктор технических наук, профессор
Роман Леонидович Мусатов
кандидат технических наук
заместитель главного редактора
Игорь Павлович Новожилов
выпускающий редактор
Игорь Николаевич Оков
доктор технических наук, профессор
Владимир Петрович Пашинцев
заслуженный работник высшей школы РФ,
доктор технических наук, профессор
Валерий Николаевич Умников
доктор технических наук, профессор
Дмитрий Вячеславович Смирнов
доктор технических наук, доцент
Сергей Владимирович Смуров
доктор технических наук, профессор
Владимир Анатольевич Цимбал
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Сергей Николаевич Шиманов
почетный радист РФ,
доктор технических наук, профессор

ISSN 2073-8110
Учредитель и издатель – МОУ «ИИФ». Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Подписной индекс: 59190 по каталогу «Научно-технические издания» ОАО «Роспечать»

Адрес редакции: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а.
Тел: +7(4967)35-31-93, 35-13-71
Факс: +7(4967)35-44-20 http://www.iifrf.ru
E-mail: info@iifrf.ru

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации СМИ ПИ №ФС77-26650 от 20 декабря 2006 г.
Отпечатано на полиграфической базе МОУ «ИИФ».
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а.
Подписано в печать 19.04.2016. Дата выхода в свет 25.04.2016. Тираж 2000 экз. Цена свободная.
© Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики» (ИИФ), 2016



Алексей Николаевич Царьков
заслуженный деятель науки РФ
доктор технических наук, профессор
Президент Института –
Председатель Правления Института

Дорогие друзья!

27 апреля Институту инженерной физики исполняется 23 года. Годы летят быстро и, казалось бы, незаметно, но когда оглядываешься на пройденный путь и результаты труда нашего сплоченного коллектива, переполняет чувство гордости!

Год от года Институт наращивает материально-техническую базу, кадровый потенциал, укрепляет авторитет как стабильно развивающееся предприятие ОПК, имеющее коллектив профессионалов, способных генерировать инновационные идеи и реализовывать их на практике.

Институт постоянно расширяет кооперационные связи и приобретает новых партнеров и заказчиков, участвует в реализации ФЦП. Ученые Института представляют инновационные разработки (часть из которых не имеет мировых аналогов!) Президенту России, Председателю правительства, министру обороны, руководителям силовых и гражданских ведомств с целью их продвижения и использования для нужд страны. Мы принимаем участие в крупнейших международных выставках и конференциях – «Армия», «Дни инноваций МО РФ», «Комплексная безопасность», «Интерполитех», «День передовых технологий и инноваций МЧС» и других.

Постоянно расширяется спектр и качество услуг, которые мы оказываем населению и организациям. Наряду с телефонией, Интернетом, системами теле-, видеонаблюдения, охранно-пожарных сигнализаций, сертификацией программных комплексов, аттестацией объектов информатизации мы предоставляем услуги спутникового ГЛОНАСС/GPS контроля, IP-телевидения.

Нашим ученым ежегодно присваиваются высокие звания: «Почетный работник науки и техники РФ», «Инженер года», «Менеджер года», они побеждают в профессиональных конкурсах. Отрадно, что наряду с маститыми учеными среди победителей – наши молодые перспективные кадры. В прошлом году исполнилось 15 лет с момента создания при Институте образовательного холдинга и 10 лет выпуска первых инженеров. Студенты вузов на базе Института: Учебного центра «Интеграция» МАИ, базовой кафедры Университета машиностроения (МАМИ), ИИТУ достигают больших успехов в учебе, научно-практической деятельности. Имеющие склонность к научно-исследовательской работе продолжают обучение в аспирантуре Института. Мы гордимся нашей молодежью, она – будущее Института!

Поздравляю всех сотрудников с Днем рождения Института! Институт – это наше общее детище, которое мы создали небольшой командой единомышленников, взрастили уже большим коллективом, с которым приумножаем его успехи, вкладывая во все дела и начинания свои силы, энергию, идеи, талант, душу! Мы живем этим, стремимся, чтобы с каждым годом Институт становился все более конкурентоспособным. Мы сделали наши научные открытия и изобретения более востребованными, а нашу работу – приносящей пользу России.

Дорогие друзья, удачи нам, творческих успехов, мира, добра, благополучия и Божией благодати!

УДК 519.21

УСЛОВНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МАРКОВСКИХ МОДЕЛЕЙ ДИАГНОСТИКИ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

CONDITIONAL OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF MARKOV MODELS OF DIAGNOSTIC OF INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS

Николай Михайлович Емелин

заслуженный деятель науки и техники РСФСР
доктор технических наук, профессор

заместитель директора ФГБНУ «Госметодцентр»
по научной работе
Адрес: 115998, Москва, ул. Люсиновская, д. 51
Тел.: +7(499)706-81-24

Аннотация

В статье рассматривается алгоритм сведения задачи условной оптимизации параметров марковских моделей диагностики информационно-управляющих систем к задаче безусловной оптимизации, базирующийся на использовании модифицированной функции Лагранжа.

Ключевые слова: марковские процессы, модели, оптимизация, диагностика.

Summary

The article deals with algorithm for reducing the problem of constrained optimization of parameters of Markov models of diagnostic information and control systems to the problem of unconstrained optimization based on the use of a modified Lagrange function.

Keywords: Markov process, models, optimization, diagnostic.

В работе [1] было показано, что, используя марковские модели информационно-управляющих систем (ИУС), можно найти оптимальные значения параметров моделей диагностики, применив итерационный алгоритм оптимизации марковских моделей Р. Ховарда. Но необходимо отметить, что использовать этот алгоритм можно только для решения задач оптимизации при отсутствии ограничений (задач безусловной оптимизации). Что же делать при наличии ограничений, т.е. при решении задач условной оптимизации?

Во-первых, задача условной оптимизации может быть решена и как задача безусловной оптимизации, однако требуется предварительное определение множества G^* значений параметров модели диагностики, обеспечивающих выполнение ограничений. Для чего необходимо многократное решение уравнений Колмогорова вида

$$\sum_{j=1}^{N} a_{ji} \cdot P_i - \sum_{j=1}^{N} a_{ij} \cdot P_j \qquad (1)$$

с учетом нормировочного условия

$$\sum_{j=1}^{N} P_j(t) = 1,$$

где a_{ij} – интенсивности переходов из i-ого в j-е состояние;
P_i – вероятность нахождения в i-ом состоянии;
N – число состояний в модели.

Во-вторых, решение задачи условной опти-

мизации может быть получено и из задачи безусловной оптимизации, но для этого при выборе вектор-решений f_i необходимо проверять, обеспечивают ли интенсивности переходов, соответствующие данному решению, требуемый уровень ограничений, то есть каждый раз решать систему уравнений (1).

Ввиду того, что в обоих случаях практически невозможно обеспечить полный перебор параметров модели диагностики, можно говорить только о получении субоптимального решения.

Исключения этого недостатка (хотя в инженерных расчетах вполне приемлемы получаемые субоптимальные решения) можно добиться сведением задач на условный экстремум к задачам безусловной оптимизации с помощью методов обобщенных множителей Лагранжа и штрафных функций [2, 3]. Алгоритм сведения для марковских моделей подобен алгоритму Джевелла-Ховарда, модифицированному В.В. Блаженковым для условной оптимизации полумарковских моделей [4]. Для условной оптимизации марковских моделей метод обобщенных множителей λ_m Лагранжа применяется в виде минимизации целевой функции Φ вида

$$\Phi\left(\overline{\Lambda},\overline{X}\right)=g\left(\overline{X}\right)+\sum_m \lambda_m\cdot\left[C_m\left(\overline{X}\right)\right]_-^2, \qquad (2)$$

где $\overline{X}$ – вектор параметров модели;
m – вариант параметров модели;
g – полный ожидаемый доход:

$$g=q_i+\sum_{j=1}^{N} a_{ij}\cdot V_j \qquad (3)$$

где V_j – относительный вес j-го состояния;
q_i – непосредственно ожидаемый доход в i-м состоянии модели;
C_m – вспомогательная функция ограничений вида

$$\left[C_m\left(\overline{X}\right)\right]_- = \min\left[0,C_m\left(\overline{X}\right)\right]=\begin{cases} C_m\left(\overline{X}\right), & \text{если } C_m\left(\overline{X}\right)\le 0;\\ 0, & \text{если } C_m\left(\overline{X}\right)\succ 0.\end{cases} \qquad (4)$$

Как видно, критерии (2) отличаются от соответствующих критериев метода Р. Ховарда (3) наличием штрафных членов

$$\sum_m \lambda_{im}\cdot\left[C_m\left(\overline{X}\right)\right]_-^2,$$

а многомерная задача максимизации функции Лагранжа (2) превращается в серию задач максимизации частных критериев малой размерности.

При медленной сходимости процесса целесообразно увеличить соответствующие множители λ_m. Для выбора порядка величин λ_{im} и последующего их уточнения можно использовать следующую приближенную зависимость

$$\lambda_{im}\cong\left|\frac{g_i^{\max}(\overline{X_i})-g_i^{\min}(\overline{X_i})}{[C_m^{\max}(\overline{X_i})]_-^2-[C_m^{\min}(\overline{X_i})]_-^2}\right|, \qquad (5)$$

Однако в ряде случаев большие значения множителей λ_m приводят к вычислительным трудностям. Устранения этого недостатка можно добиться путем введения в целевую функцию параметра сдвига θ_m.

$$\Phi(\overline{\Lambda},\overline{X},\overline{\theta})=g(\overline{X})+\sum_m \lambda_m\cdot[C_m(\overline{X})-\theta_m]_-^2, \qquad (6)$$

где $\overline{\Lambda}$ и $\overline{\theta}$ – векторы неопределенных множителей Лагранжа и неопределенных параметров сдвига соответственно:

$$\overline{\Lambda}=\{\lambda_1,\lambda_2,\ldots\lambda_S\};$$
$$\overline{\theta}=\{\theta_1,\theta_2,\ldots\theta_S\};$$
$$[C_m(\overline{X})-\theta_m]_- = \min[0,C_m(\overline{X})-\theta_m]=$$
$$=\begin{cases} C_m(\overline{X})-\theta_m, если C_m(\overline{X})-\theta_m\le 0;\\ 0, если C_m(\overline{X})-\theta_m>0.\end{cases} \qquad (7)$$

За счет введения параметра сдвига θ_m ужесточаются условия задачи условной оптимизации до

$$C_m(\overline{X})>\theta_m,$$

благодаря чему множители λ_m могут иметь относительно небольшую величину.

Целевая функция задачи с учетом (6) преобразуется в эквивалентную ей систему уравнений

$$\Phi=q_i+\sum_{j=1}^{N} a_{ij}\cdot V_j+\sum_m \lambda_m\cdot[C_m(\overline{X})-\theta_m]_-^2. \qquad (8)$$

Как видно, критерии (8) отличаются от соответствующих критериев (2) только штрафными членами, а именно наличием в модифицированной функции Лагранжа параметра сдвига θ_m. Это отличие несколько усложняет алгоритм решения задачи (*рисунок 1*) за счет того, что после завершения контроля итераций (внутренняя итерация) осуществляется регулировка вычислительного процесса (внешняя итерация): если все

$$C_m(\overline{X})=0,$$

решение задачи закончено, в противном случае, для тех m, при которых эти условия не выполнены, уточняются параметры по формуле

$$\theta_m=\theta_m-\max(C_m,\theta_m) \qquad (9)$$

и возвращаются к улучшению решения.

Таким образом, использование модифицированной функции Лагранжа позволяет решать задачи условной оптимизации параметров марковских моделей путем ее сведения к безусловной оптимизации.

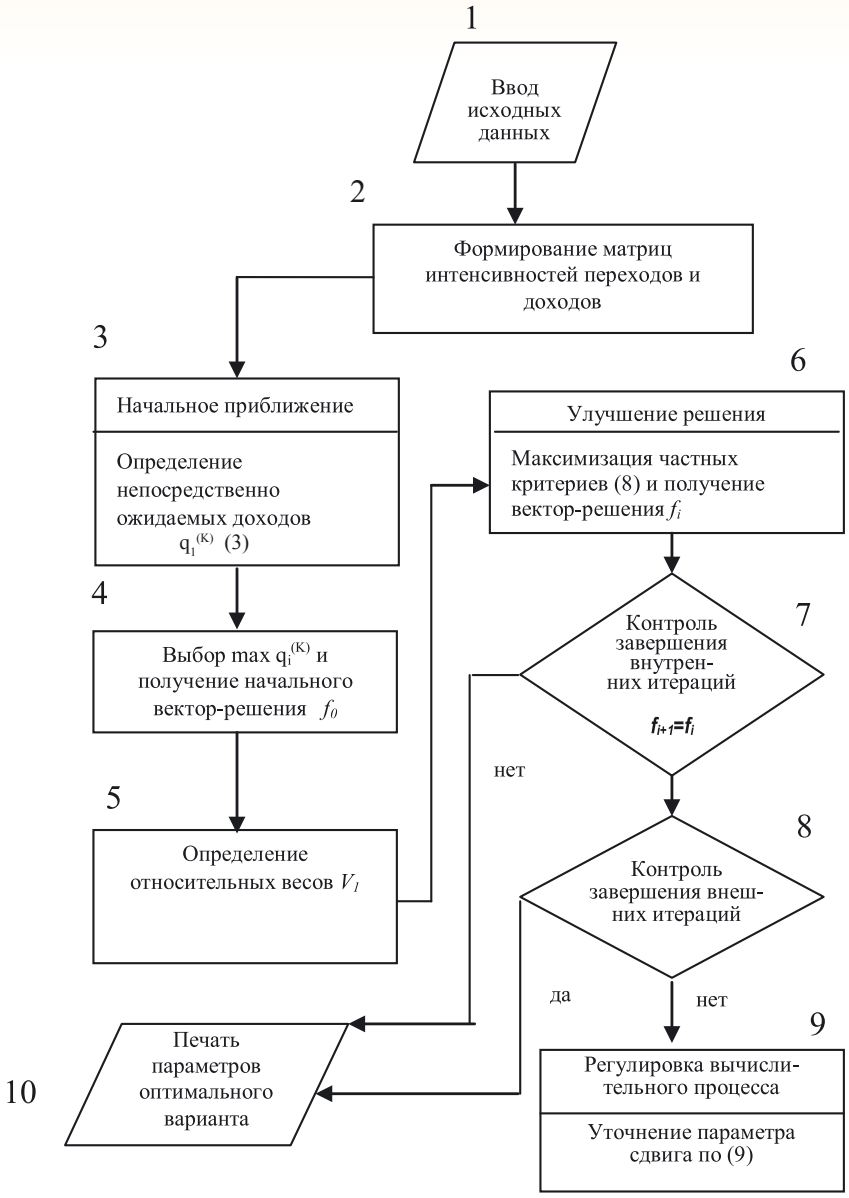


Рис. 1. Алгоритм условной оптимизации параметров модели диагностики ИУС с помощью модифицированной функции Лагранжа

Литература

1. Емелин Н.М. Анализ и синтез систем обеспечения надежности информационно-управляющих систем (марковский подход) // Известия Института инженерной физики, 2015. №4(38). С. 3-9.

2. Эверетт Х. Решение задач оптимального распределения ресурсов с помощью обобщенного метода множителей Лагранжа: Оптимальные задачи надежности / Под ред. Ушакова И.А. М.: Изд-во стандартов, 1966. 21 с.

3. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985. 509 с.

4. Блаженков В.В. Введение в прикладную теорию полумарковских моделей эксплуатации сложных систем. М: МО СССР, 1979. 70 с.

УДК 519.876

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНО–ЛИНГВИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ УЯЗВИМОСТИ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВАЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

THE USE OF PROBABILISTIC AND LINGUISTIC APPROACH TO SOLVING THE PROBLEM OF ASSESSING THE VULNERABILITY OF THE SYSTEM SECURITY OF IMPORTANT TECHNICAL OBJECTS

Сергей Григорьевич Данилюк
доктор технических наук, профессор
ведущий научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93

Александр Анатольевич Мурашко
начальник отдела лицензирования, специальной безопасности и надзорной деятельности
Департамент ядерной и радиационной безопасности организации лицензионной и разрешительной деятельности ГК «Росатом»
Адрес: 119017, Москва, Большая Ордынка, д. 24
Тел.: +7(499)949-29-16

Аннотация

В статье изложены основные положения вероятностно-лингвистического подхода к формализации экспертной информации о состоянии безопасности важных технических объектов. На основе анализа процесса нейтрализации системы обеспечения безопасности защищаемого объекта обоснованы ограничения и сформулирована задача оценки его уязвимости.

Ключевые слова: безопасность, уязвимость, вероятностно-лингвистический синдром, вероятностно-лингвистическая модель.

Summary

The article describes the main provisions of probabilistic and linguistic approach to the formalization of expert information on the security status of important technical facilities. Based on the analysis of the process of neutralization to ensure security of the protected object justified restrictions and formulated the task of assessing its vulnerability.

Keywords: security, vulnerability, probabilistic and linguistic syndrome, probabilistic and linguistic model.

Одним из важнейших направлений обеспечения безопасности является оценка состояния уязвимости важных технических объектов (ВТО) на всех этапах их жизненного цикла, и прежде всего в процессе эксплуатации. Рассмотрим проблему обеспечения безопасности ВТО при автономной эксплуатации в аспекте оценки степени его уязвимости к действиям персонала.

Процесс эксплуатации ВТО можно рассматривать как последовательность чередующихся различным образом этапов эксплуатации. При этом под этапом эксплуатации следует понимать отрезок времени, на котором та или иная совокупность эксплуатационных задач рассматривается как главная. С учетом этого различают следующие этапы эксплуатации: транспортирование; хранение; техническое обслуживание и др.

Техническое обслуживание, представляющее собой совокупность работ и эксплуатационно-технических мероприятий, направленных на поддержание исправности ВТО в процессе эксплуатации. В общем случае техническое обслуживание предполагает транспортирование ВТО и установку его на рабочее место, распаковку, осмотр, подготовку к проверке, устранение мелких повреждений, замену составных частей, доработку, проверку функциональных систем, приведение в установленную степень готовно-

сти, упаковку, оформление документов. Таким образом, техническое обслуживание объединяет значительный объем различных по своему характеру работ, выполняемых личным составом расчетов в течение достаточно продолжительного времени. Высокая степень потенциальной опасности ВТО, наличие полного спектра штатных средств воздействия на его системы, возможность интенсивного взаимодействия персонала расчетов в рамках выполнения штатных операций по контролю правильности функционирования элементов и систем обуславливают особую важность вопросов оценки и обеспечения безопасности проведения технического обслуживания как этапа общего процесса эксплуатации.

В связи с изложенным выше рассмотрим ***задачу разработки математической модели для оценки безопасности ВТО*** в аспекте уязвимости к несанкционированным действиям персонала в ходе проведения технического обслуживания.

Основные ограничения и допущения

В связи с этим введем ряд допущений и ограничений, основные из которых перечислены ниже.

1. В силу принципиального отсутствия статистических данных по отмеченной проблематике используем экспертный подход для получения первичной информации, представляющей оценки возможности отдельных простейших событий и факторов.

2. Рассматриваемым этапом процесса эксплуатации является техническое обслуживание ВТО с применением автоматизированной системы контроля (АСК) и стандартного технологического оборудования.

3. Тип (модель нарушителя) – внутренний нарушитель [7], т.е. лица из числа обслуживающего персонала (номера расчета по техническому обслуживанию), имеющие право доступа к ВТО, имеющие специальные знания о структуре, функциональном устройстве и конструктивном исполнении ВТО, способах взаимодействия ВТО и АСК, имеющие умения и навыки работы как с ВТО, так и в рамках системы технического диагностирования (СТД) ВТО (ВТО-связи-АСК).

4. Предполагаемая цель нарушителя – перевод ВТО в такое состояние, при котором он может являться потенциальным средством для достижения их интересов, противоречащих интересам национальной безопасности.

5. Множество функциональных элементов (ФЭ) системы обеспечения безопасной эксплуатации (СОБЭ) ВТО конечно и известно нарушителю (см. п. 3).

6. Для каждого ФЭ СОБЭ ВТО существует определенный набор способов воздействий на него с целью «нейтрализации», которая в зависимости от условий внешней для нарушителя ситуации может быть достижима в той или иной степени.

7. Под «нейтрализацией» функционального элемента СОБЭ ВТО понимается событие полной или частичной потери свойства обеспечивать защиту в результате механического, электрического, информационного или любого другого воздействия.

8. Временные ресурсы определяются временем проведения техническое обслуживание ВТО, а также возможно дополнительным временем, обусловленным получением неудовлетворительных результатов проверки исправности в системе ВТО – связи – АСК.

Формализация задачи

Принимая во внимание п. 1 основных ограничений и допущений, в качестве основы математической модели вероятностно-лингвистический подход, основы которого разработаны в [3] и уточнены в [4, 5]. Основу отмеченного подхода составляют понятия нечеткой и лингвистической переменной [6, 8, 9], а также вероятностно-лингвистического симптома [3, 4, 5].

В соответствии с изложенным выше можно утверждать, что имеется

1) множество экспертов («нарушителей»)

$$\mathrm{H} = \left\{ \eta_q \middle| \, q = \overline{1,Q} \right\},$$

в котором $h_q \in \mathrm{H}$ обозначает q-го эксперта ($q = \overline{1,Q}$) для оценки некоторых «простейших» событий или факторов, существенных для обеспечения безопасности ВТО на этапе технического обслуживания;

2) множество приемлемых целей, для достижения которых предполагается воздействие на отдельные функциональные элементы ВТО

$$\mathrm{X} = \left\{ \chi_m \middle| \, m = \overline{1,M} \right\},$$

в котором $c_m \in \mathrm{X}$ обозначает m-ю ($m = \overline{1,M}$) значимую с точки зрения «нарушителя» цель (см. п. 4), потенциально достижимую на этапе технического обслуживания по мнению хотя бы одного из экспертов $h_q \in \mathrm{H}$;

3) множество ФЭ системы обеспечения безопасности эксплуатации ВТО

$$E = \left\{ e_l \middle| \, l = \overline{1,L} \right\},$$

в котором $e_l \in E$ обозначает l-й ($l = \overline{1,L}$) функциональный элемент системы обеспечения безопасности эксплуатации ВТО (см. п. 5);

4) множество способов воздействий на функ-

циональные элементы системы обеспечения безопасности эксплуатации ВТО

$$U = \left\{ u_i \middle| i = \overline{1, I} \right\},$$

в котором $u_i \in U$ обозначает i-е ($i = \overline{1, I}$) воздействие (см. п. 6), как показано на *рисунке 1*, позволяющее по мнению хотя бы одного из экспертов $h_q \in H$ в ходе технического обслуживания нейтрализовать (см. п. 7) некоторый функциональный элемент (см. п. 5);

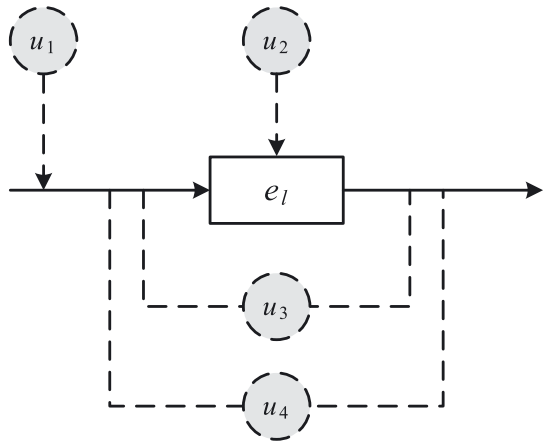


Рис. 1. Примеры воздействий по нейтрализации i-го ФЭ СОБЭ: u_1 – подача внешнего входного сигнала с заданными параметрами, подменяющего штатный сигнал; u_2 – внешнее воздействие, приводящее к задействованию ФЭ на операции с заданной выходной функцией; u_3 – образование непредусмотренной обходной связи, исключающей ФЭ из общей СОБЭ ВТО; u_4 – подключение внешнего функционального устройства, заменяющего ФЭ в общей СОБЭ ВТО

5) на основе анализа системы ВТО – связи – АСК экспертом («нарушителем») $h_q \in H$, $q = \overline{1, Q}$ могут быть определены актуальные последовательности ФЭ СОБЭ ВТО, нейтрализация которых обеспечивает достижимость m-й цели

$$E_m^q = \left\{ e_{l_k} \middle| k = \overline{1, K_m} \right\}_m^q, \quad m = \overline{1, M},$$

где e_{l_k} – l-й ФЭ СОБЭ ВТО, занимающий k-е место в m-й последовательности ФЭ СОБЭ ВТО;

6) с учетом $E_m^q = \left\{ e_{l_k} \right\}_m^q$, $q = \overline{1, Q}$, $m = \overline{1, M}$ могут быть определены возможные степени T_{ij} нейтрализации (см. п. 7) ФЭ СОБЭ ВТО, которые могут быть достигнуты в реальных условиях проведения процесса технического обслуживания при действующих организационно-технических мероприятиях, направленных на обеспечение правильности проведения технологического процесса обслуживания и проверки ВТО регламентированным эксплуатационным оборудованием в рамках временных ограничений на выполнение как отдельных операций с функциональными узлами ВТО, так и всего процесса обслуживания в целом, путем применения способа воздействия $u_i \in U$, $i = \overline{1, I}$.

Обоснование структуры и основных взаимосвязей разрабатываемой математической модели

При построении математической модели, предназначенной для оценки уязвимости СОБЭ к несанкционированным действиям персонала, проводящего техническое обслуживание ВТО, будем исходить из того, что некоторый «нарушитель», за которого при моделировании выступает эксперт, имеет определенные, заранее разработанные стратегии действий по нейтрализации элементов СОБЭ, определяемые приемлемыми для него целями. Следовательно, отдельно взятый эксперт «нарушитель» имеет не один, а несколько вариантов последовательностей ФЭ СОБЭ ВТО вида

$$E_m^q = \left\{ e_{l_k} \middle| k = \overline{1, K_m} \right\}_m^q, \quad m = \overline{1, M}.$$

При этом «важность» (приоритет) последовательности E_m^q определяется предпочтениями q-го эксперта на множестве его потенциальных целей

$$\left\{ \chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_m, \ldots, \chi_{M_q} \right\} = \tilde{\tilde{X}}_q,$$

где $\tilde{\tilde{X}}_q$ – нечетко упорядоченное множество целей q-го эксперта, для элементов c_m и c_f которого выполняется следующее условие:

$$\forall \chi_m, \chi_f \in \tilde{\tilde{X}}_q, \ \chi_m \succsim \chi_f \vdots m < f.$$

Очевидно, что высказанное выше соображение правомерно и в случае если цель единственная (множество целей содержит только один элемент), но для достижения которой у «нарушителя» разработаны основной (главный) и запасные (второстепенные) планы. В этом случае приоритет последовательностей E_m^q определяется первичностью плана достижения цели.

Будь то первый или второй случай, а особенно их комбинация, q-й эксперт может сформировать для каждой из $m \in \overline{1, M_q}$ целей N_{qm} последовательностей ФЭ СОБЭ ВТО

$$E_{m,n}^q = \left\{ e_{l_k} \middle| k = \overline{1, K_{m,n}} \right\}_{m,n}^q, m = \overline{1, M_q}, n = \overline{1, N_{q,m}}.$$

Тогда можно считать, что величина, получаемая согласно выражению

$$P(e_l) = \frac{\sum_{q=1}^{Q} \sum_{m=1}^{M_q} \sum_{n=1}^{N_{q,m}} \delta_{q,m,n}(e_l)}{Q \cdot M_q \cdot N_{q,m}}, \quad l = \overline{1, L},$$

где

$$\delta_{q,m,n}(e_l)=\begin{cases}1, & \text{если } e_l \in E^q_{m,n},\\ 0, & \text{если } e_l \notin E^q_{m,n},\end{cases}$$

является оценкой априорной вероятности выбора гипотетическим «нарушителем» l-го функционального элемента СОБЭ ВТО для его «нейтрализации».

Вероятности $P(e_l)$, $l=\overline{1,L}$ не учитывают ни важность, ни способ, ни способ достижения поставленных целей «нейтрализации» всей СОБЭ ВТО. Между тем процесс «нейтрализации» СОБЭ ВТО в каждом конкретном случае по своей сути представляет последовательность физических экспериментов, конечный исход которого заранее непредсказуем, т.е. случаен. Последовательность воздействий

$$\left\{u_1,u_2,...,u_k,...,u_{K_{m,n}}\right\},$$

направлена на смену состояний СОБЭ ВТО

$$\left\{\tilde{s}_1,\tilde{s}_2,...,\tilde{s}_k,...,\tilde{s}_{K_{m,n}}\right\},$$

где $\tilde{s}_k$ – состояние s_k СОБЭ ВТО, которое для лиц, противоборствующей «нарушителю» стороны определено нечетко, поскольку им не известно, насколько успешным оказалось u_k воздействие «нарушителя» на элемент СОБЭ ВТО, выбранный на k-м шаге последовательности его действий.

Состояние СОБЭ в таком случае следует рассматривать как подверженное изменению в процессе ее «нейтрализации» свойство, характеризующее уровень возможности демонстрации «нарушителем» видов опасности ВТО в условиях проведения технического обслуживания или возможности проявления таковых после него.

Тогда под «нейтрализацией» СОБЭ следует понимать процесс целенаправленного изменения на основе текущей информации параметров и структуры системы с целью достижения требуемой цели. Универсальным средством представления объектов управления являются управляемые случайные процессы, задаваемые семейством условных распределений вероятностей, зависящих от управления.

Пусть $S=\{s\}$ – фазовое пространство состояний СОБЭ ВТО, элементами которого являются s, а $U=\{u\}$ – пространство воздействий на нее, связанные общей целью. Поскольку успешность «нейтрализации» СОБЭ ВТО зависит от множества факторов, имеющих стохастический характер, математически динамика ее состояния может быть отражена случайным векторным процессом $s(t)$. Отдельная эволюция СОБЭ ВТО во времени t в этом случае может быть отражена в виде последовательности $s_1, s_2, \ldots, s_t, \ldots$. Тогда при дискретном времени процессу $s(t)$ в пространстве последовательностей $(s_1, s_2, \ldots, s_t, \ldots)$ сопоставлена некоторая мера, которая может быть задана согласованным семейством конечномерных распределений

$$P_{t_1,...,t_{K_{m,n}}}\left(s_1,...,s_{K_{m,n}}\right)=P\left(s_{t_k}\in S^q_{m,n}\right),$$

где $K_{m,n}\geq 1$; $t_1<t_2<\ldots<t_{K_{m,n}}$; S_k – подпространство S ($S_k\in S$), характеризующим в каждый момент времени t вероятность события $s(t_k)\in S_k$.

Если фазовое пространство S состояний системы и управляющих воздействий U дискретны, то можно в этом пространстве построить распределение в системе условных мер

$$P\left\{s_{t_k}\in S_k \mid s_1,u_1,s_2,u_2,\ldots,s_{k-1},u_{k-1},t\right\}=$$
$$=p_k(t)\left(S_k \mid s_1,s_2,\ldots,s_{k-1};u_1,u_2,\ldots,u_{k-1}\right);$$
$$P\left\{u_{t_k}\in U_k \mid s_1,u_1,s_2,u_2,\ldots,s_{k-1},u_{k-1},s_k,t\right\}=$$
$$=q_k(t)\left(U_k \mid s_1,s_2,\ldots,s_k;u_k,u_2,\ldots,u_{k-1}\right),$$

где $p_k(t)$ – условное распределение траекторий случайного процесса $s(t)$ изменения состояний СОБЭ ВТО в момент времени t;
$q_k(t)$ – условное распределение воздействий $u(t)$ «нарушителя» в момент времени t;
S_k – пространство траекторий случайного процесса $s(t)$ изменения состояний СОБЭ ВТО;
U_k – пространство воздействий $u(t)$, доступных для «нарушителя» на k-м шаге «нейтрализации» СОБЭ ВТО.

Условное распределение $q_k(t)$ воздействий $u(t)$ в момент времени t_k будет называться правилом выбора воздействия «нарушителем». В общем случае это есть условное распределение вероятностей

$$q_k(t)=Q_k\left(U_m \mid (s_1,...,s_k),(u_1,...,u_{k-1})\right),\quad U_m\in U,\quad t\geq 1$$

которое подчинено условию – при каждом $U_m\in U$ функция

$$Q_k(U_m \mid (s_1,\ldots,s_k),(u_1,\ldots,u_{k-1}))$$

является измеримой по совокупности последовательности состояний СОБЭ ВТО и соответствующей последовательности выбора «нарушителем» воздействий для ее «нейтрализации»

$$((s_1,\ldots,s_k),(u_1,\ldots,u_{k-1})).$$

Правило выбора управления должно указывать, какое из воздействий $u_i\in U$, $i=\overline{1,I}$, следует выбрать в состоянии s_k на основании предшествующей последовательности состояний СОБЭ ВТО и воздействий:

$s_1, u_1, s_2, u_2, \ldots, s_{k-1}, u_{k-1}, s_k$.

Принимая во внимание то, что стратегии реализация воздействий на элементы СОБЭ ВТО определяются «нарушителем» заблаговременно на основании имеющихся у него знаний и опыта, а не на основании статистических данных успешности аналогичных действий, а также то, что оценка состояний СОБЭ осуществляется им фактически органолептическим методом, следует сделать два вывода, важных для последующей разработки математической модели.

Первый вывод состоит в том, что основная природа неопределенности информации, формализуемой в рамках разрабатываемой модели носит субъективно окрашенный характер, поскольку источником информации является эксперт, со своими знанием и опытом потенциального «нарушителя».

Второй важный вывод – хотя теоретически выбор очередного воздействия на СОБЭ ВТО зависит от всей предыстории состояний и воздействий, но практически существенным является то, какие воздействия доступны для «нейтрализации» очередного e_{l_k} ФЭ СОБЭ ВТО, занимающего k-е место в m-й последовательности ФЭ СОБЭ ВТО. Таким образом, важным является оценка условных вероятностей событий вида

$$\left\{\left(u_i = T_{ij}\right)/e_l\right\},$$

состоящих в том, что применение «нарушителем» воздействия $u_i \in U$ для «нейтрализации» функционального элемента e_l приведет к результату T_{ij}. Оценку возможности указанного события с учетом обоснованных ранее ограничений и допущений целесообразно реализовать на основе экспертного опроса. Полученная при этом субъективная вероятностная оценка

$$p_{ij}^{ql} = \widetilde{P}_q\left\{\left(u_i = T_{ij}\right)/e_l\right\},$$

является оценкой q-го эксперта степени «нейтрализации» функционального элемента e_l СОБЭ ВТО путем воздействия $u_i \in U$.

Следует особо подчеркнуть, что субъективность, а, следовательно, и нечеткость вероятностной оценки p_{ij}^{ql} определяется природой источника первичной информации, которым выступает эксперт. При этом условный характер оценки p_{ij}^{ql} относительно заданного функционального элемента e_l является следствием того, что стратегия

$$E_{m,n}^{q} = \left\{e_{l_k} \,\middle|\, k = \overline{1, K_{m,n}}\right\}_{m,n}^{q}$$

строится заблаговременно, исходя из имеющихся знаний организации СОБЭ, особенностей функционирования систем ВТО, а также знаний и опыта организации и проведения работ при техническом обслуживании.

С учетом всего изложенного выше, общую характеристику возможности «нейтрализации» функционального элемента e_l СОБЭ ВТО применением воздействий $u_i \in U$ можно выразить в форме вероятностно-лингвистического синдрома его уязвимости, который в общем случае представляет собой следующее выражение:

$$\widetilde{v}_q(e_l) = \left\{\left\langle\left\langle p_{11}^{ql}/T_{11}^{ql}\right\rangle,\ldots,\left\langle p_{1J_1}^{ql}/T_{1J_1}^{ql}\right\rangle/u_1\right\rangle,\ldots,\right.$$

$$\left.\left\langle p_{I1}^{ql}/T_{I1}^{ql}\right\rangle,\ldots,\left\langle p_{IJ_I}^{ql}/T_{IJ_I}^{ql}\right\rangle/u_I\right\rangle\right\},$$

где применены ранее введенные и определенные обозначения (e_l, u_i, p_{ij}^{ql}, T_{ij}^{ql}). тогда совокупность вероятностно-лингвистических синдромов уязвимости $\widetilde{v}_q(e_l)$, $l = \overline{1, L}$, сформированных по результатам оценок q-го эксперта представляют собой общую характеристику уязвимости функционального элемента e_l СОБЭ ВТО к воздействиям $u_i \in U$.

Принимая во внимание то, что экспертом («нарушителем») $h_q \in$ H, $q = \overline{1, Q}$ могут быть определены оценки $p_{ij}^{ql} \in P$, $q = \overline{1, Q}$; $l = \overline{1, L}$; $i = \overline{1, I}$; $j = \overline{1, J_i}$, исходная модель оценки уязвимостей СОБЭ ВТО может быть представлена совокупностью Q вероятностно-лингвистических таблиц (ВЛТ) экспертной оценки уязвимости (ЭОУ) совокупности функциональных элементов СОБЭ ВТО [4] (*таблица 1*).

Как видно ВЛТ ЭОУ (*таблица 1*) представляет собой прямоугольную таблицу, строки которой соответствуют функциональным элементам СОБЭ ВТО, столбцы – воздействиям и их возможным результатам, а на пересечении строки e_l и столбца T_{ij}^{ql} указывается субъективная вероятностная оценка q-го эксперта вида $p_{ij}^{ql} = \widetilde{P}_q\left\{\left(u_i = T_{ij}\right)/e_l\right\}$.

Описанной выше математической модели соответствует кортеж вида

$$M_q = \{\text{H}, \text{X}, E, U, T, O, P_E, P_T\}_q,$$

где $P_E = \{P(e_l),\ l = \overline{1, L}\}$ – множество оценок априорной вероятности выбора «нарушителем» l-го функционального элемента СОБЭ ВТО для его «нейтрализации»

$$P_E = \{P(e_l)\};$$

P_T – множество стохастических оценок p_{ij}^{ql} q-го эксперта степени «нейтрализации» функционального элемента e_l СОБЭ ВТО путем воздействия $u_i \in U$

$$P_T = \left\{\widetilde{P}_q\left\{\left(u_i = T_{ij}\right)/e_l\right\}\right\};$$

при этом $\text{H} = \left\{\eta_q \,\middle|\, q = \overline{1, Q}\right\}$ – множество экспертов, привлекаемых для оценки некоторых «про-

Таблица 1

Вероятностно-лингвистическая таблица экспертной оценки уязвимости
функциональных элементов системы обеспечения безопасности эксплуатации ВТО

E	P	U													
		u_1				…	u_i				…	u_I			
		T_{11}	T_{12}	…	T_{1J_1}	…	T_{i1}	T_{i2}	…	T_{iJ_i}	…	T_{I1}	T_{I2}	…	T_{IJ_I}
e_1	$P(e_1)$	p_{11}^{q1}	p_{12}^{q1}	…	$p_{1J_1}^{q1}$	…	p_{i1}^{q1}	p_{i2}^{q1}	…	$p_{iJ_i}^{q1}$	…	p_{I1}^{q1}	p_{I2}^{q1}	…	$p_{IJ_I}^{q1}$
e_2	$P(e_2)$	p_{11}^{q2}	p_{12}^{q2}	…	$p_{1J_1}^{q2}$	…	p_{i1}^{q2}	p_{i2}^{q2}	…	$p_{iJ_i}^{q2}$	…	p_{I1}^{q2}	p_{I2}^{q2}	…	$p_{IJ_I}^{q2}$
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
e_l	$P(e_l)$	p_{11}^{ql}	p_{12}^{ql}	…	$p_{1J_1}^{ql}$	…	p_{i1}^{ql}	p_{i2}^{ql}	…	$p_{iJ_i}^{ql}$	…	p_{I1}^{ql}	p_{I2}^{ql}	…	$p_{IJ_I}^{ql}$
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
e_L	$P(e_L)$	p_{11}^{qL}	p_{12}^{qL}	…	$p_{1J_1}^{qL}$	…	p_{i1}^{qL}	p_{i2}^{qL}	…	$p_{iJ_i}^{qL}$	…	p_{I1}^{qL}	p_{I2}^{qL}	…	$p_{IJ_I}^{qL}$

стейших» событий или факторов, существенных для обеспечения безопасности ВТО на этапе технического обслуживания;
а $X=\left\{\chi_m \middle| m=\overline{1,M}\right\}$ – множество целей, значимых с точки зрения «нарушителя» и потенциально достижимых на этапе технического обслуживания по мнению хотя бы одного из экспертов $\eta_q \in H$; тогда O – оператор устанавливающий соответствие следующего вида:

$$\left(O: E\times U \xleftrightarrow{P_E} T\times P\right)_q, \quad q=\overline{1,Q}.$$

Такую математическую модель, которая может быть сформирована на основе формализации первичной диагностической информации в виде статистических или экспертных оценок, как это было показано выше, назовем вероятностно-лингвистической моделью оценки уязвимости q-м экспертом. Полный объем информации, полученный при реализации процедуры группового экспертного оценивания [1, 2], представляет собой Q вероятностно-лингвистических таблиц.

Сосредоточение в рамках вероятностно-лингвистической модели разнородной по своей природе и характеру информации требует разработки новых по своей сути методов ее обработки. Действительно, оценки p_{ij}^{ql} возможности событий $\left\{\left(u_i=T_{ij}\right)/e_l\right\}$ представлены в модели субъективной вероятностью экспертных оценок, воздействия $u_i \in U$ имеют детерминированный характер, оценка априорных вероятностей $P(e_l)$ выбора гипотетическим «нарушителем» l-го функционального элемента СОБЭ ВТО для его «нейтрализации» хотя и выглядит как статистическая, но основана на результатах анализа стратегий «нейтрализации» СОБЭ ВТО, которые выполняются экспертами.

Эффективность действий «нарушителя» при реализации некоторого варианта «нейтрализации» СОБЭ ВТО, соответствующего цели $c_m \in X$, может быть определена как произведение вероятностей успешной «нейтрализации» соответствующей последовательности функциональных элементов

$$E_m=\left\{e_{l_k} \middle| k=\overline{1,K_m}\right\}_m,$$

или в развернутом виде

$$E_m=\left\{e_{l_1}, e_{l_2}, \ldots, e_{l_k}, \ldots, e_{l_{K_m}}\right\}_m,$$

то есть в соответствии с выражением

$$P(E_m)=\prod_{k=1}^{K_m}\tilde{P}\left(e_{l_k}/u_i\right).$$

В том случае, если «нарушителем» предусмотрен не один, а несколько вариантов «нейтрализации» СОБЭ ВТО, каждый из которых может быть им выбран в зависимости от некоторых обстоятельств и реализован независимо друг от друга, то

$$P(E_m)=\sum_{n=1}^{N_m}P\left(E_{m,n}\right)\prod_{\substack{k=1,\\ k\neq n}}^{N_m}\left[1-P\left(E_{m,k}\right)\right]=$$

$$=\sum_{n=1}^{N_m}\frac{P\left(E_{m,n}\right)}{1-P\left(E_{m,n}\right)}\prod_{k=1}^{N_m}\left[1-P\left(E_{m,k}\right)\right].$$

С учетом того, что различные соответствующие цели $c_m \in X$ варианты «нейтрализации» СОБЭ ВТО могут и, как правило, предусматривают различные воздействия на функциональные элементы СОБЭ, то выражение для вычисления вероятности ее успешной «нейтрализации», т.е. вероятности достижения цели $c_m \in X$ можно записать в следующем виде:

$$P(E_m)=\sum_{n=1}^{N_m}\prod_{k=1}^{K_{m,n}}\tilde{P}\left(e_{l_k}/u_{i_n}\right),$$

где u_{i_n} – воздействие $u_i \in U$ на функциональный элемент $e_l \in E_m \subseteq E$, предусмотренное n-м вариантом «нейтрализации» СОБЭ ВТО.

Принимая во внимание вышесказанное о возможности применения к функциональному элементу e_l нескольких воздействий, определяемых различными вариантами «нейтрализации» СОБЭ ВТО, т.е. возможности событий вида

$$\left\{e_{l_k}\right\}=\bigvee_{n=1}^{N_m}\left\{e_{l_k}/u_{i_n}\right\},$$

можно переписать ранее полученное выражение в следующем виде:

$$P(E_m)=\sum_{n=1}^{N_m}\tilde{P}\left(e_{l_1}/u_{i_n}\right)\cdot\sum_{n=1}^{N_m}\tilde{P}\left(e_{l_2}/u_{i_n}\right)\cdot\ldots\cdot$$

$$\cdot\sum_{n=1}^{N_m}\tilde{P}\left(e_{l_k}/u_{i_n}\right)\cdot\ldots\cdot\sum_{n=1}^{N_m}\tilde{P}\left(e_{l_{K_{m,n}}}/u_{i_n}\right)$$

или

$$P(E_m)=\prod_{k\in\bigcup_{n=1}^{N_m}\left\{\overline{1,K_{m,n}}\right\}}\sum_{n=1}^{N_m}\tilde{P}\left(e_{l_k}/u_{i_n}\right)$$

где $\tilde{P}\left(e_{l_k}/u_{i_n}\right)$ – вероятностей успешной «нейтрализации» функционального элемента СОБЭ $e_l \in E_m \subseteq E$, который является k-м элементом одной из потенциально реализуемой «нарушителем» последовательностей «нейтрализации» СОБЭ ВТО

$$E_{m,n}=\left\{e_{l_k} \middle| k=\overline{1,K_{m,n}}\right\}_{m,n}, \quad n=\overline{1,N_{q,m}},$$

при помощи воздействия $u_{i_n} \in U_n \subseteq U$, где U_n – подмножество воздействий на функциональные элементы последовательности Em, n, предусмотренные n-м вариантом «нейтрализации» СОБЭ ВТО.

Оценки вида $\widetilde{P}\left(e_{l_k} / u_{i_n}\right)$ являются вторичной информацией, которая может положена в основу определения мер по совершенствованию всей СОБЭ ВТО. Таким образом, актуальной задачей является разработка процедур преобразования первичной информации, формализованной в рамках вероятностно-лингвистической модели с целью получения максимально «достоверных» оценок уязвимости функциональных элементов СОБЭ ВТО и последующего их использования в интересах ее совершенствования.

Литература

1. Выявление экспертных знаний (процедуры и реализации) / О.И. Ларичев, А.И. Мечитов, Е.М. Мошкевич, Е.М. Фуремс. М.: Наука, 1989. 128 с.

2. Гаврилова Т.А., Червинская К.Р. Извлечение и структурирование знаний для экспертных систем. М.: Радио и связь, 1992. 200 с.

3. Данилюк С.Г. Вероятностно-лингвистический метод диагностирования. Учебное пособие. Серпухов: МО РФ, 1998. 96 с.

4. Данилюк С.Г. Модели и алгоритмы формализации и обработки информации для экспертных систем поддержки поиска неисправностей на основе вероятностно-лингвистического метода диагностирования. Серпухов, 2013. 224 с.

5. Данилюк С.Г., Романенко А.Ю., Васильев В.И. Формализация и обработка диагностической экспертной информации в системе поддержки поиска неисправностей на основе понятия вероятностно-лингвистического симптома // Известия Института инженерной физики, 2009. №4(14). С. 43-45.

6. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 168 с.

7. Многокритериальный синтез систем безопасности особо важных объектов / В.А. Гапоненко, Ю.В. Астапенко, А.И. Бочаров. М.: ВА РВСН им. Петра Великого, 2015. 281 с.

8. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука, 1986. 312 с.

9. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений / А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьева и др. М.: Радио и связь, 1989. 304 с.



УДК 621.865

МЕТОДИКА ОРГАНИЗАЦИИ СКРЫТНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

THE TECHNIQUE OF THE ORGANIZATION CONCEALED MOVEMENT OF GROUND OBJECTS

Евгений Петрович Минаков
доктор технических наук, профессор
профессор кафедры управления сложными организационно-техническими системами космического назначения
Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13
Тел.: +7(911)734-95-28

Сергей Владимирович Суровикин
кандидат военных наук
соискатель кафедры оперативного искусства и тактики
Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13
Тел.: +7(981)742-47-65
E-mail: giviniv@yandex.ru

Аннотация

Представлены понятийный аппарат и постановки задач оценивания эффективности организации скрытного перемещения наземных объектов за счет выбора оптимальных маршрутов и путей их перемещения. В рамках установленных допущений и исходных данных установлены основные закономерности изменения вероятности обнаружения наземных объектов орбитальными средствами зондирования, предложен алгоритм организации скрытного перемещения наземных объектов.

Ключевые слова: наземный объект, скрытное перемещение, маршрут, маршрутный репер, зона информационного обеспечения движения, вероятность обнаружения.

Summary

The article presents conceptual apparatus and task estimation of efficiency of the organization secretly moving ground targets by choosing optimal routes and ways to move them. Within the framework of established assumptions and underlying data sets the basic patterns of change detection of land objects orbiting means stealth organization algorithm of moving ground targets.

Keywords: ground object, a secretive movement, itinerary, trip anchor, area traffic information management, probability of detection.

Эффективное применение орбитальных средств зондирования (ОСЗ) для обнаружения движущихся по поверхности Земли наземных подвижных объектов (НПО), потребность скрытия факта их перемещения при выполнении поставленных задач и ряд других причин делают актуальным решение задачи организации скрытного перемещения (ОСП), под которым понимается выбор на заданных множествах путей и маршрутов НПО, обеспечивающих минимизацию значений вероятности их обнаружения заданным множеством ОСЗ [1]. Принципиальная возможность ОСП НПО определяется разрывами по времени применения различных ОСЗ по одним и тем же областям поверхности Земли. На *рисунке 1* на прогнозной карте применения ОСЗ приведены покрытия пути из пункта А (директивное время начала движения НПО из ко-

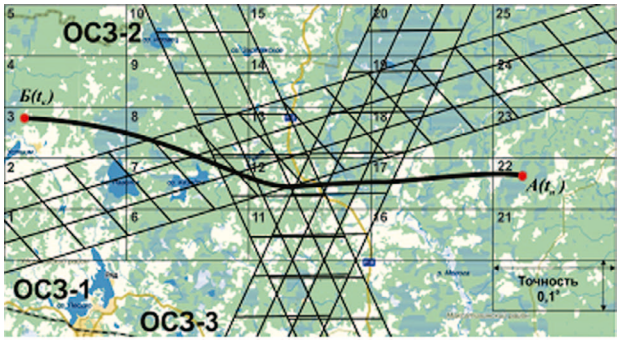


Рис. 1. Покрытие полосами обзора орбитальными средствами зондирования

Таблица 1

Данные о покрытии зонами обзора ОСЗ пути между пунктами *А* и *Б*

	$t_н$, чч,мм,сс	$t_к$, чч,мм,сс	Δd_{max}, км	t_{max}, чч,мм,сс
ОСР-1	03,18,34	03,32,19	53	03,24,13
ОСР-2	08,03,10	08,13,28	19	08,9,00
ОСР-3	08,54,08	09,04,31	24	08,59,07

торого 00 час. 00 мин. 00 сек. 01.11), в пункт Б (время прибытия НПО не позднее 14 час. 00 мин. 00 сек. 01.11), полосами обзора [2] трех космических аппаратов на указанном интервале времени в 14 часов.

Соответствующие этим ОСЗ данные о покрытии зонами их обзора пути между пунктами *А* и *Б* приведены в *таблице 1*, а графики изменения протяженности пути, покрытой их зонами обзора, представлены на *рисунке 2*.

В *таблице 1* через $t_н$ обозначено время начала покрытия пути зоной обзора ОСЗ, через $t_к$ – время начала покрытия пути зоной обзора ОСЗ, через Δd_{max} – максимальная часть пути, покрытая зоной обзора, через t_{max} – соответствующее время. Как видно из данных таблицы 1 и графиков *рисунка 2* между зонами обзора ОСЗ существуют значительные временные интервалы, которые могут быть использованы для движения НПО, не обнаруживаемого с использованием указанных средств. Приведенный пример, указывает на принципиальную возможность эффективной ОСП НПО. Констатируем отсутствие инструментария, обеспечивающего данными для ОСП НПО, что актуализирует необходимость разработки основ соответствующей теории, имеющей в качестве объекта исследования ОСП НПО, а предмета – закономерности оценивания соответствующей эффективности.

Формирование такой теории должно базироваться на аксиоматическом подходе, в рамках которого необходимо осуществить разработку понятийного аппарата и тезауруса, постановку задачи оценивания эффективности ОСП НПО, выявление основных закономерностей и формирование системы аксиом, разработку методологического аппарата и инструментов оценивания эффективности ОСП НПО. Основу такой теории должны составлять зонные пространственно-временные требования к моделированию применения ОСП [1].

Базовыми понятиями такой теории являются НПО, путь, маршрут, маршрутный репер, зона информационного обеспечения движения и пространственно-временная область (ПрВО).

Под *наземным подвижным объектом* в ней понимаются средства, способные с целью выполнения поставленных задач осуществлять движение в заданных областях на поверхности Земли.

Путь – геометрическое место точек положения НПО при движении из исходного в конечный пункт заданной области поверхности Земли.

Маршрут – совокупность данных об участках и/или точках пути между его начальным и конечным пунктами и временах их прохождения НПО.

Маршрутный репер – совокупность данных о пространственном и временном положении характерных (м.б. виртуальных) точек маршрута НПО.

Под *зоной информационного обеспечения движения* (ЗИОД) понимается ПрВО на поверхности Земли, включающая путь НПО, в пределах ко-

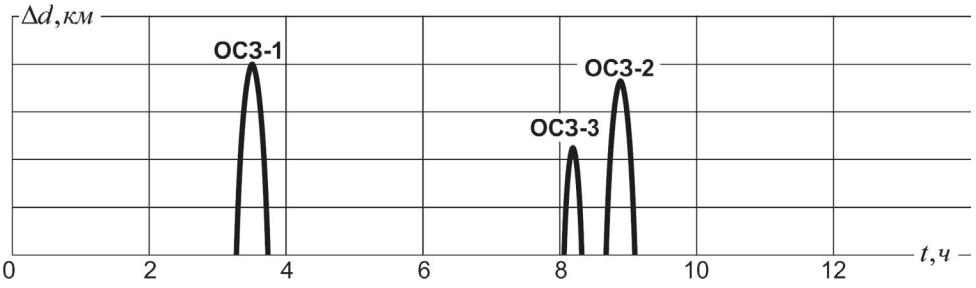


Рис. 2. Графики зависимости участка пути, покрытого зонами обзора ОСР

торой может быть получена информация о перемещении НПО с использованием ОСЗ [3]. В свою очередь, *пространственно-временной областью* является любая область, расположенная на поверхности Земли, в ее воздушном или космическом пространстве, задаваемая геометрическим местом точек положения и времен их существования.

В соответствии со сделанными определениями *маршрутом движения* НПО является множество M_{li}, являющееся результатом декартова произведения двух множеств A_{li} и T_{li}

$$M_{li} = A_{li} \times T_{нli} = \{(a_{1i\mu}, t_{н1i\mu})\}$$

где $A_{li} = \{a_{1i\mu}\}$ – множество положений маршрутных реперов;
$T_{нli} = \{t_{н1i\mu}\}$ – множество времен начала прохождения НПО маршрутных реперов;
$l = 1(1)L$ – идентификатор пути прокладки маршрута НПО;
i – идентификатор маршрута на l-м пути;
μ – идентификатор маршрутного репера.

Каждому li-му маршруту сопоставляется векторный показатель эффективности

$$Q_{li} = \langle W_{li}, R_{li}, T_{li} \rangle,$$

где W_{li} – вектор показателей результативности движения НПО;
R_{li} – вектор ресурсных затрат на прохождение НПО маршрута;
T_{li} – вектор операционных затрат НПО на прохождение маршрута.

Одной из компонент вектора W_{li} является вероятность обнаружения перемещения НПО по li-му маршруту с использованием ОСЗ – P_{lio}, которая зависит от маршрута движения НПО:

$$P_{lio} = P_{lio}(\{a_{1i\mu}, t_{н1i\mu}); B\}), D_j \in \{D_j^{доп}\}, \quad (1)$$

где B – множество баллистических и тактико-технических характеристик ОСЗ;
$\{D_j^{доп}\}$ – множество допустимых значений, которые может принимать на маршруте D_j-я характеристика НПО.

Оптимальным маршрутом считается тот, для которого указанная вероятность минимальна, т.е.

$$P_{lio} \to \min_{M_{li}}.$$

Для определения минимума этой функции необходимо найти точки, подозрительные на экстремум, т.е. решить систему нелинейных уравнений

$$\begin{cases} \partial P_{lio} / \partial a_{1i\mu} = 0; \\ \partial P_{lio} / \partial t_{н1i\mu} = 0, \end{cases}$$

что приводит к решению трансцендентных уравнений и требует применения численных методов [2].

Для получения аналитического решения примем ряд упрощений.

Во-первых, можно считать, что реперы пространственно могут располагаться вдоль пути только в определенных местах, т.е. множество A_{li} априорно задано. В этом случае

$$P_{lio} = P_{lio}(\{t_{н1i\mu}, B, A_{li})\}), D_j \in \{D_j^{доп}\}.$$

Если можно представить, что путь НПО проходит по квадратам (прямоугольникам), на которые разбита топографическая карта заданной области перемещения НПО, то реперы могут располагаться на границах этих квадратов в точках входа в них пути. Несмотря на значительное упрощение, для нахождения точек, подозрительных на экстремум, необходимо решить систему нелинейных уравнений

$$\partial P_{lio} / \partial t_{н1i\mu} = 0,$$

что, как и в общем случае, ведет к решению трансцендентных уравнений и требует применения численных методов.

Вторым этапом упрощения можно считать переход от множества $\{t_{н1i\mu}\}$ мощности континуума к дискретному конечному множеству $\{t_{н1i\mu}\}$. При указанной схеме расположения реперов это означает, что каждому из них может быть сопоставлено определенное число времен (или время) их прохождения НПО.

Сделанные упрощения позволяют перейти к конечному дискретному множеству возможных маршрутов НПО по определенному пути. В случае применения ОСЗ для обнаружения перемещения НПО соответствующий факт может установлен как результат покрытия квадратов, на которые разбита топографическая карта и образующих ЗИОД, их полосами обзора [2]. Однако следует иметь в виду, что решение задачи о их покрытиях требует перехода к так называемым сферическим «квадратам» («прямоугольникам») и применения сферической тригонометрии для оценивания их покрытия полосами обзора ОСЗ.

Сделанные упрощения позволяют определить состав исходных данных для планирования и оценивания эффективности ОСП НПО в условиях применения ОСЗ (*таблица 2*).

В *таблице 2* через ψ_{j1}, ψ_{j2}, ψ_{j3}, ψ_{j4}, обозначены широта, а через λ_{j1}, λ_{j2}, λ_{j3}, λ_{j4} – долгота j-го «квадрата» ЗИОД (нумерация вершин «квадрата» идет с левого нижнего угла, для которого ψ_{j1}, λ_{j1} – минимальны для Северного полушария Земли, «по часовой стрелке»).

В дополнение к сделанным упрощениям на данном этапе решения задачи считается, что все «квадраты» имеют одинаковые угловые размеры

Таблица 2
Исходные данные для планирования и оценивания
эффективности ОСП НПО в условиях применения ОСЗ

№ п/п	Наименование	Размерность
1	Карта ЗИОД	–
2	Положение «квадратов» ЗИОД $\{(\psi_{j1}, \lambda_{j1}), (\psi_{j2}, \lambda_{j2}), (\psi_{j3}, \lambda_{j3}), (\psi_{j4}, \lambda_{j4})\}$	градусы
3	Время, отводимое на перемещение НПО	
	- начало – $T_н$	год, месяц, число, ч, мин
	- конец – $T_к$	год, месяц, число, ч, мин
4	Скорость совершения перемещения НПО - ΔV(t)	км/ч
5	Состав, баллистические и ТТХ ОСЗ	

по долготе и по широте $\Delta V(t)=\Delta V=const$, время движения НПО в пределах каждого «квадрата» одинаково и принимается равным

$$\Delta t \sim R_3 \cdot \arccos(\cos\Delta\lambda \cdot \cos\Delta\psi)/\Delta V, \qquad (2)$$

где $\Delta\lambda=\lambda_{j4}-\lambda_{j1}$=const – долготный размер «квадратов» ЗИОД; $\Delta\psi=\psi_{j2}-\psi_{j1}=const$ – широтный размер «квадрата»; $R_з$=6371 км – средний радиус Земли; в ходе перемещения НПО может либо двигаться со скоростью ΔV, либо стоять на границе последующего «квадрата» маршрута.

Если число «квадратов» по пути перемещения НПО – N, то минимальное время его перемещения составит $N\Delta t$. Очевидно, что требуемое перемещение может быть осуществлено, если $N\Delta t \le Tк-Tн$. Разница $\Delta t_{прв} = (T_к - T_н) - N \cdot \Delta t$ образует полный резерв времени (ПРВ), которым обладает НПО на перемещение из исходной в конечную точку пути и может быть израсходован на остановки НПО. В дальнейшем считается, что $\Delta t_{прв}$ может быть израсходован только на ожидание начала движения НПО перед «квадратом».

При принятых допущениях маршрут НПО может задаваться множеством упорядоченных пар

$$\{(n_{li1}, T_{nli1}); (n_{li2}, T_{nli2}); \ldots (n_{liN}, T_{nliN})\},$$

где n_{li} – номер j-го «квадрата» li-го маршрута;
T_{nlij} – время начала движения по j-му «квадрату» l_i-го маршрута:

$$T_{nlij} = \begin{cases} T_{nlij}, \text{если по } j\text{-му "квадрату" ПРВ не расходуется;} \\ T^*_{nlij} = T_{nj\mu} + \Delta t_{прв}, \text{ если по } j\text{-му "квадрату" расходуется ПРВ.} \end{cases}$$

При принятых допущениях граф вероятностей возможных маршрутов НПО по заданному пути можно представить в виде дерева, каждой дуге которого приписывается вероятность обнаружения НПО при движении по «квадрату» (*рисунок 3*), где «да» соответствует «принятию решения» о задержке перед движением по очередному «квадрату» на величину $\Delta t_{прв}$; «нет» – о движении по очередному «квадрату» без задержки, 1, 2, …, N – условный номер «квадрата» [5]. Общее число маршрутов НПО по заданному пути равно N.

Вероятности обнаружения НПО ОСЗ P_{lin} могут рассматриваться, как вероятности наступления независимых событий и подчиняются следующим закономерностей изменения:

1) в пределах любого интервала времени $[T_{нп}, T_{кп}]$ изменение вероятности обнаружения НПО в одном n-м пространственно-временном «квадрате» ЗИОД одним k-м ОСЗ – P_{nk} представляет собой вероятностную кумуляту – кривую накопления вероятности наступления последовательности случайных независимых событий, определяемую зависимостью [4]

$$P_{nk} = 1 - (1 - P_k)^{J_{nk}},$$

где $Pk=const$ – статистическая вероятность обнаружения НПО при ДЗ «квадрата»;
J_{nk} – число покрытий «квадрата» зоной обзора ОСЗ на интервале времени $[T_{нп}, T_{кп}]$.

2) в пределах любого интервала времени $[T_{нп}, T_{кп}]$ изменение вероятности обнаружения НПО группировкой ОСЗ представляет собой вероятностную кумуляту (зависимость 1 на *рисунке 4*)

$$\begin{aligned} P_{nk} &= 1 - ((1 - P_{n1}) \cdot (1 - P_{n2}) \ldots (1 - P_{nK}) \\ &= 1 - \prod_{k=1}^{K} (1 - P_{nk}) = 1 - \prod_{k=1}^{K} (1 - (1 - (1 - P_k)^{J_{nk}})) = \\ &= 1 - \prod_{k=1}^{K} (1 - P_k)^{J_{nk}}, \end{aligned} \qquad (3)$$

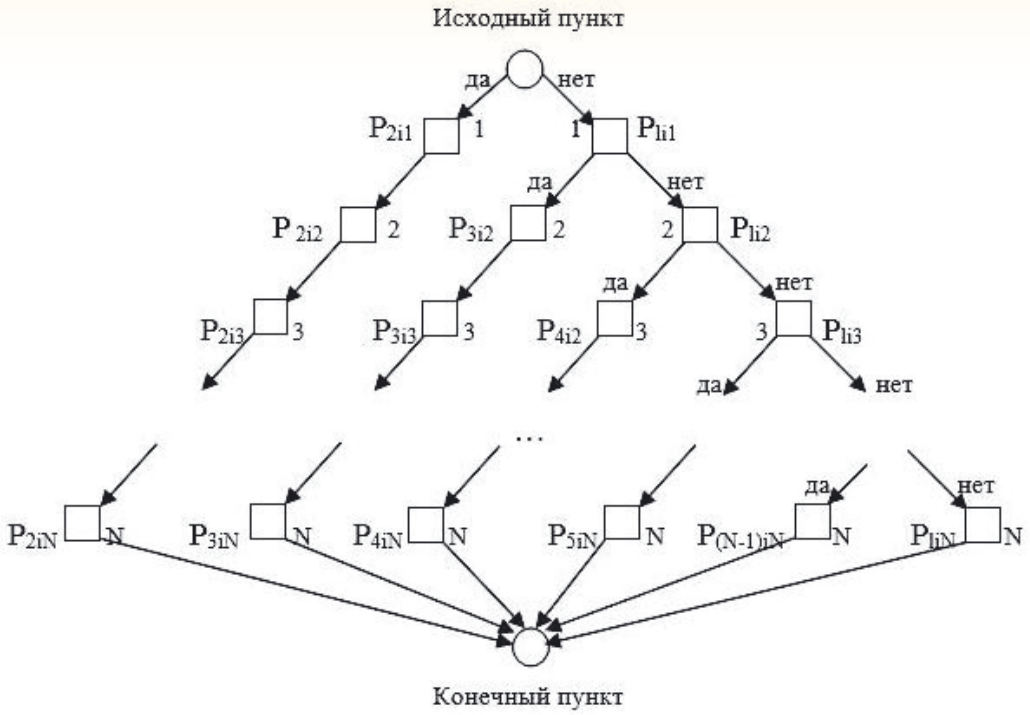


Рис. 3. Граф вероятностей возможных маршрутов НПО по заданному пути

где K – общее число ОСР, полосы обзора которых на интервале времени $[T_{нп},T_{кп}]$ покрыли n-й квадрат.

3) в пределах интервала времени $[T_н,T_к]$ изменение вероятности обнаружения НПО для совокупности N «квадратов» – P_N представляет собой полигон вероятностей обнаружения НПО – P_{nk} (зависимость 3 на *рисунке 4*);

4) вероятность обнаружения НПО в одном из N пространственно-временном «квадрате» маршрута на интервале $[T_н,T_к]$ представляет собой вероятностную кумуляту (зависимость 3 на *рисунке 4*).

Показатель эффективности противоспутникового маневра НПО за счет выбора маршрута на заданном пути может быть представлен в

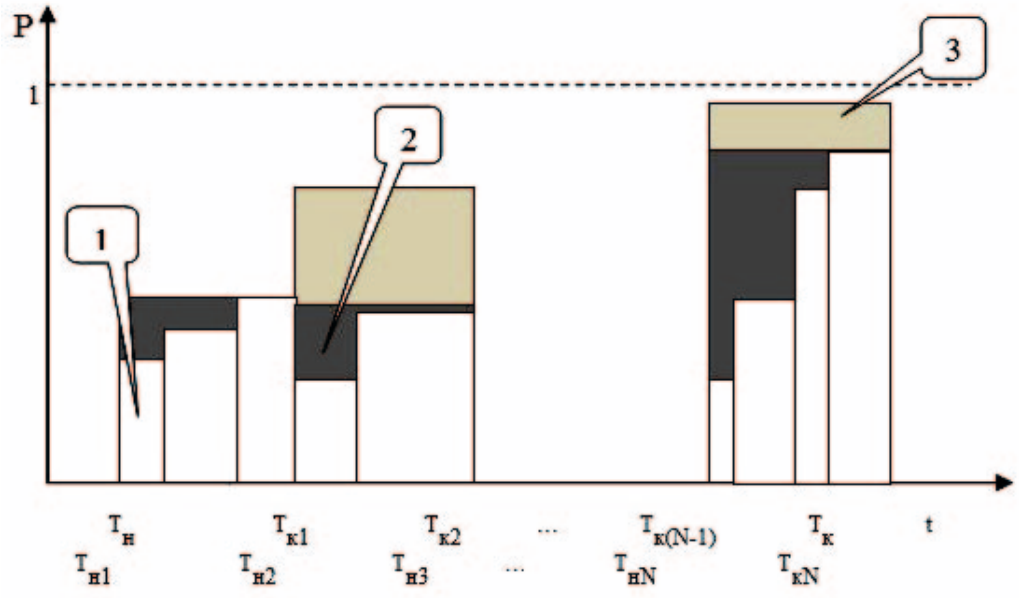


Рис. 4. Зависимости вероятности обнаружения НПО ОСЗ от времени

$$P = 1-(1-P_1)\cdot(1-P_2)...(1-P_i) = 1-\prod_{n=1}^{N}(1-P_i) = 1-\prod_{n=1}^{N}\left(1-(1-\prod_{k=1}^{K}(1-P_k)^{J_{nk}})\right) =$$

$$= 1-\prod_{n=1}^{N}\left(\prod_{k=1}^{K}(1-P_k)^{J_{nk}}\right) = 1-\left(\prod_{k=1}^{K}(1-P_k)^{J_{1k}}\right)\cdot\left(\prod_{k=1}^{K}(1-P_k)^{J_{2k}}\right)...\left(\prod_{k=1}^{K}(1-P_k)^{J_{Nk}}\right) =$$

$$= 1-(1-P_1)^{J_{11}}\cdot(1-P_1)^{J_{12}}...(1-P_k)^{J_{1K}}\cdot(1-P_1)^{J_{21}}\cdot$$

$$\cdot(1-P_2)^{J_{22}}...(1-P_k)^{J_{2k}}...(1-P_1)^{J_{N1}}\cdot(1-P_2)^{J_{N2}}...(1-P_k)^{J_{NK}} =$$

$$= 1-(1-P_1)^{J_{11}+J_{21}+...J_{N1}}\cdot(1-P_2)^{J_{12}+J_{22}+...J_{N2}}...(1-P_k)^{J_{1K}+J_{2K}+...J_{NK}} =$$

$$= 1-(1-P_1)^{\sum J_{n1}}\cdot(1-P_2)^{\sum J_{n2}}...(1-P_k)^{\sum J_{nK}}, \qquad (4)$$

виде отношения наилучшего по вероятностной мере к наихудшему маршруту этого пути, рассчитываемым по формуле (4)

$$Э_{псм} = \frac{1-P_r}{1-P_q} = (1-P_1)^{\sum J_{1ir}}\cdot(1-P_2)^{\sum J_{2ir}}...\frac{(1-P_k)^{\sum J_{kir}}}{(1-P_1)^{\sum J_{1ir}}}\cdot(1-P_2)^{\sum J_{2iq}}...(1-P_k)^{\sum J_{kiq}} =$$

$$= (1-P_1)^{\sum J_{1ir}-\sum J_{1iq}}\cdot(1-P_2)^{\sum J_{2ir}-\sum J_{2iq}}...(1-P_k)^{\sum J_{kir}-\sum J_{kiq}}.$$

При решении определения не только маршрута НПО, но и пути его перемещения, уместно рассматривать схему возможных путей НПО, графически представленную на рисунке 5. В соответствии с ней при перемещении НПО из исходного пункта *A* в конечный пункт *B* могут встречаться развилки, имеющие не более двух путей, а вдоль пути быть не более шести «квадратов». Из рисунка видно, что каждая развилка добавляет ровно один путь и общее число путей *M* имеет следующую зависимость от числа развилок *L-M=L+1*, а общее число маршрутов по заданному числу путей составляет величину *W=N(L+1)*.

Задача комплексной оптимизации пути и маршрута перемещения НПО имеет вид:

$$pz \to \min_{Z}, \text{ при ограничениях (1)}, \qquad (5)$$

где *Z=LM; L* – множество возможных путей НПО; *M* – множество возможных маршрутов НПО.

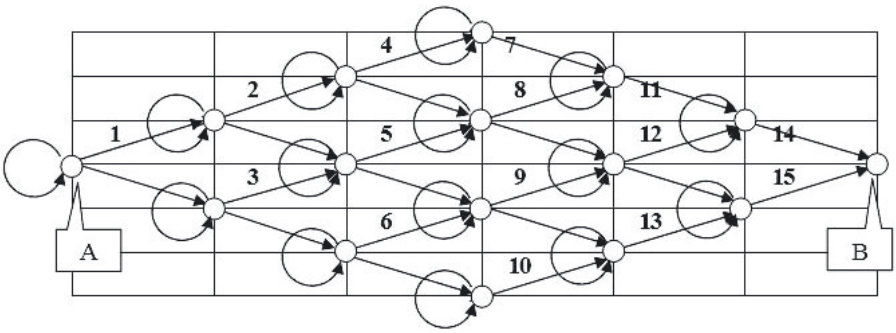


Рис. 5. Граф возможных путей НПО

В качестве метода решения сформулированной задачи предлагается использовать модифицированный метод ветвей и границ с критерием

$P_{s+1}z < P_f v$, для любых Z,V при $s+l > f$,

где P_{s+1}, P_{fv} – вероятностные кумуляты по $s+l$-му и f-му квадратам z-го и v-го путей, зависящие от маршрутов предшествующих этим квадратам.

При небольшом количестве возможных путей задача может быть решена путем полного перебора путей и маршрутов ПНО. В случае значительного количества развилок необходимо использовать специальный алгоритм, для использования которого необходимо знать:

1) вероятности обнаружения НПО с использованием ОСР при ожидании перемещения по квадрату – P_s (обозначены дугами), где s,$s=L(L)s$ – идентификатор маршрутного репера (маршрутный репер исходного пункта – A имеет идентификатор «1»; маршрутный репер конечного пункта – B имеет идентификатор «16»);

2) вероятности обнаружения НПО с использованием ОСР при перемещении по квадрату – P_{sf}, где s, f – идентификаторы маршрутных реперов на входе и выходе из квадрата соответственно;

3) матрицу инцидентности маршрутных реперов – G, которая для графа на *рисунке 5* имеет вид, представленный на *рисунке 6*:

Решение задач (1) и (5) требуют использования специального инструментария, основу которого составляют карты космической обстановки в ЗИОД [6] и программный комплекс по расчету вероятностей обнаружения НПО. Электронная карта расположения ЗИОД представляет собой отсканированную топографическая карта расположения ЗИОД с оцифрованной сеткой параллелей и меридианов, предназначенная для нанесения на нее комплексных данных о пространственных, временных и вероятностных характеристиках применения ОСЗ. Промежуточные результаты решения поставленной задачи получаются в маршрутных картах космической обстановки в табличной форме, которые в дальнейшем отображаются на электронных картах расположения ЗИОД.

Предлагаемые карты скрытного перемещения объектов НПО обеспечивают максимальную эффективность уклонения этих объектов от ОСЗ и могут быть рекомендованы лицам, принимающим решения при планировании скрытного движения НПО.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 6

Литература

1. Минаков Е.П. Сборник основных терминов, понятий и определений по вопросам оценивания эффективности и моделирования применения специальных организационно-технических систем / С.А. Мусиенко, И.Ш. Шафигуллин. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013.

2. Баринов К.Н. Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов / М.Н. Бурдаев, П.А. Мамон. М.: «Машиностроение», 1975.

3. Минаков Е.П. Зоны применения орбитальных группировок Военно-космических сил. СПб.: ВИКА имени А.Ф. Можайского, 1997.

4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 2005.

5. Волков В.Ф. Основы теории графов. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2006.

6. Минаков Е.П. Карты космической обстановки для оценивания эффективности применения космических аппаратов дистанционного зондирования поверхности Земли // Материалы IV Международной конференции «Микротехнологии и новые информационные услуги в авиации и космонавтике». СПб.: Изд. Политехнического университета, 2005.

УДК 004.9

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМ

DEVELOPMENT OF A METHOD OF LOCAL POSITIONING OF OBJECTS ON THE BASIS OF CORRELATION-EXTREME SYSTEMS ALGORITHMS

Олег Сергеевич Ассур
аспирант
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Адрес: 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 13, стр. 5
Тел.: +7(926)308-80-70
E-mail: oassur@yandex.ru

Аннотация

Предложено использовать корреляционные метрики расстояния, основанные на алгоритмах корреляционно-экстремальных систем, для оценки близости измерений в модифицированном методе k-ближайших соседей. Рассмотрен вопрос применимости разработанных метрик с точки зрения соответствия экспериментальных данных условиям корреляционного анализа. Показана эффективность применения предложенного подхода для решения задачи высокоточного локального позиционирования объектов.

Ключевые слова: позиционирование объектов, локальное позиционирование, методы позиционирования, точность позиционирования, корреляционно-экстремальные системы, метрики расстояния.

Summary

The use of correlation distance metrics based on algorithms of correlation-extremal systems is proposed for the estimation of proximity between measurements in the modified k-nearest neighbors' algorithm. The question of the applicability of the developed metrics is considered in terms of matching the correlation analysis conditions of the experimental data. The efficiency of the offered approach for solving the problem of highly accurate objects' local positioning is presented.

Keywords: object positioning, local positioning, positioning methods, positioning accuracy, correlation-extremal systems, distance metrics.

Введение

Системы локального позиционирования решают задачу определения местоположения объектов в местах, где применение глобальных систем навигации (GPS, ГЛОНАСС) невозможно или недопустимо. Такими местами являются помещения зданий, а также труднодоступные или загроможденные объекты, такие как шахты или складские зоны.

Главной характеристикой любой системы позиционирования является ее точность. При этом построение высокоточных систем локального позиционирования в реальных условиях их применения является сложной научной задачей.

На практике существуют два подхода к увеличению точности позиционирования. Первый заключается в разработке специальных мер кор-

рекции оценок координат в условиях действия внешних воздействий, определяемых условиями применения системы. Примером реализации данного подхода является использование плана помещения для блокирования маловероятных перемещений объекта, представленное в работе [1].

Второй подход основан на разработке новых или доработке существующих методов или технологий позиционирования для обеспечения работоспособности системы при всем многообразии внешних факторов. Примером применения этого подхода является совместное использование системы Wi-Fi позиционирования с системой инерциальной навигации, предложенное авторами работы [2].

В данной статье вопрос увеличения точности рассматривается со стороны доработки модифицированного метода *k*-ближайших соседей с использованием алгоритмов корреляционно-экстремальных систем (далее – КЭС), решающих похожую задачу в смежной области навигации и наведения летательных аппаратов.

Алгоритмы корреляционно-экстремальных систем

Корреляционно-экстремальные системы (КЭС) решают задачу определения местоположения объекта на основании корреляционного сравнения эталонного изображения (ЭИ), хранящегося в памяти системы, и текущего изображения (ТИ), получаемого системой в процессе ее функционирования. ЭИ и ТИ представляют собой изображения навигационных полей Земли [3]. В качестве полей навигации могут применяться различные физические поля Земли или их комбинации. Наиболее часто КЭС используют информацию, содержащуюся на топографических картах [4].

На практике функции, описывающие ТИ и ЭИ, часто бывают заданы таблично [5]

$$\boldsymbol{T} = [t_{ab}]_{(a,b)\in 1,T_1\times 1,T_2}$$

$$\boldsymbol{E} = [e_{hf}]_{(h,f)\in 1,E_1\times 1,E_2}, \quad (1)$$

где t_{ab}, e_{hf} – значения навигационного поля в точках (a, b) и (h, f) ТИ и ЭИ соответственно;
(T_1, T_2), (E_1, E_2) – размерности соответствующих изображений (ТИ и ЭИ).

В большинстве случаев оценку смещения ТИ относительно ЭИ производят при помощи одного из следующих алгоритмов [6, 7]:

1. Квадратичный разностный алгоритм с решающей функцией (РФ) вида

$$b_{cg}^{\text{РА}} = \sum_{a=1}^{T_1}\sum_{b=1}^{T_2}\left(t_{ab} - e_{a+c-1,b+g-1}\right)^2, \quad (2)$$

где $(c, g) \in 1, R_1 \times 1, R_2$, $\mathrm{R}_q = E_q - T_q + 1, q \in \overline{1,2}$.

2. Алгоритм с РФ в виде коэффициента взаимной корреляции ТИ и ЭИ (далее – корреляционный алгоритм)

$$b_{cg}^{\text{КА}} = \frac{\sum_{a=1}^{T_1}\sum_{b=1}^{T_2}(t_{ab}-\bar{t})(e_{a+c-1,b+g-1}-\bar{e}^{cg})}{\left[\sum_{a=1}^{T_1}\sum_{b=1}^{T_2}(t_{ab}-\bar{t})^2\sum_{a=1}^{T_1}\sum_{b=1}^{T_2}e_{a+c-1,b+g-1}-\bar{e}^{cg})^2\right]^{1/2}}, \quad (3)$$

где $\bar{t} = \frac{1}{T_1T_2}\sum_{a=1}^{T_1}\sum_{b=1}^{T_2}t_{ab}$,

$\bar{e}^{cg} = \frac{1}{T_1T_2}\sum_{a=1}^{T_1}\sum_{b=1}^{T_2}e_{a+c-1,b+g-1}$.

3. Алгоритм обобщенной фазовой корреляции с РФ вида

$$b_{cg}^{\text{АОФК}} = \frac{1}{\sqrt{W_1W_2}}\sum_{n=0}^{W_1-1}\sum_{m=0}^{W_2-1}\frac{S_t(n,m)S_e(n,m)}{|S_t(n,m)S_e(n,m)|^{1-L}}e^{j2\pi\left(\frac{c\cdot n}{W_1}+\frac{g\cdot m}{W_2}\right)}, \quad (4)$$

где i – мнимая единица;
W_1, W_2, L – параметры метода, а значения коэффициентов S_t и S_e рассчитываются по формулам

$$S_t(n,m) = \frac{1}{\sqrt{W_1W_2}}\sum_{u=0}^{W_1-1}\sum_{v=0}^{W_2-1}\tilde{t}_{u+1,v+1}e^{i2\pi\left(\frac{u\cdot n}{W_1}+\frac{v\cdot m}{W_2}\right)}, \quad (5)$$

$$S_e(n,m) = \frac{1}{\sqrt{W_1W_2}}\sum_{u=0}^{W_1-1}\sum_{v=0}^{W_2-1}\tilde{e}_{u+1,v+1}e^{i2\pi\left(\frac{u\cdot n}{W_1}+\frac{v\cdot m}{W_2}\right)} \quad (6)$$

где

$$\tilde{t}_{ab} = \begin{cases} t_{ab}, (a,b) \in 1, T_1 \times 1, T_2 \\ 0, (a,b) \notin 1, T_1 \times 1, T_2 \end{cases}, \tilde{e}_{fh} = \begin{cases} e_{fh}, (f,h) \in 1, E_1 \times 1, E_2 \\ 0, (f,h) \notin 1, E_1 \times 1, E_2 \end{cases}.$$

Параметры W_1, W_2 выбираются из условия исключения наложения спектров изображений ЭИ и ТИ: W1 ≥ R1, W2 ≥ R2. Параметр L определяет степень влияния амплитуд этих спектров: L ∈ [0, 1].

Индексы c_{extr} и g_{extr} экстремальных значений решающих функций каждого из алгоритмов являются оценкой смещения ТИ относительно ЭИ по осям абсцисс и ординат соответственно. Для разностного алгоритма производится численный поиск минимального значения $b_{cg}^{\text{РА}}$. Для корреляционного алгоритма и алгоритма обобщенной фазовой корреляции определяется максимум значений коэффициентов $b_{cg}^{\text{КА}}$ и $b_{cg}^{\text{АОФК}}$.

Разработка метода локального позиционирования объектов

Системы локального позиционирования, также как и КЭС, работают на основании статистического сравнения участка карты навигационного поля, зафиксированного со случайной погрешностью, с ее полным вариантом, сформированным заранее. Задача систем локального позиционирования заключается в определении положения объекта на основании поиска внутри

обучающей выборки одного или нескольких наборов измерений, наиболее «похожих» на текущие с точки зрения выбранного статистического критерия.

В терминах КЭС обучающая выборка является эталонным изображением (ЭИ), а набор данных об уровнях мощности беспроводных сигналов, измеренный объектом в данный конкретный момент – текущим (ТИ). В таком случае задачу систем локального позиционирования можно сформулировать как вычисление смещения ТИ (вектора текущих измерений) относительно ЭИ (внутри матрицы обучающей выборки).

Матрицы ТИ и ЭИ в системах локального позиционирования всегда задаются таблично. Элементы этих матриц содержат значения уровней принимаемой мощности (RSS, Received Signal Strength) сигнала беспроводных источников, используемых системой для определения положения объектов:

1. Текущее изображение – вектор текущих измерений:

$$\vec{Z}^{\text{ТИ}} = \left[RSS_j\right]_{j=\overline{1,M}}. \quad (7)$$

2. Эталонное изображение – обучающая выборка:

$$\boldsymbol{Z}^{\text{ЭИ}} = \left[RSS_{hj}\right]_{(h,j)=\overline{1,N}\,\text{x}\,\overline{1,M}}, \quad (8)$$

где N – размер обучающей выборки;
M – количество точек доступа, используемых системой.

Задача КЭС в рассматриваемой постановке совпадает с задачей модифицированного метода k-ближайших соседей, описанного в [8]. Это позволяет рассматривать решающие функции алгоритмов КЭС как метрики расстояния в факторном пространстве, формируемом значениями уровней мощности сигналов беспроводных источников. В таком случае выражения для расчета метрик расстояния между вектором текущих измерений $\vec{Z}^{\text{ТИ}}$ и h-ого набором измерений обучающей выборки $\vec{Z}_h^{\text{ЭИ}}$, получаемые из РФ алгоритмов КЭС, рассмотренных ранее (формулы 2-6), примут следующий вид:

1. Квадратичная разностная метрика

$$d_s^{\text{КР}}(\vec{Z}^{\text{ТИ}}, \vec{Z}_h^{\text{ЭИ}}) = \sum_{j=1}^{M}\left(Z_j^{\text{ТИ}} - Z_{hj}^{\text{ЭИ}}\right)^2. \quad (9)$$

2. Корреляционная метрика

$$d_s^{\text{К}}(\vec{Z}^{\text{ТИ}}, \vec{Z}_h^{\text{ЭИ}}) = \frac{\sum_{j=1}^{M}\left(Z_j^{\text{ТИ}} - \overline{\vec{Z}^{\text{ТИ}}}\right)\left(Z_{hj}^{\text{ЭИ}} - \overline{\vec{Z}_h^{\text{ЭИ}}}\right)}{\left[\sum_{j=1}^{M}\left(Z_j^{\text{ТИ}} - \overline{\vec{Z}^{\text{ТИ}}}\right)^2 \sum_{j=1}^{M}\left(Z_{hj}^{\text{ЭИ}} - \overline{\vec{Z}_h^{\text{ЭИ}}}\right)^2\right]^{1/2}} \quad (10)$$

где $\vec{Z}^{\text{ТИ}} = \frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M} Z_j^{\text{ТИ}}$, $\vec{Z}_h^{\text{ЭИ}} = \frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M} Z_{hj}^{\text{ЭИ}}$ – средние значения соответствующих векторов.

3. Метрика обобщенной фазовой корреляции (параметры W_1 и W_2 приняты равными N и M соответственно)

$$d_s^{\text{ОФК}}(\vec{Z}^{\text{ТИ}}, \vec{Z}_h^{\text{ЭИ}}) = \frac{1}{\sqrt{NM}}\sum_{n=0}^{N-1}\sum_{m=0}^{M-1}\frac{S_{\text{ТИ}}(m)S_{\text{ЭИ}}(n,m)}{|S_{\text{ТИ}}(m)S_{\text{ЭИ}}(n,m)|^{1-L}} e^{i2\pi\left(\frac{h\cdot n}{N}+\frac{m}{M}\right)} \quad (11)$$

где i – мнимая единица, а коэффициенты $S_{\text{ТИ}}(m)$ и $S_{\text{ЭИ}}(n, m)$ определяются согласно выражениям

$$S_{\text{ТИ}}(m) = \frac{1}{\sqrt{NM}}\sum_{v=0}^{M-1} Z_{v+1}^{\text{ТИ}} \cdot e^{i2\pi\frac{v\cdot m}{M}}. \quad (12)$$

$$S_{\text{ЭИ}}(n,m) = \frac{1}{\sqrt{NM}}\sum_{u=0}^{N-1}\sum_{v=0}^{M-1} Z_{u+1,v+1}^{\text{ЭИ}} e^{i2\pi\left(\frac{u\cdot n}{N}+\frac{v\cdot m}{M}\right)}. \quad (13)$$

Итоговая оценка координат объекта $\vec{X}(x, y)$ производится по формуле модифицированного метода k-ближайших соседей

$$\vec{X} = \frac{\sum_{n=1}^{k}(1/d_s(\vec{Z}^{\text{ТИ}}, \vec{Z}_n^{\text{ЭИ}}))\cdot \vec{X}_n}{\sum_{n=1}^{k}(1/d_s(\vec{Z}^{\text{ТИ}}, \vec{Z}_n^{\text{ЭИ}}))}, \vec{X}_n \in N_k, \quad (14)$$

где N_k – множество k-ближайших соседей;
$\vec{Z}^{\text{ТИ}}$, $\vec{Z}_n^{\text{ЭИ}}$ – соответственно векторы данных текущего измерения и n-ого соседа;
$\vec{X}_n(x_n, y_n)$ – координаты n-ого соседа;
d_s – одна из метрик расстояния между векторами измерений в факторном пространстве – (9), (10) или (11).

При этом множество k-ближайших соседей N_k определяется на основании расчета расстояний между вектором текущих измерений $\vec{Z}^{\text{ТИ}}$ и векторами измерений обучающей выборки $\vec{Z}_h$ согласно выражению

$$N_k = \underset{h=\overline{1,N}}{\operatorname{argmin}}\, d_s\left(\vec{Z}^{\text{ТИ}}, \vec{Z}_h\right) \setminus \vec{Z}_h \notin N_{k-1}, \quad (15)$$

где N – размер обучающей выборки.

Анализ полученных выражений (9-11) показывает, что:

1) Квадратичная разностная метрика является квадратом Евклидова расстояния;

2) Корреляционная метрика описывает расчет коэффициента взаимной корреляции.

Очевидно, что использование подобных метрик не является новым при использовании метода k-ближайший соседей в базовой области его применения (теория классификации). Тем не менее, применение корреляционной метрики при решении задачи локального позициони-

рования объектов ранее в литературе не рассматривалось.

В свою очередь разработка метрики обобщенной фазовой корреляции является новым научным результатом. Эта метрика позволяет оценивать статистическую близость наборов измерений не только по схожести их значений, но и на основании сравнительного анализа их спектров.

Экспериментальная оценка точности разработанного метода позиционирования

Применение разработанных метрик, как и любых других методов корреляционного анализа, возможно только при выполнении следующих условий [9]:

1. Достаточное количество наблюдений. На практике считается, что число наблюдений должно не менее чем в 5-6 раз превышать число факторов.

2. Нормальность закона распределения. Совокупность значений всех факторов должна подчиняться многомерному нормальному распределению.

3. Однородность значений. Исходная совокупность значений должна быть качественно однородной.

Для проверки данных условий, а также для анализа эффективности применения разработанных метрик на объекте испытаний была развернута система Wi-Fi позиционирования, состоящая из восьми источников сигнала.

В качестве объекта испытаний был выбран демонстрационный зал компании ООО «НИИ СОКБ», план которого представлен на *рисунке 1*.

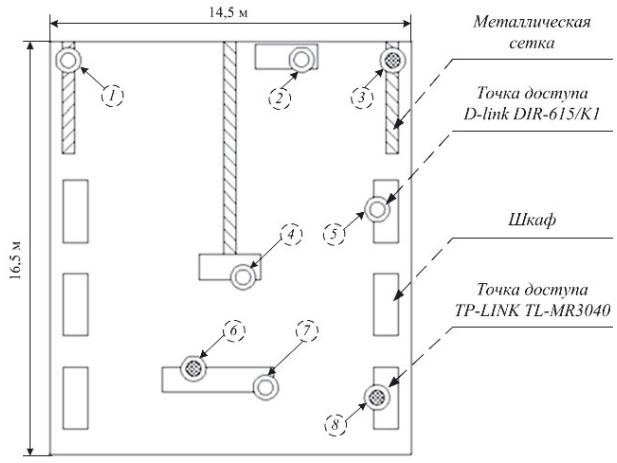


Рис. 1. План объекта испытаний

Как видно из *рисунка 1*, на объекте располагаются восемь источников Wi-Fi сигнала, а именно 5 точек доступа D-link и 3 точки доступа TP-LINK. Каждой точке доступа на рисунке присвоен порядковый номер, который будет использован в дальнейшем.

Обучающая выборка была сформирована на основании измерений уровней мощности Wi-Fi сигнала в опорных точках с шагом 3,5 метра. В каждой опорной точке производилось по пять измерений в четырех направлениях. Измерения производились с помощью смартфона LG Nexus 4, работающего под управлением операционной системы Android 4.4.

Тестовая выборка формировалась с использованием данных того же устройства, полученных при аналогичных измерениях с разницей сутки. При формировании тестовой выборки количество опорных точек измерений было расширено с помощью дополнительных точек.

Расположение опорных точек измерений обучающей и тестовой выборок на плане объекта испытаний изображено на *рисунке 2*.

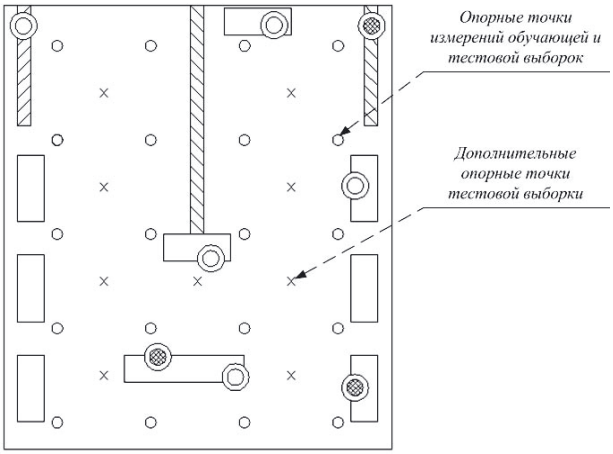


Рис. 2. Расположение опорных точек измерений

В результате измерений были получены выборки следующих размеров:

1) Обучающая выборка – 80 измерений: по 4 измерения в каждой из 20 основных опорных точек;

2) Тестовая выборка – 116 измерений: по 4 измерения в 20 основных и 9 дополнительных опорных точках.

Количество измерений в каждой из выборок превышает количество факторов (Wi-Fi точек доступа) не менее чем в 10 раз. На основании этого можно сделать вывод о достаточности экспериментальных наблюдений для применения методов корреляционного анализа.

Проверка нормальности распределения значений каждого из факторов осуществлялась с по-

Таблица 1

Вероятности получения вычисленных по экспериментальным данным значений критериев при справедливости гипотезы о нормальности

Точка доступа	Критерий			
	Обучающая выборка		Тестовая выборка	
	Колмогорова-Смирнова	Шапиро-Уилка	Колмогорова-Смирнова	Шапиро-Уилка
1	0,20	0,11	0,20	0,08
2	0,20	0,09	0,20	0,06
3	0,15	0,07	0,20	0,64
4	0,20	0,08	0,20	0,08
5	0,20	0,09	0,20	0,07
6	0,20	0,11	0,20	0,13
7	0,20	0,06	0,20	0,17
8	0,20	0,07	0,10	0,05

мощью критериев согласия Колмогорова-Смирнова и Шапиро-Уилка, относительно которых доказана их эффективность при проверке гипотезы нормальности для широкого класса альтернатив. В *таблице 1* для обучающей и тестовой выборок приведены значения вероятности получения вычисленных по экспериментальным данным значений критериев при справедливости проверяемой гипотезы.

Считается, что если указанная вероятность превышает уровень 0,05, то следует принять исходную нулевую гипотезу. Поскольку все приведенные в *таблице 1* вероятности больше 0,05, можно сделать вывод о нормальности функции распределения вероятностей факторов обучающей и тестовой выборок.

Качественная оценка однородности значений факторов производилась также путем построения, так называемых, «ящичных» диаграмм (box-whiskers diagram). Для обучающей и тестовой выборок такие диаграммы, где отображены средние значения и интервалы: среднее значение ± среднеквадратическое отклонение (СКО) и среднее значение ± 1.96·СКО, изображены на *рисунке 3*. Факторы (уровни мощности сигналов точек доступа) отмечены на рисунке как L_AP1-L_AP8 (обучающая выборка) и T_AP1-T_AP8 (тестовая выборка). Порядковые но-

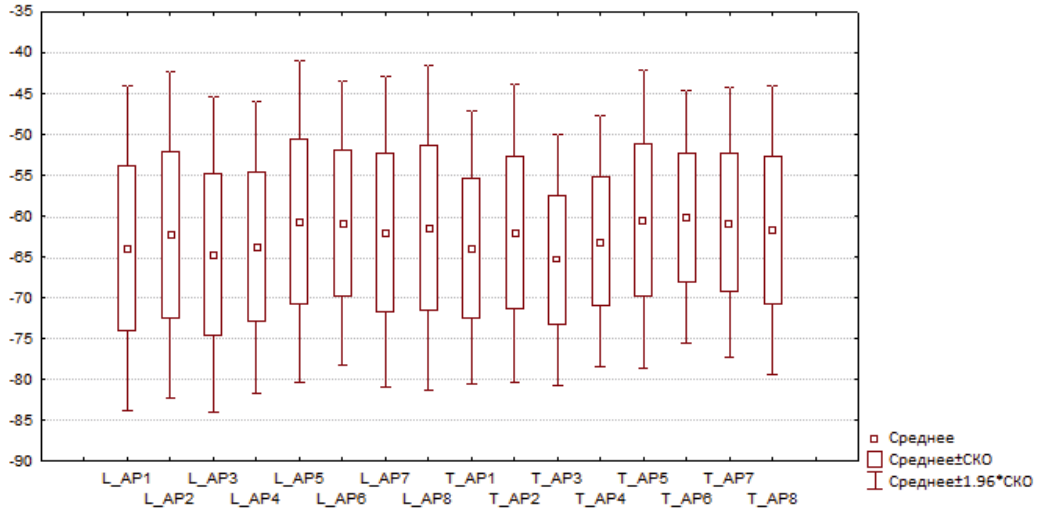


Рис. 3. Диаграмма размаха значений обучающей и тестовой выборок

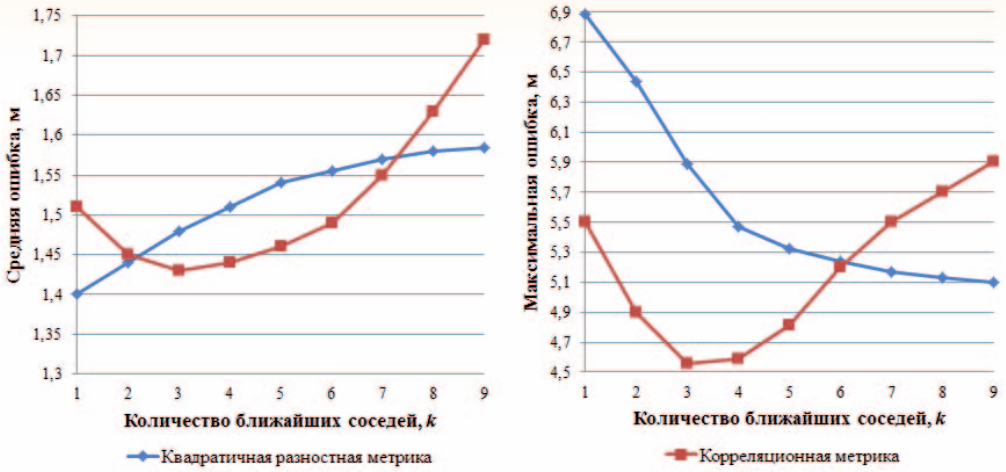


Рис. 4. Экспериментальная оценка точности
квадратичной разностной и корреляционной метрики

мера точек доступа указаны согласно *рисунку 1*. Отсутствие существенных отклонений значений факторов от их средних величин и взаимная близость значений факторов на диаграммах свидетельствует об однородности измерений обучающей и тестовой выборок.

Результаты анализа нормальности и однородности значений обучающей и тестовой выборок в совокупности с достаточностью количества их измерений говорят о выполнении условий корреляционного анализа. Из этого следует допустимость применения разработанных метрик с использованием полученных экспериментальных данных.

В качестве критериев оценки точности позиционирования были выбраны значения средней и максимальной ошибок. Графики ошибок позиционирования при использовании разработанных метрик приведены на *рисунках 4* и *5*. На *рисунке 4* изображены графики ошибок для квадратичной разностной и корреляционной метрики, а на *рисунке 5* – графики ошибок метрики обобщенной фазовой корреляции при различных значениях параметра L учета амплитуд спектров сравниваемых изображений.

Характер полученных зависимостей напрямую связан со смысловым значением метрик. Квадратичная разностная метрика в используемой форме, определяемой выражением (9), совпадает с квадратом Евклидова расстояния. Вид и значения кривой совпадают с данными, полученными автором в работе [10] при исследова-

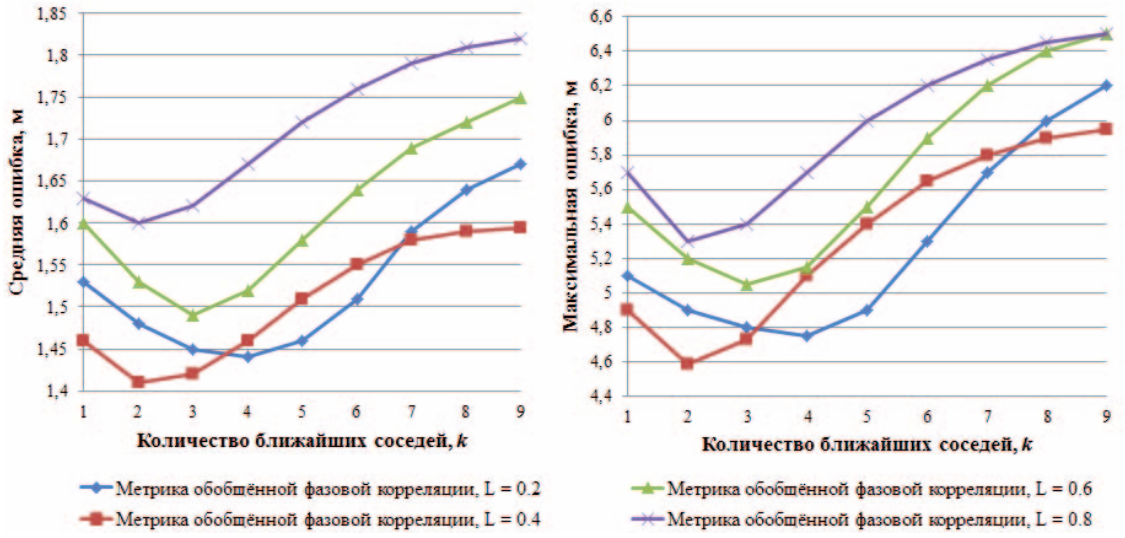


Рис. 5. Экспериментальная оценка точности
метрики обобщенной фазовой корреляции

нии этой метрики. Оптимальным значением k с точки зрения согласованных значений максимальной и средней ошибок было признано значение k=7.

Вид кривых ошибок для корреляционных метрик, вычисляемых согласно выражениям (10) и (11), изображает качественно другую картину поведения. Минимальные значения ошибок при использовании этих мер близости достигаются при малых значениях k (от 2 до 4). Это обусловлено тем, что при малых k оценка местоположения объекта рассчитывается на основании главного экстремума взаимной корреляционной функции (ВКФ). При увеличении значения k в оценке координат начинают учитываться побочные экстремумы ВКФ, что привносит в оценку дополнительную погрешность.

Наиболее точные результаты с точки зрения выбранных критериев были получены при использовании метрики обобщенной фазовой корреляции с параметром L=0,4. При этом величина средней ошибки составила 1,41 м, а величина максимальной – 4,59 м.

Важно отметить, что точность позиционирования при использовании метрик, учитывающих корреляцию сравниваемых величин (корреляционная метрика и метрика обобщенной фазовой корреляции), оказалась выше точности квадратичной разностной метрики, которая, по сути, не является корреляционной. При этом полученные значения средней и максимальной ошибок метрики обобщенной фазовой корреляции оказались ниже аналогичных значений, полученных автором данной работы при исследовании различных некорреляционных метрик близости на том же объекте испытаний (см. работу [10]). Это свидетельствует об эффективности применения разработанной метрики при решении задачи локального позиционирования с высокой точностью.

Заключение

Полученные результаты можно резюмировать следующим образом:

1. Доказана эффективность применения алгоритмов корреляционно-экстремальных систем (КЭС) при решении задачи высокоточного локального позиционирования объектов.

2. Разработаны оригинальные корреляционные метрики расстояния для модифицированного метода k-ближайших соседей на основе алгоритмов КЭС.

3. Экспериментально показано преимущество использования корреляционных метрик по сравнению с метриками, не учитывающими корреляцию сравниваемых измерений.

Основные результаты данной работы могут быть использованы не только при решении задачи определения местоположения объектов, но и в других областях применимости метода k-ближайших соседей. К числу последних можно отнести такие типовые задачи классификации объектов, как сравнение изображений или распознавания образов.

Литература

1. Zhou R. Enhanced wireless indoor tracking system in multi-floor buildings with location prediction. // Proceedings of the Conference on European University Information Systems. – 2006. – P. 448-453.

2. Evennou F., Marx F. Advanced integration of Wi-Fi and inertial navigation systems for indoor mobile positioning. // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. – 2006. – P. 1-11.

3. Баклицкий В.К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения. Тверь: ТО «Книжный клуб», 2009. 360 с.

4. Анищенко В.Н. Метод расчета интервала корреляции навигационных полей для корреляционно-экстремальных систем навигации летательных аппаратов // Вооружение и экономика, 2014. Т. 28. №3. С. 62-74.

5. Сырямкин В.И., Шидловский В.С. Корреляционно-экстремальные радионавигационные системы. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010. 316 с.

6. Плужников А.Д., Потапов Н.Н. Сравнительная оценка алгоритмов корреляционно-экстремальной обработки информации при навигации по картам местности // Радиоэлектроника, 2004. С. 59.

7. Антюфеев В.И. Быков В.Н. Сравнительный анализ алгоритмов совмещения изображений в корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов // Авиационно-космическая техника и технология, 2008. Т. 48. №1. С. 70-74.

8. Bahl P, Padmanabhan V.N. RADAR: An in-building RF based user location and tracking system. // Proceedings of IEEE INFOCOM. – 2000. – P. 775-784.

9. Елисеева И.И., Юзбашев М.М. Общая теория статистики. М: Финансы и Статистика, 2002. 480 с.

10. Ассур О.С., Филаретов Г.Ф. Разработка комплексного метода позиционирования объектов по данным беспроводных сетей Wi-Fi и устройств BLE (Bluetooth Low Energy) // Известия Института инженерной физики, 2015. №2(36). С. 2-10.



УДК 692.7.016

МЕТОД НАВЕДЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО ЛИНИИ АНАЛИТИЧЕСКОГО ВИЗИРОВАНИЯ

GUIDANCE METHOD OF THE AIRCRAFT ALONG THE LINE OF SIGHT OF THE ANALYTICAL

Сергей Александрович Лычагов
кандидат технических наук
начальник кафедры
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел. +7(4967)35-78-20

Олег Павлович Кузнецов
кандидат технических наук
доцент
профессор кафедры
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел. +7(4967)35-78-20

Андрей Николаевич Фуров
кандидат технических наук
преподаватель
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.:+7(4967)35-31-93
E-mail: AFurov@gmail.com

Аннотация
Излагается содержание авторского метода наведения летательного аппарата на замыкающем участке траектории. Приводятся отличительные особенности этого метода наведения.
Ключевые слова: метод требуемых ускорений, метод самонаведения, линия визирования, линия аналитического визирования, метод наведения по линии аналитического визирования.

Summary
We present the contents of the author's method of targeting aircraft at the closing phase of the trajectory. Given the distinctive features of this method of guidance.
Keywords: method required acceleration, homing method, line surveillance, line analytical monitoring, method of guidance through analytical monitoring.

В настоящее время в качестве перспективного метода наведения управляемых летательных аппаратов (УЛА) баллистического, планирующего и аэробаллистического типов ракет стратегического назначения (РСН) рассматривается метод требуемых ускорений [1].

Сущность метода требуемых ускорений заключается в решении обратной задачи динамики, которая заключается в определении закона изменения приложенных к объекту сил и по которому реализуется заданное движение объекта.

Метод требуемых ускорений достаточно прост и универсален с точки зрения применения его для наведения различных классов объектов, включая баллистические ракеты и УЛА, однако ему присущи недостатки [1].

Ключевой проблемой метода является неопределенность при приближении к терминальной точке, в которой знаменатель $T\text{-}t$ стремится к нулю. При этом требуемое ускорение должно неограниченно возрастать.

Другим недостатком метода является необходимость знания конечного времени управления T. При наличии погрешности определения времени наведения неизбежно возникают погрешности определения программы требуемых

ускорений и, как следствие, ошибка наведения. Таким образом, метод требуемых ускорений является зависимым (неинвариантным) от времени управления.

Другой проблемой метода требуемых ускорений является решение задачи определения параметров управления для не полностью управляемых объектов, таких как УЛА перечисленных выше типов. Дело в том, что УЛА всех типов относятся к классу пассивных объектов, движение которых обеспечивается за счет запаса механической энергии, сообщенной им ракетой-носителем. Управление такими объектами возможно только за счет аэродинамических сил путем изменения углов атаки и скольжения (первая схема управления) или же путем изменения пространственного угла атаки и угла крена (вторая схема управления). Изменение угла атаки приводит к изменению наклона вектора скорости к плоскости местного горизонта, а, следовательно, к изменению одновременно двух ортогональных компонент вектора скорости объекта управления. Учет этой особенности управления приводит к чрезмерному усложнению алгоритмов наведения [1].

Оснащение зенитных ракет и ракет класса «воздух – воздух», «воздух – поверхность» головками самонаведения (ГСН) позволило реализовать принцип «выстрелил и забыл». Такие ракеты получили название самонаводящихся, а системы наведения этих ракет стали называть системами самонаведения [2]. В системах самонаведения используется простой, но достаточно эффективный метод наведения, получивший название – метод наведения по линии визирования. Сущность метода заключается в развороте и удержании вектора скорости ракеты по оси визирования (оси ГСН).

При полете самонаводящейся ракеты ГСН за счет системы слежения удерживает свою ось визирования на цели, а система управления стремится развернуть ракету таким образом, чтобы совместить продольную ось ракеты с осью визированием.

Данный принцип наведения можно использовать и при наведении УЛА указанных выше типов на конечном участке траектории. Использование на УЛА ГСН довольно проблематично. Однако линию, определяющую направление на цель во время движения УЛА, можно определить аналитически. Эту линию будем называть линией аналитического визирования.

Метод, реализующий принцип наведения по линии аналитического визирования, назовем методом наведения по линии аналитического визирования.

Сущность метода заключается в совмещении вектора скорости с аналитической линией визирования.

Содержание метода наведения рассмотрим применительно к упрощенной модели движения объекта управления в вертикальной плоскости целевой системы координат как показано на рисунке 1. Напомним, что целевой системой координат называют систему, начало которой совпадает с точкой цели, вертикальная ось системы OH совпадает с линией отвеса в точке цели, ось OL направлена на точку старта ракеты.

Текущее положение центра масс объекта определяется двумя координатами: текущей высотой полета $h(t)$ и текущей дальностью до цели $l(t)$.

На плоскости положение линии аналитического визирования определяется одним углом, тангенс которого равен отношению противолежащего катета к прилежащему

$$tgQ_t(t)=\frac{h(t)}{l(t)}. \qquad (1)$$

В аэродинамике и баллистике положение вектора скорости принято определять углом наклона $Q(t)$, т.е. углом между плоскостью местного горизонта и вектором скорости.

Из *рисунка 1* видно, что требуемый угол наклона вектора скорости равен углу, определяющему положение линии аналитического визирования, взятому с обратным знаком

$$Q_{mp}(t)=-Q_{n}(t)=-arctg\frac{h(t)}{l(t)}. \qquad (2)$$

Отклонение текущего значения угла наклона вектора скорости от требуемого

$$\Delta Q=Q_{mp}(t)-Q(t) \qquad (3)$$

и есть тот параметр, который при наведении необходимо свести к нулю.

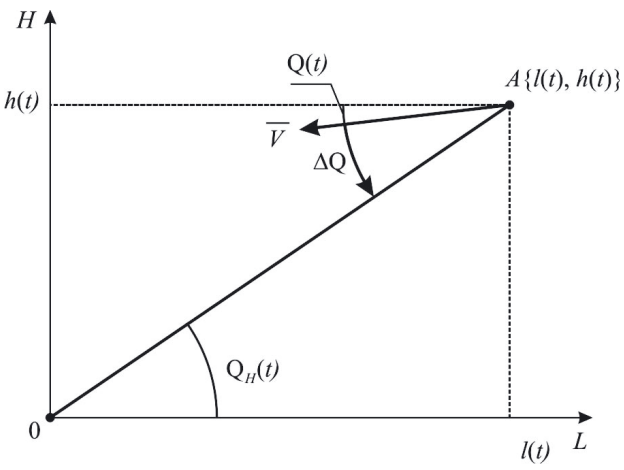


Рис. 1. К пояснению сущности метода наведения

Обратимся к известным динамическим и кинематическим уравнениям движения ЛА в атмосфере [3]

$$\frac{dV}{dt} = -C_x \frac{\rho V^2}{2m} S_м + g \sin Q(t), \quad (4)$$

$$\frac{dQ(t)}{dt} = C_y^\alpha \frac{\rho V}{2m} S_м \alpha - \frac{g}{V} \cos Q(t) + \frac{V}{R_з + h(t)} \cos Q(t), \quad (5)$$

$$\frac{dh(t)}{dt} = V \sin Q(t), \quad (6)$$

$$\frac{dl(t)}{dt} = V \cos Q(t), \quad (7)$$

где $Q(t)$ – текущее значение угла наклона вектора скорости;
α – угол атаки;
C_x, C_y^α – аэродинамические коэффициенты;
S_M – сечение Миделя;
ρ – плотность атмосферы;
$R_з$=6371110 *м* – радиус Земли.

Из приведенных уравнений следует, что параметром управления является угол атаки α. Для невозмущенного движения угол атаки α со скоростью изменения угла $Q(t)$ $\frac{dQ(t)}{dt}$ связан соотношением

$$\frac{dQ(t)}{dt} = A[V, h(t)]\alpha. \quad (8)$$

Здесь принято обозначение

$$A[V, h(t)] = C_y^\alpha \frac{\rho V}{2m} S_м.$$

Запишем дифференциал функции $Q(t)$

$$\Delta Q = \frac{dQ(t)}{dt} \Delta t = A[V, h(t)]\alpha \Delta t, \quad (9)$$

откуда

$$\alpha = \frac{1}{A[V, h(t)]} \frac{\Delta Q}{\Delta t}. \quad (10)$$

Полученное выражение определяет требуемое значение угла атаки, при котором реализуется принцип наведения по аналитической линии визирования.

Интервал времени Δt в выражении (10) можно рассматривать как время разворота вектора скорости из начального положения $Q(0)$ в заданное $Q_{тр}(\Delta t)$. Задавая указанный интервал времени Δt можно влиять на быстродействие процесса управления углом наклона вектора скорости $Q(t)$. Однако необходимо помнить, что параметр управления α имеет ограничения

$$\alpha_{\min} \le \alpha \le \alpha_{\max}.$$

На основании вышеизложенного запишем алгоритм наведения УЛА по методу линии аналитического визирования

$$\Delta Q = -arctg \frac{h(t)}{l(t)} - Q(t), \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{1}{A[V, h(t)]} \frac{\Delta Q}{\Delta t}. \quad (12)$$

Полученный алгоритм наведения достаточно прост по вычислительным затратам, что немаловажно, учитывая скоротечность процесса наведения УЛА на конечном участке траектории (не боле двух-трех десятков секунд), который реализуем (α, V, $h(t)$, $l(t)$, $Q(t)$ – измеряемы) и обладает рядом свойств, которые позволяют судить о следующих преимуществах рассматриваемого метода наведения:

1. Алгоритм наведения является инвариантным ко времени управления, т.е. не зависит от времени полета УББ до цели.

2. По мере разворота вектора скорости из начального положения $Q(0)$ в заданное $Q_{тр}(\Delta t)\Delta Q \to 0$, следовательно, параметр управления также будет стремиться к нулю $\alpha \to 0$. Это говорит о сходимости алгоритма управления.

3. Алгоритм является алгоритмом замкнутого вида, так как расчет параметров управления осуществляется непрерывно в процессе всего времени полета УЛА до цели.

4. Учет возмущений, действующих на УЛА во время полета, осуществляется косвенным образом за счет замкнутого управления. Кроме того, алгоритм обладает потенциалом повышения точности наведения за счет возможности косвенного измерения возмущений. Указанная возможность косвенного измерения возмущений будет показана ниже.

5. Алгоритм наведения позволяет непосредственно определять параметр управления – угол атаки, не требуя для этого вспомогательных систем координат.

Литература

1. Системы управления летательными аппаратами (баллистическими ракетами и их головными частями): учебник для вузов / Г.Н. Разоренов, Э.А. Бахрамов, Ю.Ф. Титов / Под ред. Г.Н. Разоренова. М.: Машиностроение, 2003. 584 с.

2. Баллистика и навигация ракет / Под ред. Дмитриевского А.А. М.: Машиностроение, 1985. 310 с.

3. Кузнецов О.П., Лычагов С.А., Нестеров Е.П. Ракетное оружие на основе аэробаллистической концепции. Серпухов: МО РФ, 2010. 181 с.



УДК 519.6

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОЙ ПРЕДСТАРТОВОЙ КАЛИБРОВКИ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ С НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИМАЛЬНОЙ ОЦЕНКОЙ ИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПОДВИЖНОЙ ТОЧКЕ РАЗЛОЖЕНИЯ С АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ

MATHEMATICAL MODEL OF A COMPLEX PRELAUNCH CALIBRATION OF ACCELEROMETERS WITH NONLINEAR OPTIMAL ESTIMATION OF THEIR PARAMETERS IN THE MOBILE POINT OF DECOMPOSITION WITH A PRIORI INFORMATION

Виктор Ефимович Аксёнов
заслуженный деятель науки РФ
доктор технических наук, профессор
профессор кафедры
ВА РВСН им. Петра Великого (филиал в г. Серпухове)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел. +7(4967)78-96-09

Алексей Юрьевич Порядин
адъюнкт
ВА РВСН им. Петра Великого (филиал в г. Серпухове)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7(987)319-30-77
E-mail: lex48205@mail.ru

Аннотация
В статье рассматривается содержание основных этапов разработки математической модели комплексной предстартовой калибровки акселерометров с нелинейной оптимальной оценкой их параметров при подвижной точке разложения с априорной информацией. Определены условия остановки итерационного процесса и оценки точности оптимальной нелинейной оценки, проанализированы погрешности нелинейной оценки параметров акселерометров.

Ключевые слова: математическая модель комплексной предстартовой калибровки акселерометров, система нелинейных уравнений наблюдения, нелинейная оптимальная оценка параметров при подвижной точке разложения с априорной информацией.

Summary
The article discusses the content of the main stages of the development of mathematical models of complex prelaunch calibration of accelerometers with nonlinear optimal estimation of their parameters when the mobile point of decomposition and with a priori information. The conditions for stopping the iterative process and assess the accuracy of optimal nonlinear estimation, analyzed the errors of the nonlinear estimates of the parameters of accelerometers.

Keywords: a mathematical model of a complex prelaunch calibration of accelerometers, system nonlinear equations of tracing, nonlinear optimum valuation of parameters with a mobile point of the decomposition with a priori parameters information.

Для повышения точности инерциальных командно-измерительных приборов (КИП) в установившемся режиме необходимо проводить эксплуатационные мероприятия, заключающиеся в периодическом определении значений статических погрешностей акселерометров, запоминании этих значений и их последующим учёте при полете ракеты на активном участке траектории. Такой процесс определения статических погрешностей акселерометров называется их предстартовой калибровкой. Наиболее предпочтительной с точки зрения точности калибровки по дисперсии акселерометрической составляющей отклонения точки падения боевых блоков (ББ) по дальности является комплексная предстартовая калибровка акселерометров, основанная на общей системе нелинейных уравнений наблюдения (СНУН) и предусматривающая вычисление оптимальных линейных оценок параметров акселерометров. Однако, точность полу-

чаемой оценки, существенно уступает потенциально возможной точности из-за линеаризации исходной СНУН. Таким образом, в настоящее время, в условиях постоянного продления срока эксплуатации межконтинентальных баллистических ракет (МБР), когда отклонения действительных значений параметров акселерометров от их расчетных значений могут выходить за установленные пределы, эффективность применения оптимальной линейной оценки с точки зрения точности калибровки и использования информационного ресурса значительно снижается, что в свою очередь приводит к снижению точности наведения ББ МБР. Повысить точность калибровки, а соответственно и точность наведения ББ, можно путём проведения комплексной предстартовой калибровки акселерометров с нелинейной оптимальной оценкой их параметров при подвижной точке разложения.

Рассмотрим содержание основных этапов разработки математической модели комплексной предстартовой калибровки акселерометров с нелинейной оптимальной оценкой их параметров при подвижной точке разложения с априорной информацией об оцениваемых параметрах.

1. Общая СНУН для акселерометров при их комплексной предстартовой калибровке

Калибровка акселерометров основывается на общей СНУН для акселерометров [1, 2]. Получим общую СНУН для акселерометров.

Имеем два акселерометра «α» и «β», оси чувствительности которых расположены в одной вертикальной плоскости $X_cOУ_c$ *(рисунок 1)*.

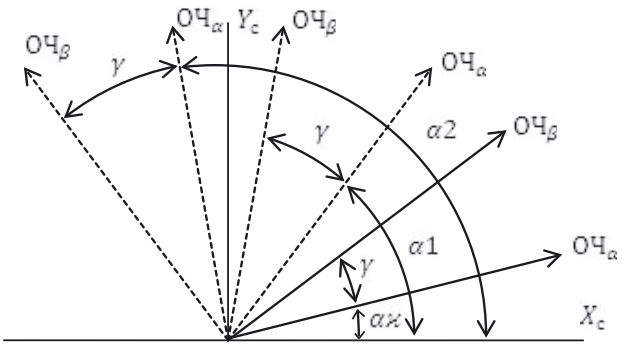


Рис. 1. Положение осей чувствительности акселерометров «α» и «β» при комплексной предстартовой калибровке

Акселерометры установлены на вращающейся платформе, с помощью которой можно изменять положения их осей чувствительности в вертикальной плоскости.

При комплексной предстартовой калибровке оси чувствительности акселерометров устанавливаются последовательно в технологические положения, задаваемые углом α_i, где $i=\overline{1,\chi-1}$ – количество технологических положений, а затем в рабочее положение, задаваемое углом $\alpha\chi$ *(рисунок 1)*. В каждом положении производится одновременное определение периода (частоты) следования импульсов на выходе акселерометров «α» и «β».

Совокупность измерений частоты позволяет составить СНУН:

$$\begin{cases} f_{\alpha i}^{изм} = \overbrace{K_\alpha \cdot g \cdot \sin \alpha i + U(0)_\alpha}^{f_{\alpha i}} + \delta f_{\alpha i} \\ f_{\beta i}^{изм} = \underbrace{K_\beta \cdot g \cdot \sin(\alpha i + \gamma) + U(0)_\beta}_{f_{\beta i}} + \delta f_{\beta i} \\ i = \overline{1,\chi} \end{cases}$$

или

$$F(K_\alpha, K_\beta, \alpha 1, ..., \alpha\chi, \gamma) + \Delta У = У1, \qquad (1)$$

где:

$$F(K_\alpha, K_\beta, \alpha 1, ..., \alpha\chi, \gamma) = \begin{bmatrix} f_{\alpha i} \\ f_{\beta i, i=\overline{1,\chi}} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} K_\alpha \cdot g \cdot \sin \alpha i + U(0)_\alpha \\ K_\beta \cdot g \cdot \sin(\alpha i + \gamma) + U(0)_\beta, i = \overline{1,\chi} \end{bmatrix}$$

– математическая модель системы нелинейных функций (СНФ);

K_α,K_β – расчетные значения масштабных коэффициентов акселерометров;

g – заданное ускорение силы тяжести;

γ – постоянный в процессе калибровки, но не известный угол между осями чувствительности, расположенных в одной вертикальной плоскости калибруемых акселерометров;

$\Delta У = \begin{bmatrix} \delta f_{\alpha i} \\ \delta f_{\beta i}, i = \overline{1,\chi} \end{bmatrix}$ – вектор случайных ошибок определения частоты импульсов на выходе акселерометров «α» и «β»;

$У1 = \begin{bmatrix} f_{\alpha i}^{изм} \\ f_{\beta i}^{изм}, i = \overline{1,\chi} \end{bmatrix}$ – вектор результатов определения (измерения) частоты импульсов на выходе калибруемых акселерометров;

$U(0) = \begin{bmatrix} U(0)_\alpha \\ U(0)_\beta \end{bmatrix}$ – вектор смещения нуля акселерометров «α» и «β», определяется заблаговременно.

Необходимо отметить, что углы ориентации оси чувствительности акселерометра «α» в технологических положениях должны иметь оптимальные значения, т.е. $\alpha i^P = \alpha i^{opt}, i = \overline{1,\chi-1}$. Эти

значения определяются путем решения задачи оптимизации режима измерений.

2. Оптимизация режима измерений

Оптимальным режимом измерений называется такой режим, у которого технологические параметры равны оптимальным значениям.

Оптимальные значения технологических параметров – это такие их значения, при которых дисперсия акселерометрической составляющей ошибки наведения по дальности, обусловленная ошибками оценки параметров акселерометров, минимальна.

Процесс определения оптимальных технологических параметров называется оптимизацией режима измерений.

При оптимальной оценке параметров акселерометров по критериям максимум апостериорной плотности распределения вероятности вектора оцениваемых параметров X или минимум среднего риска при нормальной апостериорной плотности распределения вероятности оцениваемых параметров (Бейесовские оценки) обобщенная обратная матрица C^{-} и поправка к оценкам $\Delta\hat{X}_{апр}$ равны [1, 2]:

$$C^{-} = C_{Б}^{-} = \underbrace{(K_X^{-1} + C^T \cdot K_{\Delta Y}^{-1} \cdot C)^{-1}}_{K_{X_Б}} \cdot C^T \cdot K_{\Delta Y}^{-1}; \qquad (2)$$

$$\Delta X_{апр} = \left[K_X^{-1} + C^T \cdot K_{\Delta Y}^{-1} \cdot C\right]^{-1} \cdot K_X^{-1} \cdot m_X . \qquad (3)$$

K_x и m_x – заданные априорная корреляционная матрица и математическое ожидание вектора оцениваемых параметров X, являющиеся вместе априорной информацией об оцениваемых параметрах.

Апостериорная корреляционная матрица, характеризующая ошибку оценки параметров за счет ΔY представляется в виде:

$$K_{X_Б} = (K_X^{-1} + C^T \cdot K_{\Delta Y}^{-1} \cdot C)^{-1} . \qquad (4)$$

$K_{\Delta Y}^{-1}$ – корреляционная матрица, характеризующая точность вектора измерений Y или случайную составляющую ΔY в векторе измерений Y.

Доказано [1, 2], что элементы матрицы C в формуле (4) зависят от технологических параметров $\alpha i, i = \overline{1, \chi - 1}$. Поэтому формулу (4) необходимо записать следующим образом:

$$K(Q)_{\hat{X}_Б} = \left[K_X^{-1} + C(X1^P, Q)^T \cdot K_{\Delta Y}^{-1} \cdot C(X1^P, Q)\right]^{-1}; \qquad (5)$$

где $Q = \left\{\alpha i, i = \overline{1, \chi - 1}\right\}$ – множество углов разворота гиростабилизированной платформы (ГСП) относительно её внешней оси подвеса.

С учетом формулы (5) дисперсия акселерометрической составляющей ошибки наведения по дальности при оптимальной оценке параметров акселерометров с априорной информацией представляется в виде:

$$D(Q)_{\Delta L} = L \cdot K(Q)_{\hat{X}} \cdot L^T , \qquad (6)$$

где L – заданная матрица-строка коэффициентов влияния оцениваемых параметров на отклонение по дальности точки падения боевого блока.

Условие оптимальности режима измерений имеет вид:

$$\begin{matrix} \min D(Q)_{\Delta L}^{мнк} \\ noQ \in Q^{доп} \end{matrix}, \qquad (7)$$

или с учетом формулы (7):

$$\begin{matrix} Q^{opt} = \arg\min L \cdot K(Q)_{\hat{X}} \cdot L^T \\ noQ \in Q^{доп} \end{matrix}, \qquad (8)$$

где $Q^{доп} = \left\{\alpha i^{доп}, i = \overline{1, \chi - 1}\right\}$ – допустимое множество углов разворота ГСП относительно её внешней оси подвеса.

3. Преобразование общей СНУН в эквивалентную систему нелинейных алгебраических уравнений

С учетом проведения оптимизации режима измерений расчётные (заданные) значения оцениваемых параметров представляются в виде:

$$X1^P = [K_\alpha^P K_\beta^P \alpha 1^{opt} \ldots \alpha(\chi - 1)^{opt} \alpha\chi^P \gamma^P]^T . \qquad (9)$$

Произведём разложение СНФ в точке $X1^P$ по формуле Тейлора первого порядка, получим:

$$F(X1) = F(X1^P) + C(X1^P) \cdot X + R_1(X, F(X1^P + \Phi \cdot X)), \qquad (10)$$

где $F(X1^P)$ – вектор значений функций из СНФ при $X1 = X1^P$, определенный в заданной области;

$C(X1^P) = \left[\dfrac{\partial F(X1)}{\partial X1}\right]_{X1 = X1^P}$ – прямоугольная матрица Якоби размером $[m \times n]$ (m – количество уравнений в СНУН, n – число оцениваемых параметров), элементы которой вычисляются при $X1 = X1^P$;

$R_1(X, F(X1^P + \Phi \cdot X))$ – остаточный член формулы Тейлора первого порядка в форме Лагранжа ($0 < \Phi < 1$) [3].

Подставим (10) в (1) и после несложных преобразований получим псевдолинейную систему уравнений наблюдения следующего вида:

$$C(X1^P) \cdot X + \Delta Y = Y1^{изм} - F(X1^P) - R_1(X, F(X1^P + \Phi \cdot X)). \qquad (11)$$

Оптимальное решение псевдолинейной системы уравнений наблюдения (11) с априорной информацией по критериям максимум апостериорной плотности распределения вероятности вектора оцениваемых параметров X или минимум среднего риска при нормальной апостериорной плотности распределения вероятности оцениваемых параметров записывается в виде [1]:

$$X = C_{Б}^{-}(X1^P) \cdot \left[Y1^{изм} - F(X1^P) - R_1(X, F(X1^P + \Phi \cdot X))\right] + \Delta X(X1^P)_{апр}, \qquad (12)$$

где
$C_{Б}^{-}(X1^{p}) = \left[K_{X}^{-1} + C^{T}(X1^{p}) \cdot K_{\Delta Y}^{-1} \cdot C(X1^{p})\right]^{-1} \cdot C^{T}(X1^{p}) \cdot K_{\Delta Y}^{-1}$
– обобщенная обратная матрица, в которой существуют указанные обратные матрицы;
$K_{\Delta Y}$ – заданная корреляционная матрица вектора случайных ошибок измерения ΔY.

Уравнение (12) – это система нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ) относительно искомого вектора X. Это уравнение, как правило, не имеет аналитического решения, к тому же и параметр Φ неизвестен. Поэтому данное уравнение можно решить численным методом, исключив из итерационного процесса остаточный член $R_1(X,F(X1^P + \Phi \cdot X))$ из-за того, что коэффициент Φ неизвестен. Однако, при анализе сходимости итерационного процесса в работе [3] доказано, что исключение остаточного члена не приводит к неуправляемой ошибке в результате, но может повлечь увеличение количества итераций.

4. Решение СНАУ численным методом, использующим принцип разложения СНФ при подвижной точке разложения

Разработаем итерационную процедуру численного решения СНАУ. Для этого исключим из СНАУ (12) остаточный член, а вместо X подставим ($X1$–$X1^P$), получим:

$$X1 = X1^{p} + C_{Б}^{-}(X1^{p}) \cdot \left[Y1^{изм} - F(X1^{p})\right] + \Delta X(X1^{p})_{апр}. \quad (13)$$

Введем обозначения:
$X1^P = X1^{(0)}$ – заданное начальное приближение оцениваемых параметров;
$X1 = X1^{(1)}$ – первое приближение оцениваемых параметров;
тогда
$C_{Б}^{-}(X1^{(0)}) \cdot \left[Y1^{изм} - F(X1^{(0)})\right] = X^{(0)}(X1^{(0)})$ – начальная оптимальная оценка отклонения действительного значения искомых параметров $X1$ от заданного их значения $X1^P$;
$\Delta X(X1^{p})_{апр} = \Delta X^{(0)}(X1^{(0)})_{апр} = \left[K_{X}^{-1} + C^{T}(X1^{(0)}) \cdot K_{\Delta Y}^{-1} \cdot C(X1^{(0)})\right]^{-1} \cdot K_{X}^{-1} \cdot m_{X}$
– поправка к оптимальной линейной оценке параметров с априорной информацией за счёт заданной априорной информации, соответствующая начальному приближению оцениваемых параметров $X1^{(0)}$.

Подставив введенные обозначения в уравнение (13), получим:

$$X1^{(1)} = X1^{(0)} + X^{(0)}(X1^{(0)}) + \Delta X^{(0)}(X1^{(0)})_{апр}. \quad (14)$$

Вычисленный вектор первого приближения $X1^{(1)}$ подставляется в правую часть уравнения (14) вместо $X1^{(0)}$ и вычисляется второе приближение $X1^{(2)}$ и т.д. Описанный итерационный процесс записывается следующим образом:

$$X1^{(k+1)} = X1^{(k)} + X^{(k)}(X1^{(k)}) + \delta\Delta X^{(k)}(X1^{(k)})_{апр}, \quad (15)$$

где
а) $\delta\Delta X^{(k)}(X1^{(k)})_{апр} = X^{(k)}(X1^{(k)})_{апр} - \Delta X^{(k-1)}(X1^{(k-1)})_{апр}$;
б) K = 0,1,2,3,…;
в) $X^{(k)}(X1^{(k)}) = C_{Б}^{-}(X1^{(k)}) \cdot \left[Y1^{изм} - F(X1^{(k)})\right]$ – вектор приращений оценки;
г) $C_{Б}^{-}(X1^{(k)}) = \left[K_{X}^{-1} + C^{T}(X1^{(k)}) \cdot K_{\Delta Y}^{-1} \cdot C(X1^{(k)}\right]^{-1} \cdot C^{T}(X1^{(k)}) \cdot K_{\Delta Y}^{-1}$.

Итерационный процесс (15) продолжается до выполнения условия:

$$\| X1^{(k+1)} - X1^{(k)} \| \le \varepsilon, \quad (16)$$

где $\| X1^{(k+1)} - X1^{(k)} \|$ – норма разности двух векторов $X1^{(k+1)}$ и $X1^{(k)}$;
ε – заданная точность вычисления искомого вектора параметров $X1$.

При выполнении условия (16) получаем нелинейную оптимальную оценку искомого вектора параметров $\mathbf{X}1^{opt} \approx X1^{(k+1)}$ с заданной точностью.

Структура итерационного процесса (15) аналогична структуре итерационного процесса метода Ньютона решения СНАУ, а содержание формулы для вычисления вектора приращений $X^{(k)}(X1^{(k)})$, существенно отличается от формулы для вычисления вектора приращений в методе Ньютона.

Точность численного метода нелинейной оптимальной оценки параметров при подвижной точке разложения с априорной информацией зависит от двух погрешностей, одна их которых случайная, а другая систематическая. Случайная погрешность обусловлена случайной составляющей ΔY, содержащейся в результатах измерений $Y1^{изм}$, а систематическая погрешность обусловлена бесконечностью итерационного процесса. Систематическая погрешность $\varepsilon^{(k)}$ зависит от числа итераций и при этом $\lim\limits_{по\,k \to \infty} \varepsilon^{(k)} = 0$. Уменьшение систематической составляющей погрешности достигается увеличением количества итераций.

Числовой вероятностной характеристикой случайной погрешности нелинейной оптимальной оценки вектора искомых параметров $X1^{opt}$ при подвижной точке разложения с априорной информацией является апостериорная корреляционная матрица K_{X1}^{opt}, определяемая формулой [1]:

$$K_{X1^{opt}} = \left[C^{T}(X1^{opt}) \cdot K_{\Delta Y}^{-1} \cdot C(X1^{opt})\right]^{-1}. \quad (17)$$

Абсолютная величина случайной погрешности $\delta X(\Delta Y)$, содержащееся в $X1^{opt}$ и непосредственно зависящая от ΔY, равна:

$$\delta X(\Delta Y) = C_{мнк}^{-}(X1^{opt}) \cdot \Delta Y. \quad (18)$$

Уменьшение абсолютной величины случайной погрешности $\delta X(\Delta Y)$ достигается по двум направлениям:

1. Повышением точности измерений (уменьшением ΔY).

2. Увеличением количества измерений m.

Таким образом, цель данной статьи достигнута. Разработана математическая модель комплексной предстартовой калибровки акселерометров с нелинейной оптимальной оценкой их параметров при подвижной точке разложения с априорной информацией о параметрах. Определены условия остановки итерационного процесса и оценки точности нелинейной оптимальной оценки. Проведен анализ погрешностей нелинейной оптимальной оценки параметров акселерометров – случайной и систематической ошибки измерения.

Литература

1. Аксёнов В.Е. Эксплуатационная калибровка КИП автономных систем управления ракет: монография в 3 ч. Ч. 1 / В.Е. Аксёнов. Серпухов: ВА РВСН им. Петра Великого (филиал в г. Серпухове), 2014. 383 с.

2. Аксёнов В.Е. Эксплуатационная калибровка КИП автономных систем управления ракет: монография в 3 ч. Ч. 2 / В.Е. Аксёнов, Л.М. Жебрак. Серпухов: ВА РВСН им. Петра Великого (филиал в г. Серпухове), 2014. 334 с.

3. Аксёнов В.Е. Эксплуатационная калибровка КИП автономных систем управления ракет: монография в 3 ч. Ч. 3 / В.Е. Аксёнов, Е.В. Пискулин. Серпухов: ВА РВСН им. Петра Великого (филиал в г. Серпухове), 2014. 180 с.

4. Аксёнов В.Е. Математическая модель комплексной предстартовой калибровки акселерометров с нелинейной оптимальной оценкой их параметров при подвижной точке разложения и без априорной информации // Известия Института инженерной физики, 2015. №3(37). С. 44-49.

5. Пирумов У.Г. Численные методы: учебник и практикум для академического бакалавриата. М.: Издательство Юрайт, 2014. 421 с.

УДК 519.6

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ ПРЕДСТАРТОВОЙ КАЛИБРОВКИ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ С НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИМАЛЬНОЙ ОЦЕНКОЙ ИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПОДВИЖНОЙ ТОЧКЕ РАЗЛОЖЕНИЯ В ДВУХ ПОЛОЖЕНИЯХ ГИРОСТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ С АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ

METHODOLOGY A COMPLEX PRELAUNCH CALIBRATION OF ACCELEROMETERS WITH NONLINEAR OPTIMAL ESTIMATION OF THEIR PARAMETERS IN THE A MOBILE POINT OF THE DECOMPOSITION IN TWO POSITIONS GYROSTABILIZED PLATFORM WITH A PRIORI INFORMATION

Алексей Юрьевич Порядин
адъюнкт
ВА РВСН им. Петра Великого (филиал в г. Серпухове)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7(987)319-30-77
E-mail: lex48205@mail.ru

Аннотация

В статье рассматривается методика комплексной предстартовой калибровки акселерометров с нелинейной оптимальной оценкой их параметров при подвижной точке разложения в двух положениях гиростабилизированной платформы с априорной информацией. Показана ориентация осей чувствительности акселерометров в оптимальных технологических положениях при их комплексной предстартовой калибровке. Рассмотрено условие оптимальности режима измерения с априорной информацией. Определен общий вид итерационного процесса, условия его остановки и оценка точности оптимальной нелинейной оценки.

Ключевые слова: методика комплексной предстартовой калибровки акселерометров, система нелинейных уравнений наблюдения, нелинейная оптимальная оценка параметров с подвижной точкой разложения, априорная информация.

Summary

The article discusses the methodology of complex prelaunch calibration of accelerometers with the optimal nonlinear estimation of their parameters in the mobile point of decomposition in two positions gyrostabilized platform with a priori information. Shows the orientation of axes of sensitivity of accelerometers in the optimal technological regulations under comprehensive prelaunch calibration. Considered the condition of optimality of the mode of measurement with a priori information. Defined the overall look of the iterative process, the conditions of his stop and to evaluate the accuracy of optimal nonlinear estimation.

Keywords: methodology a complex prelaunch calibration of accelerometers, the system of nonlinear observation equations, nonlinear optimal estimation of the parameters with a mobile point of the decomposition, a priori information.

При комплексной предстартовой калибровки оси чувствительности акселерометров устанавливаются последовательно в оптимальные технологические положения, определяемые заранее, а затем в рабочее (боевое) положение. В каждом положении производится одновременное определение среднего периода (частоты) следования импульсов на выходе акселерометров «α» и «β». По совокупности измерений частоты следования импульсов можно составить систему нелинейных уравнений наблюдения (СНУН), в результате решения которой определяются нелинейные оптимальные оценки масштабных коэффициентов и углов ориентации акселерометров [1, 2].

По числу технологических положений комплексная предстартовая калибровка может быть быстродействующей – одно технологическое и одно рабочее (боевое) положение, и высокоточной – два технологических и одно рабочее (боевое) положение.

Рассмотрим методику комплексной предстартовой калибровки акселерометров с нелинейной оптимальной оценкой их параметров с подвижной точкой разложения в двух положениях гиростабилизированной платформы (ГСП).

Имеем два акселерометра«α» и «β», оси чувствительности которых расположены в одной вертикальной плоскости $X_c O У_c$ (*рисунок 1*).

Акселерометры установлены на вращающейся платформе, с помощью которой можно изменять положения их осей чувствительности в вертикальной плоскости.

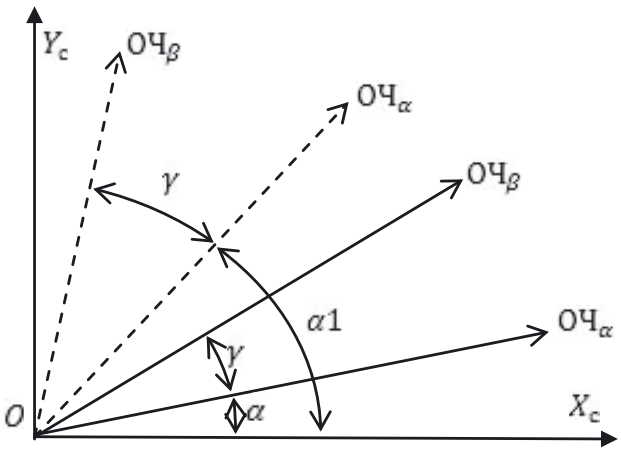


Рис. 1. Положение осей чувствительности акселерометров «α» и «β» при комплексной предстартовой калибровке

При комплексной предстартовой калибровке оси чувствительности акселерометров устанавливаются в технологическое положение, задаваемое углом α1. Средняя частота импульсов на выходе акселерометров при этом равна:

$$f_{\alpha 1}^{изм} = \overbrace{K_\alpha \cdot g \cdot \sin\alpha 1 + U(0)_\alpha}^{f\alpha 1} + \delta f_{\alpha 1}$$
$$f_{\beta 1}^{изм} = \underbrace{K_\beta \cdot g \cdot \sin(\alpha 1 + \gamma) + U(0)_\beta}_{f_{\beta 1}} + \delta f_{\beta 1}.$$

По окончании измерения частоты следования импульсов в технологическом положении оси чувствительности акселерометров устанавливаются в рабочее (боевое) положение, задаваемое углом α. Измеренная частота следования импульсов на выходе акселерометров в рабочем (боевом) положении равна:

$$f_\alpha^{изм} = \overbrace{K_\alpha \cdot g \cdot \sin\alpha + U(0)_\alpha}^{f\alpha} + \delta f_\alpha$$
$$f_\beta^{изм} = \underbrace{K_\beta \cdot g \cdot \sin(\alpha + \gamma) + U(0)_\beta}_{f_\beta} + \delta f_\beta.$$

Таким образом, совокупность измерений частоты следования импульсов в технологическом и рабочем (боевом) положении составляет СНУН:

$$\begin{cases} f_{\alpha 1}^{изм} = K_\alpha \cdot g \cdot \sin\alpha 1 + U(0)_\alpha + \delta f_{\alpha 1} \\ f_{\beta 1}^{изм} = K_\beta \cdot g \cdot \sin(\alpha 1 + \gamma) + U(0)_\beta + \delta f_{\beta 1} \\ f_\alpha^{изм} = K_\alpha \cdot g \cdot \sin\alpha + U(0)_\alpha + \delta f_\alpha \\ f_\beta^{изм} = K_\beta \cdot g \cdot \sin(\alpha + \gamma) + U(0)_\beta + \delta f_\beta \end{cases}$$

или

$$F(K_\alpha, K_\beta, \alpha, \alpha 1) + \Delta У = У 1, \qquad (1)$$

где

$$F(K_\alpha, K_\beta, \alpha, \alpha 1) = \begin{bmatrix} f_{\alpha 1} \\ f_{\beta 1} \\ f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_\alpha \cdot g \cdot \sin\alpha 1 + U(0)_\alpha \\ K_\beta \cdot g \cdot \sin(\alpha 1 + \gamma) + U(0)_\beta \\ K_\alpha \cdot g \cdot \sin\alpha + U(0)_\alpha \\ K_\beta \cdot g \cdot \sin(\alpha + \gamma) + U(0)_\beta \end{bmatrix}$$

– математическая модель частоты импульсов на выходе калибруемых акселерометров «α» и «β»;

$U(0) = \begin{bmatrix} U(0)_\alpha \\ U(0)_\beta \\ U(0)_\alpha \\ U(0)_\beta \end{bmatrix}$ – смещение нуля акселерометров «α» и «β», определяется заблаговременно;

$$\Delta Y = \begin{bmatrix} \delta f_{\alpha 1} \\ \delta f_{\beta 1} \\ \delta f_{\alpha} \\ \delta f_{\beta} \end{bmatrix}$$ – случайная ошибка определения частоты импульсов на выходе акселерометров «α» и «β»;

$$Y1 = \begin{bmatrix} f_{\alpha 1}^{изм} \\ f_{\beta 1}^{изм} \\ f_{\alpha}^{изм} \\ f_{\beta}^{изм} \end{bmatrix}$$ – результаты определения (измерения) частоты импульсов на выходе калибруемых акселерометров;

g – заданное ускорение силы тяжести;
γ – постоянный в процессе калибровки угол между осями чувствительности, расположенными в одной вертикальной плоскости калибруемых акселерометров.

Вектор действительных значений оцениваемых параметров акселерометров X1 равен:

$$X1=[K_{\alpha}\ K_{\beta}\ \alpha\ \alpha 1]^{T},$$

где K_{α}, K_{β} – действительные значения масштабных коэффициентов калибруемых акселерометров «α» и «β»;
α – действительное значение угла ориентации оси чувствительности акселерометра «α» в рабочем (боевом) положении;
α1 – действительное значение угла ориентации оси чувствительности акселерометра «α» в технологическом положении.

Вектор расчетных значений оцениваемых параметров акселерометров $X1^{P}$ равен:

$$X1^{P} = \left[K_{\alpha}^{P} K_{\beta}^{P} \alpha^{P} \alpha 1^{P}\right]^{T}.$$

По $X1^{P}$ можно вычислить расчетные значения результатов измерений $Y1^{P}$:

$$Y1^{P} = \begin{bmatrix} f_{\alpha 1}^{P} \\ f_{\beta 1}^{P} \\ f_{\alpha}^{P} \\ f_{\beta}^{P} \end{bmatrix} = F(K_{\alpha}^{P}, K_{\beta}^{P}, \alpha^{P}, \alpha 1^{P}) =$$

$$= \begin{bmatrix} K_{\alpha}^{P} \cdot g \cdot \sin \alpha 1^{P} + U(0)_{\alpha} \\ K_{\beta}^{P} \cdot g \cdot \sin(\alpha 1^{P} + \gamma) + U(0)_{\beta} \\ K_{\alpha}^{P} \cdot g \cdot \sin \alpha^{P} + U(0)_{\alpha} \\ K_{\beta}^{P} \cdot g \cdot \sin(\alpha^{P} + \gamma) + U(0)_{\beta} \end{bmatrix}.$$

Необходимо определить нелинейную оптимальную оценку $\hat{X}^{opt}$ масштабных коэффициентов и углов ориентации осей чувствительности акселерометров «α» и «β» при их комплексной предстартовой калибровки.

Для проведения математического моделирования возьмем следующие исходные данные, используемые для комплексной предстартовой калибровки:

1) расчетные значения масштабных коэффициентов акселерометров:

$$K_{\alpha}^{P} = K_{\beta}^{P} = 80\left[c/м\right];$$

2) расчетное значение угла ориентации оси чувствительности акселерометра «α» в рабочем (боевом) положении и угла между осями чувствительности акселерометров: $\alpha^{P}=\gamma=30^{0}$;

3) ускорение силы тяжести в точке старта: g = 9.81[м/с^2];

4) допустимые значения угла ориентации оси чувствительности акселерометра «α» в технологическом положении: $\alpha 1^{доп}=70°\ldots90°$;

5) матрица-строка коэффициентов влияния оцениваемых параметров на отклонение по дальности точки падения боевого блока:
L=[7.5·10^4 м^2/с 6.6·10^4 м^2/с 1.8·10^6 м/рад 0 м/рад];

6) априорная корреляционная матрица оцениваемых параметров акселерометров:

$$K_{X} = \begin{bmatrix} 7.11\cdot10^{-4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7.11\cdot10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.59\cdot10^{-8} & 1.06\cdot10^{-8} \\ 0 & 0 & 1.06\cdot10^{-8} & 1.06\cdot10^{-8} \end{bmatrix};$$

7) корреляционная матрица, характеризующая точность вектора измерений:

$$K_{\Delta Y} = \begin{bmatrix} 10.35\cdot10^{-6} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8.79\cdot10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4.0\cdot10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.1\cdot10^{-6} \end{bmatrix}.$$

Известно, что угол ориентации оси чувствительности акселерометра «α» в технологическом положении должен иметь оптимальное значение при комплексной калибровке [3, 5]. Данное положение определяется в результате решения задачи оптимизации режима измерений. Условие оптимальности режима измерений при оптимальной оценке параметров акселерометров с априорной информацией имеет вид:

$$\min D(\alpha 1)_{\Delta L}^{Б}$$
$$no\ \alpha 1 \in \alpha 1^{доп}\ . \qquad (2)$$

Используя методы нелинейного программирования [3], для приведенных выше исходных данных, получим следующие результаты:

$$\alpha 1_{Б}^{opt} = 80.05^{0}, D(80.05)_{\Delta L}^{Б} = 748.7\,м^{2}.$$

С учетом проведения оптимизации режима измерений, вектор расчетных значений оцени-

ваемых параметров акселерометров $X1^{P}$ равен:

$$X1^{P} = \left[K_{\alpha}^{P} K_{\beta}^{P} \alpha^{P} \alpha 1^{opt}\right]^{T}.$$

Представим систему нелинейных функций $F(K_{\alpha}, K_{\beta}, \alpha, \alpha 1)$ из (1) формулой Тейлора для функции любого числа переменных:

$$F(K_{\beta}, K_{\beta}, \alpha, \alpha 1) = F(K_{\alpha}^{P}, K_{\beta}^{P}, \alpha^{P}, \alpha 1^{P}) + C \cdot X + R_{1}, \quad (3)$$

где $X = X1 - X1^{P}$ – вектор отклонений действительных значений оцениваемых параметров акселерометров от их расчетных значений, значит

$$X = [\Delta K_{\alpha}\ \Delta K_{\beta}\ \Delta\alpha\ \Delta\alpha 1]^{T};$$

$C = \left[\frac{\partial F}{\partial X1}\right]_{X1=X1^{P}}$ – прямоугольная матрица Якоби размером 4×4, которая имеет вид:

$$C = \begin{bmatrix} g\cdot\sin\alpha 1^{P} & 0 & K_{\alpha}^{P}\cdot g\cdot cos\alpha 1^{P} & 0 \\ 0 & g\cdot\sin(\alpha 1^{P}+\gamma) & K_{\beta}^{P}\cdot g\cdot cos(\alpha 1^{P}+\gamma) & 0 \\ g\cdot\sin\alpha^{P} & 0 & 0 & K_{\alpha}^{P}\cdot g\cdot cos\alpha^{P} \\ 0 & g\cdot\sin(\alpha^{P}+\gamma) & 0 & K_{\beta}^{P}\cdot g\cdot cos(\alpha^{P}+\gamma) \end{bmatrix}$$

R_{1} – остаточный член формулы Тейлора в форме Лагранжа.

Подставив (3) в (1) и проведя необходимые преобразования [3], получим псевдолинейную систему уравнений наблюдения (4), оптимальным решением которой является оптимальная линейная оценка с априорной информацией $\hat{X}_{Б}$, которая дает систему нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ) вида (5).

$$C(X1^{P})X + \Delta Y = Y1^{изм} - F(X1^{P}) - R_{1}, \quad (4)$$

где

$$\hat{X}_{Б} = C_{Б}^{-}(X1^{P})\cdot\left[Y1^{изм} - F(X1^{P}) - R_{1}\right] + \Delta X_{апр}, \quad (5)$$

где

$$C_{Б}^{-}(X1^{P}) = \left[K_{X}^{-1} + C^{T}(X1^{P})\cdot K_{\Delta Y}^{-1}\cdot C(X1^{P})\right]^{-1}\cdot$$
$$\cdot C^{T}(X1^{P})\cdot K_{\Delta Y}^{-1} \quad (6)$$

– обобщенная обратная матрица.

Таким образом, получена эквивалентная СНАУ (4), результатом решения которой является нелинейная оптимальная оценка искомых параметров акселерометров.

Так как эквивалентная СНАУ (4) записана в векторно-матричной форме, то для ее решения необходимо применить численный метод, исключив из итерационного процесса остаточный член R_{1}, поскольку он близок к нулю. Сущность данного метода заключается в организации итерационного процесса вида [3]:

$$X1^{(K+1)} = X1^{(K)} + X^{(K)}(X1^{(K)}) + \Delta X^{(K)}(X1^{(K)})_{апр}, \quad (7)$$

где $K = 0,1,2,3,\ldots$ – номер приближения;
$X1^{(K+1)}$ – первое приближение оцениваемых параметров;
$X1^{(K)}$ – заданное начальное приближение оцениваемых параметров;
$X^{(K)}(X1^{(K)})$ – начальная оптимальная оценка отклонения действительного значения искомых параметров $X1$ от заданного их значения $X1^{P}$;

$$\Delta X^{(K)}(X1^{(K)})_{апр} = \left[K_{X}^{-1} + C^{T}(X1^{(0)})\cdot K_{\Delta Y}^{-1}\cdot\right.$$
$$\left.\cdot C(X1^{(0)})\right]^{-1}\cdot K_{X}^{-1}\cdot m_{X}$$

– поправка к оптимальной линейной оценке параметров с априорной информацией за счет заданной априорной информации, соответствующая начальному приближению оцениваемых параметров $X1^{(0)}$.

Для начала итерационного процесса (7) необходимо задать начальное приближение $\hat{X}_{МНК}^{(0)}, \hat{X}_{Б}^{(0)}$. Наиболее целесообразно в качестве начального приближения использовать линейную оптимальную оценку, определяемую по формуле [3]:

$$\hat{X}_{Б}^{(0)} = C_{Б}^{-}\cdot Y + \Delta\hat{X}_{апр}. \quad (8)$$

Точность итерационного процесса (7) определяется условиями:

$$\left\|\hat{X}_{Б}^{(K+1)} - \hat{X}_{Б}^{(K)}\right\| \le \varepsilon. \quad (9)$$

где ε – заданная точность вычисления нелинейной оптимальной оценки параметров акселерометров.

Остановку итерационного процесса (7) целесообразно проводить при выполнении условий:

$$L\cdot\left\|\hat{X}_{Б}^{(K+1)} - \hat{X}_{Б}^{(K)}\right\| \le \Delta L^{зад}, \quad (10)$$

где $L\cdot\left\|\hat{X}^{(K+1)} - \hat{X}^{(K)}\right\|$ – ошибка промаха по дальности, обусловленная ошибкой оценки параметров акселерометров;
$\Delta L^{зад}$ – заданное значение ошибки промаха по дальности, обусловленной ошибкой оценки параметров акселерометров.

При выполнении условия (10) нелинейная оптимальная оценка параметров акселерометров равна последнему приближению:

$$\hat{X}_{Б}^{opt} = \hat{X}_{Б}^{(K+1)}. \quad (11)$$

Таким образом, цель данной статьи достигнута. Разработана методика комплексной предстартовой калибровки акселерометров с нелинейной оптимальной оценкой их параметров с подвижной точкой разложения в двух положениях ГСП с априорной информацией, определены условия остановки итерационного процесса.

Литература

1. Аксёнов В.Е. Эксплуатационная калибровка КИП автономных систем управления ракет: монография в 3 ч. Ч. 1 / В.Е. Аксёнов. Серпухов: ВА РВСН им. Петра Великого (филиал в г. Серпухове), 2014. 383 с.
2. Аксёнов В.Е. Эксплуатационная калибровка КИП автономных систем управления ракет: моногра-

фия в 3 ч. Ч. 2 / В.Е. Аксёнов, Л.М. Жебрак. Серпухов: ВА РВСН им. Петра Великого (филиал в г. Серпухове), 2014. 334 с.

3. Аксёнов В.Е. Эксплуатационная калибровка КИП автономных систем управления ракет: монография в 3 ч. Ч. 3 / В.Е. Аксёнов, Е.В. Пискулин. Серпухов: ВА РВСН им. Петра Великого (филиал в г. Серпухове), 2014. 180 с.

4. Аксёнов В.Е. Надежность систем управления ракет: учебник в 3 ч. Ч. 1 / В.Е. Аксёнов. Серпухов: ВА РВСН им. Петра Великого (филиал в г. Серпухове), 2013. 408 с.

5. Аксёнов В.Е. Надежность систем управления ракет: учебник в 3 ч. Ч. 2 / В.Е. Аксёнов, Л.М. Жебрак. Серпухов: ВА РВСН им. Петра Великого (филиал в г. Серпухове), 2013. 331 с.

6. Аксёнов В.Е. Надежность систем управления ракет: учебник в 3 ч. Ч. 3 / В.Е. Аксёнов, Е.В. Пискулин. Серпухов: ВА РВСН им. Петра Великого (филиал в г. Серпухове), 2013. 125 с.

7. Аксёнов В.Е. Численный метод оптимальной нелинейной оценки параметров и его приложение для калибровки инерциальных командно-измерительных приборов // Известия Института инженерной физики, 2007. №3(5). С. 2-6.

8. Аксёнов В.Е. Нелинейная оптимальная оценка параметров с подвижной точкой разложения без априорной информации о параметрах // Известия Института инженерной физики, 2011. №4(22). С. 14-20.

9. Аксёнов В.Е. Нелинейная оптимальная оценка параметров с подвижной точкой разложения и с априорной информацией о параметрах // Известия Института инженерной физики, 2012. №3(25). С. 54-62.

10. Аксёнов В.Е. Оптимизация режима измерения с оптимальным распределением заданного временного ресурса между положениями ГСП для комплексной предстартовой калибровки акселерометров без априорной информации об оцениваемых параметрах // Известия Института инженерной физики, 2013. №1(27). С. 30-33.

11. Аксёнов В.Е. Математическая модель комплексной предстартовой калибровки акселерометров с нелинейной оптимальной оценкой их параметров при подвижной точке разложения и без априорной информации // Известия Института инженерной физики, 2015. №3(37). С. 44-49.

12. Пирумов У.Г. Численные методы: учебник и практикум для академического бакалавриата. М.: Издательство Юрайт, 2014. 421 с.



УДК 538.958

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ОПТИЧЕСКИ ДЕТЕКТИРУЕМОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА В КРИСТАЛЛЕ АЛМАЗА С ПРИМЕСЯМИ АЗОТА

EXPERIMENTAL OBSERVATION OF OPTICALLY DETECTED MAGNETIC RESONANCE IN THE CRYSTAL DIAMOND WITH NITROGEN IMPURITIES

Александр Николаевич Васильев
доктор физико-математических наук, профессор
профессор кафедры
Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт»
Адрес: 115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31
Тел.: +7(495)788-56-99
E-mail: alexander.vasiliev@ihep.ru

Сергей Владимирович Смуров
доктор технических наук, профессор
Первый заместитель Генерального директора по научной работе – главный конструктор
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: svs_iif@mail.ru

Павел Александрович Семёнов
кандидат физико-математических наук, доцент
профессор кафедры
Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт»
Адрес: 115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31
Тел.: +7(495)788-56-99
E-mail: Pavel.Semenov@ihep.ru

Николай Сергеевич Кукин
кандидат технических наук
начальник лаборатории
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93, доб. 305
E-mail: n.s.kukin@mail.ru

Алексей Александрович Бухтияров
инженер-программист
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: ab606@iifmail.ru

Денис Олегович Капусткин
инженер-программист
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: dk606@iifmail.ru

Аннотация

В статье представлено описание разработанной в МОУ «Институт инженерной физики» лабораторной установки для проведения систематических исследований квантовых свойств NV-центров в алмазах. Представлены также результаты измерений зависимости контрастности оптически детектируемого магнитного резонанса от частоты СВЧ и интенсивности возбуждающего лазера.

Ключевые слова: квантовые системы, NV-центры в алмазе, оптически детектируемый магнитный резонанс.

Summary

The article contains the description of the experimental setup at the Interregional public institution “Institute of Engineering Physics” designed for a systematic study of the diamond NV-centers quantum properties. Results of the optically detected magnetic resonance signal dependence on microwave frequency and excitation laser intensity are also presented.

Keywords: quantum systems, NV-centers in diamond, optically detected magnetic resonance.

Введение

Ряд задач квантовой информатики требуют наличие между квантовыми объектами нелокальной связи, т.е. их нахождения в запутанном состоянии, когда свойства объектов зависят друг от друга. Такая взаимозависимость сохраняется даже если эти объекты разнесены в пространстве за пределы любых известных взаимодействий, что находится в логическом противоречии с принципом локальности. К сожалению, необычное поведение квантовых объектов в пространстве – квантовую нелокальность – нельзя объяснить с позиций привычных пространственных интуиций здравого смысла, обычно присутствующих в нашем классическом макромире. Это чисто квантовый эффект.

Помимо наличия запутанных состояний для практического применения необходимо взаимодействие квантовых объектов с фотонами. Но в этом случае квантовые системы становятся чувствительны к влиянию окружения, взаимодействие с которым приводит к быстрой декогеренции. Наиболее перспективные с точки зрения масштабируемости кубиты на основе твердотельных квантовых систем в наибольшей степени подвержены декогеренции. Для снижения времени декогеренции эксперименты с твердотельными квантовыми системами приходится проводить при сверхнизких температурах. Одними из исключений, допускающими работу при комнатной температуре в течение довольно долгого времени – порядка нескольких миллисекунд, являются *NV*-центры (или *NV*-дефекты) в алмазе.

Фундаментальные исследования на NV-центрах в алмазах ведутся во многих лабораториях мира. Уже есть и практическое применение результатов этих исследований, например, магнитные датчики сверхвысокой чувствительности и уникальные маркеры [1]. Существует возможность работать при комнатной температуре с одиночными дефектами. Отмечается многообещающее поведение (длительное сохранение когерентности) для применений в технологиях квантовой информатики для построения кубитов. В России лабораторий, ведущих исследования в этой области, крайне мало. Известна теоретическая группа из ФТИАН (Москва). Наиболее продвинутые экспериментальные исследования ведутся в лаборатории ФТИ им. Иоффе (Санкт-Петербург) под руководством профессора П.Г. Баранова, но они, в основном, касаются материаловедения.

Алмаз имеет кубическую кристаллическую структуру с сильными ковалентными связями атомов углерода. Азотно-вакансионные дефекты (NV-дефекты) представляют собой вакансию углерода (V), в ближайшей координационной сфере которой один из четырех атомов углерода заменен атомом азота (N). Открыто излучающее свойство NV-центров в алмазе, позволяющее оптически регистрировать магнитный резонанс в основном состоянии NV-центров при комнатной температуре. В данной работе описана разработанная и созданная в МОУ «Институт инженерной физики» лабораторная установка для наблюдения оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР) [2, 3] в кристалле алмаза с NV-центрами и представлены результаты наблюдения.

1. Лаборатория

Создана лаборатория для систематических учебно-научных работ в области квантовой информатики. Основа выбранной технологии – реализация кубитов на NV-центрах в алмазах.

С самого начала лаборатория оснащалась с целью работы с системой удаленных друг от друга кубитов. Схема размещения и организации взаимодействия оборудования предусматривает расширение измерений на несколько кубитов для проведения исследований с прототипами квантовых регистров. В составе оборудования – конфокальные микроскопы, в том числе с субдифракционным разрешением, лазеры для инициализации и считывания состояния кубитов на NV-центрах и СВЧ генераторы для управления состоянием кубитов на NV-центрах.

Конфокальные микроскопы от НТ-МДТ (г. Зеленоград) и Sol Instruments (г. Минск) позволяют проводить исследования с отдельными кубитами на NV-центрах. В микроскопах предусмотрены по два канала возбуждения 532 нм и 637 нм, а также канал регистрации >630 нм. Для локализации отдельного NV-центра в произвольном образце в одном из микроскопов предусмотрен модуль субдифракционного разрешения на технологии стимулированного подавления эмиссии STED.

Лазер 532 нм используется для инициализации кубита в исходное состояние с проекцией спина m=0. На начальном этапе этот же лазер возбуждает электрон NV-центра для регистрации состояния кубита с помощью метода ОДМР. В составе оборудования лаборатории предусмотрен подстраиваемый лазер с центральной длиной волны 637 нм для резонансного возбуждения NV-центра. Для разделения каналов возбуждения и регистрации в схеме используется фильтрация по времени, для чего в оптической схеме установлены акусто-оптические и электронно-оптические модуляторы. Дополнитель-

ная фильтрация в микроскопе реализована с помощью поляризаторов.

СВЧ генератор с импульсной модуляцией и диапазоном до 3.2 ГГц позволяет управлять состояниями кубита. Собственно регистрация сигнала методом ОДМР происходит с помощью счетчиков одиночных фотонов и многоканального время-цифрового преобразователя с точностью регистрации времени до 80 пс. Последовательность измерений и преобразований контролируется генератором сигналов произвольной формы с частотой дискретизации 1200 MS/s.

2. Метод ОДМР

NV-центр в алмазе – это один из точечных дефектов алмаза. Дефект представляет собой нарушение строения кристаллической решетки алмаза, возникающий при удалении атома углерода из узла решетки и связывания, образовавшейся вакансии, с атомом азота.

Уникальность дефекта заключается в том, что его свойства практически аналогичны свойствам атома, «замороженного» в кристаллической решетке алмаза. Электронные спины индивидуального центра легко манипулируются светом, магнитным, электрическим и микроволновыми полями, что позволяет записывать квантовую информацию на спине ядра центра. Такая манипуляция возможна даже при комнатной температуре. Центр имеет продолжительное, достигающее нескольких миллисекунд, время хранения наведенной спиновой поляризации. На *рисунке 1* показана известная схема энергетических уровней NV-центра.

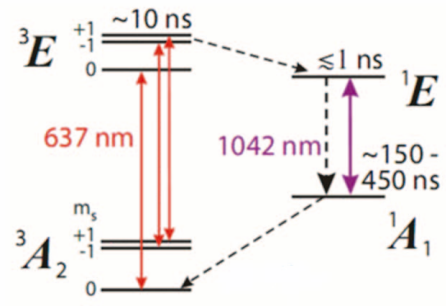


Рис. 1. Схема энергетических уровней NV-центра. Электронные переходы между основными ^3A и возбужденными ^3E состояниями определяют спектр поглощения и люминесценции (637 нм). Числа 0, ±1 обозначают величину проекции спина. Расстояние между уровнями $m_s = 0$ и $m_s = \pm 1$ приходится на микроволновый диапазон (~2.88 ГГц).

В качестве метода работы с кубитами на NV-центрах в кристаллах алмаза выбран ОДМР, который является расширением методов ЭПР-спектроскопии, и обеспечивает на порядки большую чувствительность. ОДМР можно считать гибридом ЭРП и фотолюминесценции.

Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), открытый Е.К. Завойским в Казани в 1944 году, известен как один из наиболее мощных методов в экспериментальной физике при изучении дефектов в твердом теле. Спектроскопия ЭПР исследует взаимодействия магнитной компоненты электромагнитного поля с магнитными моментами, имеющимися в веществе: магнитными моментами неспаренных электронов и ядерными магнитными моментами. Однако, вследствие недостаточной чувствительности традиционного метода ЭПР, в котором регистрируется резонансное поглощение энергии микроволнового поля, обусловленное переходами между квантовыми подуровнями, его применение для изучения возбужденных состояний сильно ограничено, поскольку в таких системах в среднем по времени имеется малое число неспаренных спинов. Ограничения применимости ЭПР для исследования низко-размерных систем связано как с недостаточной чувствительностью (слишком малый активный объем образца), так и с отсутствием пространственной селективности (регистрируются сигналы всех парамагнитных центров в образце, включая подложку).

Использование ОДМР [4] дает возможность сочетать высокое энергетическое разрешение и информативность ЭПР с такими достоинствами оптической спектроскопии, как высокая чувствительность и пространственная селективность.

В методе ОДМР регистрируется не прямое поглощение микроволнового поля (как в методе ЭПР), а влияние ЭПР-переходов на изменения в поглощении или излучении света. В случае, когда поглощение или излучение света зависит от спинового состояния, изменение населенности спинового подуровня, вызванное поглощением одного СВЧ кванта, приводит к изменению поглощения или излучения света на один оптический фотон, энергия которого в 10 000 раз больше.

На схеме энергетических уровней NV-центра (рисунок 1) квант с частотой 2.87 ГГц переводит электрон из основного состояния $^3A_2$ с проекцией спина 0 в состояние $^3A_2$ с проекцией спина ±1. Лазер 532 нм переводит электрон из основного состояния $^3A_2$ в возбужденное состояние ^3E. Проекция спина при этом не меняется. Если электрон был в состоянии $^3A_2$ с проекцией спина 0, то он попадает на возбужденный уровень ^3E также с проекцией спина 0 и за счет излучения 637 нм возвращается обратно. Если же

электрон подхватился лазером в состоянии $^3A_2$ с проекцией спина ±1 (куда он попал в результате работы генератора 2.87 ГГц), то он попадет на возбужденный уровень ^3E с проекцией спина ±1 и обратно вернется на основной уровень через правую часть рисунка 1 без люминесценции. Этот переход осуществляется в два этапа - через синглетное состояние ^1A. Переходы между электронными состояниями происходят с сохранением полного спина. По этой причине переходы $^3E \leftrightarrow {}^1A$ и $^1A \leftrightarrow {}^3A$ идут без излучения и тушат люминесценцию. Подавление мощности люминесценции и измеряется в методе ОДМР.

Методом ОДМР регистрируются спектры магнитного резонанса и сохраняются высокое разрешение и информативность ЭПР, при этом чувствительность сопоставима с чувствительностью оптических методов. Каналы резонанса (микроволновый) и регистрации (оптический) оказываются развязанными, и кроме присущей оптике пространственной селективности метода появляется дополнительная возможность разрешения перекрывающихся спектров выбором соответствующей длины волны регистрации.

3. Постановка эксперимента

Для проверки работы установленного оборудования и освоения методики исследований с использованием NV-центров, было проведено измерение контрастности ОДМР в области вблизи резонансной частоты 2.87 ГГц. В отличие от измерений в лаборатории Баранова (ФТИ им. Иоффе), который использовал постоянный ток с фотодетектора и преобразование аналоговых сигналов на синхронном детекторе, измерения в лаборатории ИИФ были проведены с использованием счетчика одиночных фотонов и время-цифрового преобразователя (ВЦП). Такая постановка измерений обеспечивает выход на работу с одиночным NV-центром, как с кубитом.

Временная диаграмма синхронизации измерений представлена на *рисунке 2*. Сигнал со счетчика одиночных фотонов регистрировался многоканальным время-цифровым преобразователем ($ВЦП_1$). Времена прихода сигнала со счетчика запоминались в буферной памяти ВЦП. По второму каналу ($ВЦП_{2)}$ регистрировались времена прихода синхроимпульса от управляющего генератора. Этим же синхроимпульсом запускался импульсный модулятор СВЧ генератора. Скважность модулирующих синхроимпульсов составляла 50%. Лазер 532 нм в постоянном режиме возбуждал флуоресценцию ансамбля NV-центров в образце алмаза. В течение всего периода синхроимпульса регистрировались фотоны в диапазоне длин волн 635-665 нм, выделяемом дифракционной решеткой спектрометра. Таким образом, за один период измерений ($T_{изм}$) регистрировалась интенсивность флуоресценции как без воздействия СВЧ поля, так и с ним ($T_{свч}$). Метки времени, зарегистрированные ВЦП, позволяли точно распределить фотоны внутри периода синхроимпульса. Разность интенсивности регистрации фотонов в первую половину и во вторую определяет контрастность ОДМР. Период сигнала синхронизации составлял 250 мс, время набора 10 с. Таким образом, статистика составляла от одной до нескольких тысяч фотонов за половину периода синхроимпульса. Это обеспечивало статистическую ошибку измерений в пределах не более 1%. Синхронный метод детектирования позволил улучшить отношение сигнал-шум и подавить систематическую ошибку, связанную с механическими уходами в оптическом тракте.

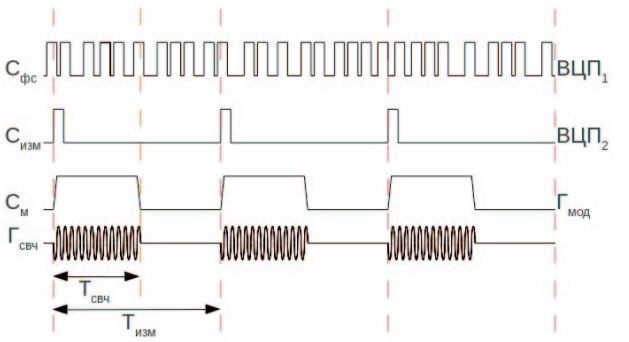


Рис. 2. Диаграмма синхронизации измерений. $С_{фс}$ – выходной сигнал счетчика фотонов, $С_{изм}$ – сигнал синхронизации измерений, который задает период измерения и совпадает с началом модулирующего импульса $С_м$, подаваемого на вход внешней модуляции генератора СВЧ $Г_м$. Импульсная модуляция формирует сигнал на выходе СВЧ генератора $Г_{СВЧ}$.

4. Результаты и обсуждение

Полученные результаты измерений контрастности ОДМР представлены на *рисунке 3*. Представлен относительный контраст ОДМР, вычисленный как:

$$K = \frac{C_{mw} - C}{C} \times 100\%,$$

где C_{mw} – интенсивность люминесценции при включенном СВЧ поле на образце алмаза;
C – интенсивность люминесценции без СВЧ поля.

Также были измерены зависимости сигнала ОДМР (контрастности) от мощности лазера накачки и мощности СВЧ излучения. Из зависимости сигнала ОДМР от мощности лазера накачки на *рисунке 4*. видно, что оптимум находится при меньшем управляющем напряжении аку-

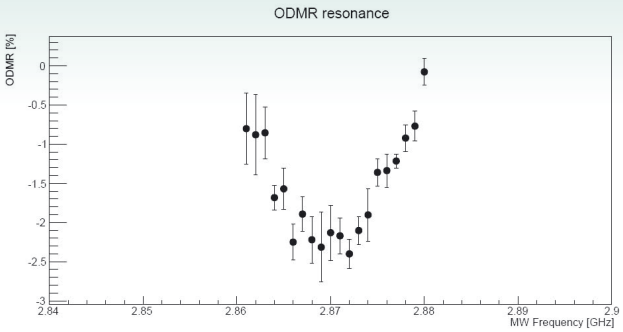


Рис. 3. Сигнал ОДМР. По оси X отложена частота СВЧ генератора в области резонанса, соответствующего переходу между уровнями NV-центра.

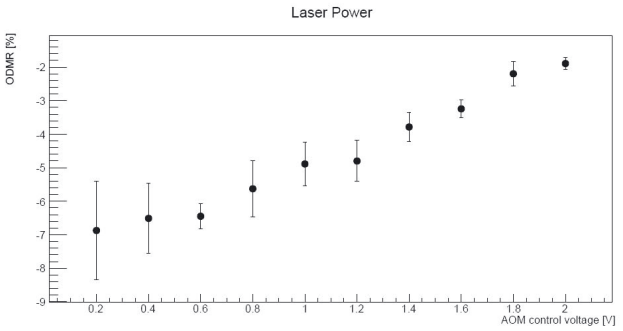


Рис. 4. Зависимость сигнала ОДМР от напряжения на акустооптическом модуляторе (AOM). Интенсивность лазера возбуждения прямо пропорциональна напряжению на AOM.

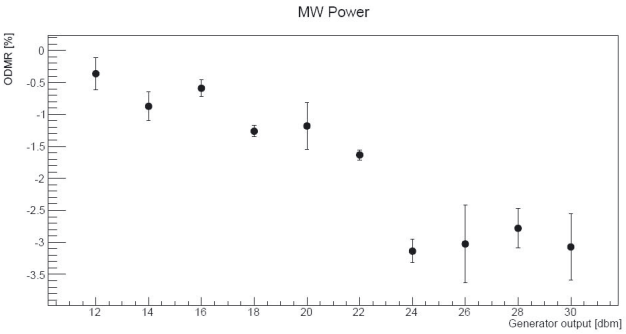


Рис. 5. Зависимость сигнала ОДМР от мощности СВЧ генератора

стооптического модулятора, пропорциональном интенсивности возбуждения NV-центра.

Такое поведение сигнала ОДМР объясняется побочным эффектом возбуждения NV-центра зеленым лазером – инициализацией квантовой системы в состояние с проекцией спина $m_s=0$ (*рисунок 1*), для которого характерен высокий уровень люминесценции, что приводит к уменьшению контраста ОДМР.

Повышение мощности выходного сигнала СВЧ генератора приводит к ожидаемому эффекту увеличения контраста ОДМР (*рисунок 5*). Выход СВЧ генератора ограничен уровнем 30 dBm (около 400 мВт). Здесь также видна возможность увеличения контраста ОДМР с помощью внешнего усилителя, оптимизацией потерь сигнала в кабеле и выбором более эффективной конфигурации излучателя (резонатора).

Следует отметить, что полученный контраст ОДМР в 3-7% меньше опубликованных данных по NV-центрам. Объяснением может быть недостаточная мощность СВЧ и неоптимальная конфигурация резонатора. Кроме того, в образце алмаза, который использовался для данных измерений, довольно высокая концентрация NV-центров. Отдельные NV-центры нами обнаружены не были. Таким образом, измерения проводились на ансамбле NV-центров, что также снижает контраст ОДМР.

Заключение

В данной работе представлено описание разработанной в МОУ «Институт инженерной физики» лабораторной установки для исследования оптически детектируемого магнитного резонанса в кристалле алмаза с NV-центрами. Представлены результаты зависимости контрастности ОДМР от частоты СВЧ и интенсивности возбуждающего лазера.

Технология NV-центров в алмазах является одной из самых перспективных технологий для квантовой информатики. Создана лаборатория для систематического исследования свойств NV-центров в кристаллах алмаза для целей квантовой информатики. Надежное наблюдение ОДМР дает начало широкой программы исследований кристаллов алмаза с дефектами в виде NV-центров в этой лаборатории.

Литература

1. Цуканов А.В. NV-центры в алмазе. Часть III: Квантовые алгоритмы, масштабирование, гибридные системы // Микроэлектроника, 2013. Т. 42. №1. С. 3-18.

2. Cavenett B.C. Optically detected magnetic resonance (O.D.M.R.) investigations of recombination processes in semiconductors // Adv. Phys., Vol. 4, 1981. pp. 475-538.

3. Baranov P.G. and Romanov N.G. ODMR Study of Recombination Processes // Applied Magnetic Resonance, Vol. 2, 1991. pp. 361-378.

4. Гурин А.С. Исследование полупроводниковых кристаллов и наноструктур A_2B_6C магнитными примесями методом оптически детектируемого резонанса. Дисс… канд. физ.-мат. наук. ФТИ им. Иоффе РАН (Санкт-Петербург), 2015.

УДК 621.397.335

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ СИНХРОНИЗАЦИИ В ЛЧМ СИГНАЛАХ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТИВНОЙ СИНГУЛЯРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

IMPROVING THE ACCURACY OF SYNCHRONIZATION CHIRP SIGNALS BASED ON THE USE OF ADAPTIVE FILTERING SINGULAR

Сергей Николаевич Шиманов
доктор технических наук, профессор
ведущий научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93

Владимир Анатольевич Цимбал
заслуженный деятель науки РФ
доктор технических наук, профессор
ведущий научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,
Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93

Виктор Анатольевич Прасолов
кандидат технических наук
начальник управления АСУ и связи
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93

Сергей Викторович Франков
аспирант
научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93

Сергей Юрьевич Бобрус
научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93

Аннотация

В статье описана модуляция и демодуляция ЛЧМ сигнала, основывающиеся на гетеродинном преобразовании, на примере LoRa модуляции. Приведена оценка точности синхронизации ЛЧМ сигнала в условиях наличия аддитивного шума в канале связи, выражаемая частотной ошибкой гетеродинного преобразования. Предложен способ для повышения точности тактовой синхронизации гетеродина в ЛЧМ сигнале на основе алгоритма адаптивной сингулярной фильтрации. Проведено численное моделирование и сравнение точности тактовой синхронизации гетеродина при оптимальной фильтрации на основе FFT преобразования и адаптивной сингулярной фильтрации. Показано повышение точности тактовой синхронизации гетеродина при использовании последней в широком диапазоне SNR.

Ключевые слова: широкополосные сигналы, линейная частотная модуляция, адаптивный сингулярный фильтр, белый Гаусовский шум, синхронизация, гетеродинное преобразование.

Summary

The article describes the modulation and demodulation of chirp signal based on heterodyne conversion, the example of modulation LoRa. The estimation accuracy of the chirp signal timing under the presence of additive noise in the communication channel, frequency error expressed heterodyne conversion. A method for improving the accuracy of clock oscillator to chirp signal based on the algorithm of adaptive filtering singular. The numerical simulation and comparison precision clock oscillator at an optimum filtration based on the FFT and adaptive filtering singular. Results improved accuracy clock oscillator by using the latest in a wide range of SNR.

Keywords: broadband signals, linear frequency modulation, adaptive singular filter, white noise Gause, synchronization, heterodyne conversion.

Одним из способов повышения помехоустойчивости является использование сигналов с большой базой ($B=\Delta F \cdot T \gg 1$, ΔF – ширина спектра, T – интервал модуляции) [1], таких как фазоманипулированные шумоподобные сигналы (ФМ-ШПС), сигналы с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ), дискретно-частотные сигналы (ДЧС). Рассмотрим сигнально-кодовую конструкцию с расширением спектра на основе линейной частотной модуляции (ЛЧМ) – на примере LoRa модуляции (англ. LongRange) [2, 3].

Данный способ предполагает использование технологии расширения спектра, при которой данные кодируются широкополосными ЛЧМ импульсами с частотой, увеличивающейся или уменьшающейся в диапазоне ΔF на некотором интервале модуляции T, причем $\Delta F \gg 1/T$. Получаемый широкополосный сигнал обеспечивает большую помехоустойчивость сигнала к канальному шуму, частотно-селективным помехам и замираниям по сравнению с узкополосными сигналами. Несомненным достоинством ЛЧМ широкополосных сигналов является энергетическая равномерность использования спектра на длительности каждого передаваемого символа. Для передачи информации ЛЧМ сигналами используется начальный частотный сдвиг, причем количество начальных частотных позиций (частотных сдвигов относительно ω_0–ω_{ck}) должно соответствовать объему алфавита передаваемых символов – M ($k=\overline{1,M}$) [3].

Математически ЛЧМ сигнал k-го символа представляется как [4, 5]:

$$\left.\begin{aligned} S_k(t) &= A_0 \cos\left[(\omega_0+\omega_{ck})t+\frac{\beta t^2}{2}\right], \omega_0+\omega_{ck}+\frac{\beta t^2}{2} \le \omega_{\max}, \\ S_k(t) &= A_0 \cos\left[(\omega_0+\omega_{ck}-\omega_T)t+\frac{\beta t^2}{2}\right], \omega_0+\omega_{ck}+\frac{\beta t^2}{2} \ge \omega_{\max}, \end{aligned}\right\}, -\frac{T_s}{2} < t < \frac{T_s}{2}, \quad (1)$$

где A_0 – амплитуда сигнала;

$\beta=2\omega_T/T_\sigma$ – скорость линейного изменения частоты внутри импульса;

T_S – длительность сигнала – интервал модуляции;

$\omega_T = \omega_{max}-\omega_{min}=2\pi\Delta F$.

Графики зависимости длительности символа ЛЧМ символа от ширины спектра сигнала (без сдвига на символьную частоту ω_{ck}) представлены на *рисунках 1* и *2*. Необходимо отметить, что ΔF может быть положительным (*рисунок 1*, частота увеличивается по отношению к F_0) и отрицательным (*рисунок 2*, частота уменьшается по отношению к F_0).

На приемной стороне сигнал подвергается стандартному гетеродинному преобразованию с низкочастотной фильтрацией

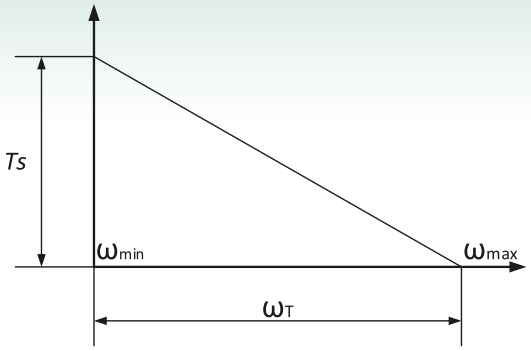


Рис. 1. График зависимости длительности символа ЛЧМ символа от ширины спектра сигнала, $\Delta F>0$

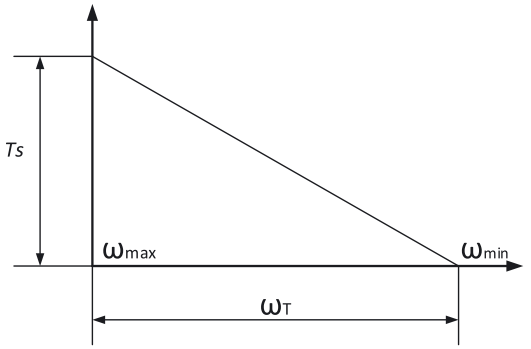


Рис. 2. График зависимости длительности символа ЛЧМ символа от ширины спектра сигнала, $\Delta F<0$

$$S_p(t)=S_k(t)\cdot S_c(t), \quad (2)$$

где

$$S_c(t) = A_0\left[\cos\left(\omega_0 t+\frac{\beta t^2}{2}\right)+ j\sin\left(\omega_0 t+\frac{\beta t^2}{2}\right)\right], -\frac{T_s}{2} < t < \frac{T_s}{2}. \quad (3)$$

Пусть непрерывные компоненты (2) и (3) на интервале $-T_S/2 < t < T_S/2$ представлены дискретно в виде временных отсчетов интервалом дискретизации $\tau \le 1/2F_{max}$, определяемым максимальной частотой сигнала – $F_{max}=\omega_{max}/2\pi$. В этом случае гетеродинное преобразование может быть представлено в виде:

$$S_{pi}=S_{ki}\cdot S_{ci}, \quad (4)$$

где $S_{pi}=S_k(i\tau)$, $S_{ki}=S_k(i\tau)$, $S_{ci}=S_c(i\tau)$, $i=\overline{0,T_S/\tau}$.

Тогда отсчеты гетеродина в комплексной форме могут быть представлено как:

$$S_{ci} = A_0\left\{\cos\left[\omega_0(i\tau)+\frac{\beta(i\tau)^2}{2}\right]+ j\sin\left[\omega_0(i\tau)+\frac{\beta(i\tau)^2}{2}\right]\right\}, 0 < i < \frac{T_s}{\tau}. \quad (5)$$

Результатом гетеродинного преобразования сигнала (2) с учетом (4) и (5) будет комплексный сигнал

$$S'_{ki} = \frac{A_0}{2}\left\{\cos\left[\omega_{ck}\left(i\tau'\right)\right] + j\sin\left[\omega_{ck}\left(i\tau'\right)\right]\right\}, 0 < i < \frac{T_s}{\tau}, \quad (6)$$

где τ – интервал децимированной частоты дискретизации с учетом комплексного представления сигнала на выходе гетеродина

$$\Delta F'_d = \frac{1}{\tau'} \geq \Delta F. \quad (7)$$

Таким образом, на выходе гетеродинного преобразования получаются синфазная – I и квадратурная – Q составляющие сигнала, представляющего собой сигнал с многопозиционной частотной манипуляцией и нулевой несущей, имеющий $N=T_s/\tau$ отсчетов.

В процессе гетеродинного преобразования может возникнуть ситуация, когда в спектрально-временной области ЛЧМ сигнал доходит до крайней верхней частоты $F_1=F_{max}$, скачком изменяется до $F_0=F_{max}-\Delta F$ и продолжает увеличиваться или уменьшаться в зависимости от ΔF (*рисунок 3*).

Компенсировать такое поведение можно посредством уменьшения частоты дискретизации сигнала в 2 раза. Это позволит «завернуть» сигнал в спектральной области и восстановить его целостность (*рисунки 4* и *5*).

Необходимо отметить, что уменьшение частоты дискретизации необходимо проводить после свертки сигнала (*рисунок 4*). Другими словами, после гетеродинного преобразования.

Несложно заметить, что минимальная база в рассматриваемом ЛЧМ сигнале определяется

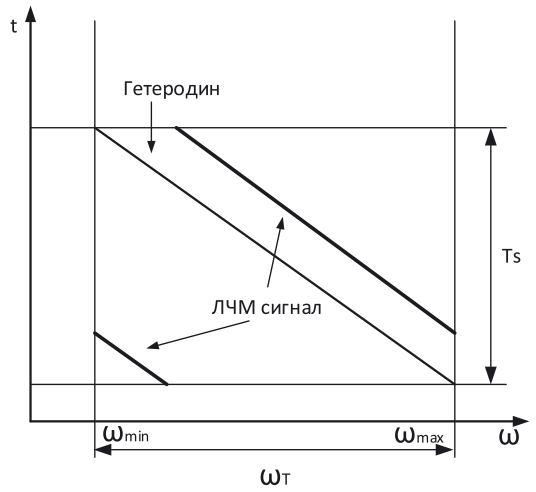


Рис. 3. Спектр ЛЧМ сигнала и гетеродина

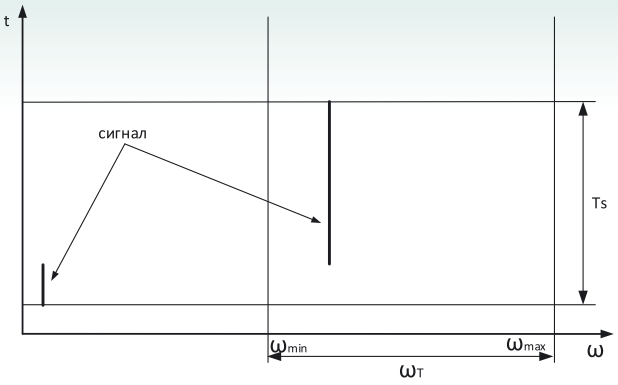


Рис. 4. Гетеродинная свертка ЛЧМ сигнала

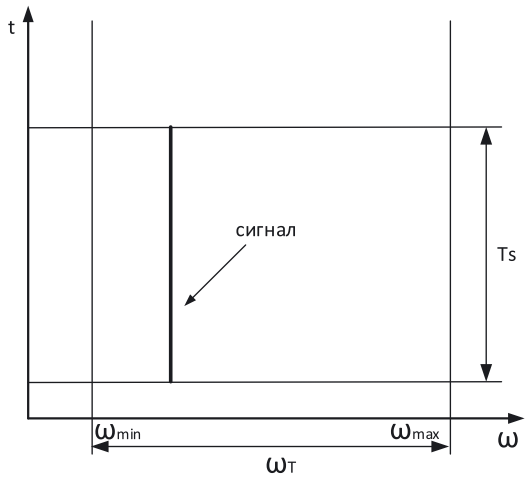


Рис. 5. Свертка ЛЧМ сигнала после децимации

объемом алфавита сигнала M. С учетом частотной манипуляции (7) алфавит сигнала, по сути, определяет минимально допустимое разрешение быстрого дискретного преобразования Фурье (FFT преобразования) – число частотных отсчетов преобразования. Для получения амплитудно-частотного разрешения FFT равного M необходимо иметь минимум M комплексных отсчетов сигнала на его длительности с интервалами

$$\tau' = 1/\Delta F. \quad (8)$$

Следовательно, максимальная скорость модуляции – минимальная длительность символа

$$T_{smin} = M\cdot\tau'. \quad (9)$$

Тогда минимальная база такого ЛЧМ сигнала равна

$$B_{min} = T_{smin}\cdot\Delta F = M\cdot\tau'\cdot\Delta F = M. \quad (10)$$

Полученное значение соответствует базе сигналов с многопозиционной частотной манипуляцией с минимальным сдвигом частоты. Однако отличием ЛЧМ сигналов является равномерное использование каждым передаваемым символом всей предоставленной полосы частот ΔF,

за счет чего достигается повышение их помехоустойчивости. Таким образом, максимальная скорость передачи информации в канале ЛЧМ сигнала с полосой частот ΔF (без помех) равна

$$V_{\max} = \frac{1}{T_{s\min}}\log_2 M = \frac{1}{M\tau'}\log_2 M = \\ = \frac{\Delta F}{M}\log_2 M = \frac{\Delta F}{B}\log_2 M \quad , \qquad (11)$$

что полностью соответствует соотношению $B=\Delta F\cdot T \gg 1$.

При заданном объеме алфавита сигналов - M увеличение ΔF при сохранении минимального значения длительности символа – T_{Smin}, или, наоборот, увеличение T_S больше минимального при заданной ΔF, а также увеличение и того и другого относительно (9) и (10) увеличивает базу сигнала, что соответственно повышает его помехоустойчивость.

Существенное влияние на помехоустойчивость рассматриваемых ЛЧМ сигналов оказывает точность тактовой синхронизации гетеродина, которая обеспечивается решением задачи устранения временной неопределенности начала передачи символа. Очевидно, что рассогласование по времени сигнала (2) и гетеродина (5) приводит к частотной ошибки гетеродинного преобразования. Покажем это. Пусть временное рассогласование сигналов передатчика и гетеродина составляет Δt. В этом случае дискретные отсчеты сигнала гетеродина на длительности принимаемого сигнала будут иметь вид

$$S_{zi} = A_0\left\{\cos\left[\omega_0\left((i+x)\tau\right)+\frac{\beta\left((i+x)\tau\right)^2}{2}\right]+\right. \\ \left.+\, j\sin\left[\omega_0\left((i+x)\tau\right)+\frac{\beta\left((i+x)\tau\right)^2}{2}\right], 0<i<\frac{T_s}{\tau}\right\}, \qquad (12)$$

где $x=\left\lfloor \Delta t/\tau' \right\rfloor$ – целое число отсчетов, определяемое интервалом рассогласования Δt.

Тогда результатом гетеродинного преобразования будет

$$S'_{ki} = \frac{A_0}{2}\left\{\begin{array}{l}\cos\left[\omega_0\left(i\tau'\right)-\omega_0\left(x\tau'\right)+\frac{\beta\left(x\tau'\right)^2}{2}+\beta x\left(i\tau'\right)\right]+\\ +\, j\sin\left[\omega_0\left(i\tau'\right)-\omega_0\left(x\tau'\right)+\frac{\beta\left(x\tau'\right)^2}{2}+\beta x\left(i\tau'\right)\right]\end{array}\right\}, 0<i<\frac{T_s}{\tau} \\ . \qquad (13)$$

Несложно заметить, что второе и третье слагаемые в аргументах тригонометрических функций не зависят от i и, следовательно, являются фазовыми сдвигами временной неопределенности. А четвертое слагаемое характеризует частотный сдвиг сигнала на выходе гетеродина из-за его временного рассогласования с принятым сигналом. Таким образом, временная неопределенность Δt в гетеродине трансформируется в частотную ошибку

$$\Delta\omega = \frac{\beta\Delta t}{\tau'}. \qquad (14)$$

Синхронизация гетеродина на основе оптимальной цифровой фильтрации преамбулы с $\omega_{ck}=0$ позволяет устранить имевшую место временную неопределенность с точностью

$$\Delta\tau = \Delta t - x\tau' = \Delta t - \left\rfloor\frac{\Delta t}{\tau'}\right\lceil\tau'. \qquad (15)$$

Причем в силу равновероятности момента начала передачи синхронизирующей преамбулы распределение данной ошибки будет равномерным в диапазоне $[-\tau'/2,\ \tau'/2]$. Следовательно, в быстром дискретном преобразовании Фурье при приеме символов сохраняется присутствие частотной ошибки Δf с равномерным распределением в диапазоне $[-1/2\tau',\ 1/2\tau']$. Последнее в условиях сильного флуктуационного шума и помех может оказывать существенное влияние на помехоустойчивость канала связи.

В качестве альтернативы оптимальной фильтрации преамбулы на основе FFT можно рассмотреть адаптивную фильтрацию на основе сингулярного разложения цифровых отсчетов сигнала на выходе гетеродина [6]. Поскольку в основе данного вида разложения лежит метод главных компонент, то его применение к гармоническому сигналу с неизвестной частотой на фоне шума позволяет эффективно выделять данное колебание в виде главной компоненты разложения. Проведенные исследования показывают, что такой адаптивный фильтр при соизмеримой с рассматриваемой базой сигналов обладает достаточно узкой полосой пропускания (*рисунок 6*) [7, 8].

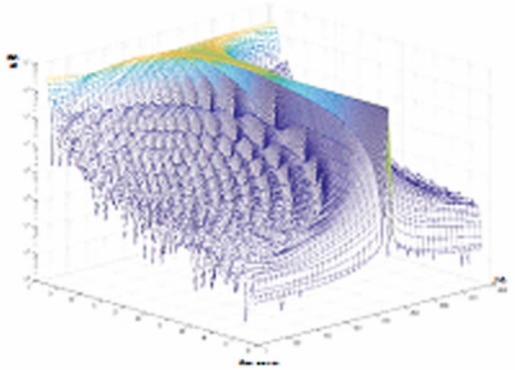


Рис. 6. Зависимость АЧХ адаптивной сингулярной фильтрации от базы фильтруемого сигнала

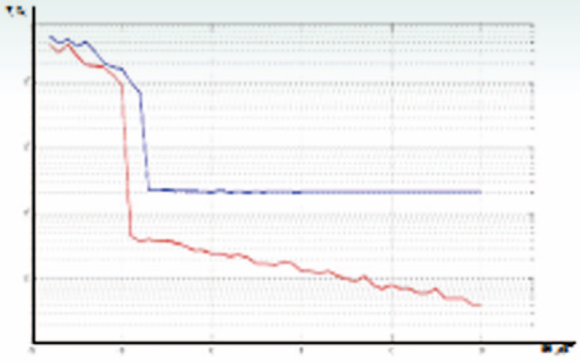


Рис. 7. Зависимость среднеквадратического отклонения частоты сигнала от отношения сигнал/шум. Синий график – отклонение дискретного преобразования Фурье с кратностью 448 Гц. Красный график – среднеквадратическое отклонение главной компоненты адаптивного фильтра на длине символа ЛЧМ.

Причем, чем больше база принимаемого сигнала, тем выше качество адаптивной фильтрации сингулярного разложения сигнала гетеродина. Это объясняется тем, что чем больше полоса ΔF принимаемого сигнала, тем менее коррелированы шумы и помехи данной полосы с чисто гармоническим сигналом (13) на выходе гетеродина.

Сравнительный анализ точности частотной синхронизации оптимальной фильтрации на основе FFT преобразования и адаптивного сингулярного фильтра в различных условиях отношения сигнал/шум (*SNR*) на входе приемника проводился на основе численного моделирования в среде MatLab. В качестве критерия сравнения было выбрано значение среднеквадратического отклонения остаточной частотной ошибки Δf. Результаты моделирования при исходных данных (ΔF=125 *кГц*, T_s=0,002 *сек.*, *частота несущей* – 700 *Гц*) представлены на *рисунке* 7.

Несложно заметить, что указанная погрешность оптимального фильтра на основе FFT преобразования остается неизменной при отношениях сигнал/шум *SNR*>–8*дБ*. Это объясняется равномерностью распределения остаточной частотной ошибки, среднеквадратическое значение которой в условиях малыш шумов $\left\langle \Delta f^2 \right\rangle \approx 0.29\Delta f$.

При меньших значениях *SNR* влияние шума на результат FFT преобразования становится значимым, и ошибка синхронизации существенно возрастает.

Среднеквадратическое значение ошибки синхронизации на основе адаптивной сингулярной фильтрации главной компоненты значительно меньше во всем диапазоне *SNR* (соизмеримо с FFT только на границе рабочего диапазона последней), что говорит о возможном существенном выигрыше в помехоустойчивости дальнейшего этапа приема передаваемых сигналов.

Литература

1. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с., ил.

2. Low power long range transmitter // European patent application ep 2 763 321 A1, 05.02.2013.

3. A frequency and timing synchronization circuit making use of a chirp signal // European patent application ep0 952 713 A2, 23.04.1999.

4. Бонч-Бруевич А.М., Кашпур Е.И. Исследование перспективных технологий цифровой модуляции в системах охранно-пожарной сигнализации // Электронный журнал «Молодежный научно-технический вестник», ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», 2015 // http://sntbul.bmstu.ru/doc/799518.html.

5. Прокис Д. Цифровая связь: пер. с англ. / под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.

6. Шиманов С.Н., Косарева Л.Н., Прасолов В.А., Франков С.В. Сингулярное разложение, как механизм для адаптивной согласованной фильтрации сигнала на фоне белого гауссовского шума // Известия Института инженерной физики, 2015. №2(36). С. 11-15.

7. Шиманов С.Н., Франков С.В. Внутриполосовая фильтрация шума на основе КИХ-фильтров сложной структуры // Сборник трудов международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий – РЕС-2013». Москва, 2013. С. 107-109.

8. Шиманов С.Н., Прасолов В.А., Бобрус С.Ю., Франков С.В. Эффективность внутриполосной фильтрации сигналов, основанной на их сингулярном разложении // Международная конференция «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий – РЕС-2014». Москва, 2014. С. 129-132.



УДК 004.7

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ЗАХВАТА СЕТЕВОГО ТРАФИКА

ANALYSIS OF WAYS TO CAPTURE NETWORK TRAFFIC

Павел Юрьевич Одинцов
технический директор
ООО «ФастВПС.ру».
Адрес: 197375, Санкт-Петербург,
ул. Вербная, д. 27
Тел.: +7(951)680-88-11
E-mail: pavel.odintsov@gmail.com

Семён Валерьевич Суханов
аспирант
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: neron1987@mail.ru

Андрей Константинович Никитин
инженер-программист
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: ex_nik@mail.ru

Аннотация

В статье рассматриваются основные способы захвата сетевого трафика для его дальнейшего анализа. Проведено тестирование рассматриваемых способов по различным критериям. В завершении статьи приведена таблица со сравнительными характеристиками результатов тестирования.

Ключевые слова: трафик, PF_RING, netmap, netFlow, sFlow, pcap, сокет.

Summary

The article discusses the main ways to capture network traffic for further analysis. Testing of the considered methods according to various criteria. At the end of the article is a table with comparative characteristics of the test results.

Keywords: network traffic, F_RING, netmap, netFlow, sFlow, pcap, socket.

Анализ сетевого трафика является одним из важных аспектов в защите информации. С помощью данного анализа можно вовремя обнаружить попытки взлома системы или же отследить утечку информации. Если говорить о комплексном решении задачи анализа сетевого трафика, то в первую очередь следует разделить ее на три, в достаточной степени независимые, подзадачи: перехват трафика, хранение и анализ [1].

Задача захвата сетевого трафика, в отличие от двух других подзадач, является первичной при полученных данных, поэтому ей и посвящена данная статья. Для решения данной задачи используются различные инструменты, которым присущи свои особенности, достоинства и недостатки. При выборе необходимого инструмента разработчики всегда сталкивались с проблемой выбора необходимого средства, однако сравнение и выбор часто происходит на интуитивном уровне, и не всегда оказывается верным. Таким образом, целью данной статьи является сравнительный анализ основных характеристик инструментов захвата сетевого трафика, который наглядно выявит их качества в процессе работы.

В качестве инструментов захвата сетевого трафика в статье рассматриваются:

1) **Netmap** – открытый (opensource) фреймворк, который позволяет работать с пакетами на скоростях 1-10 ГБит/с без использования специализированного оборудования в различных Unix-подобных операционных системах [2].

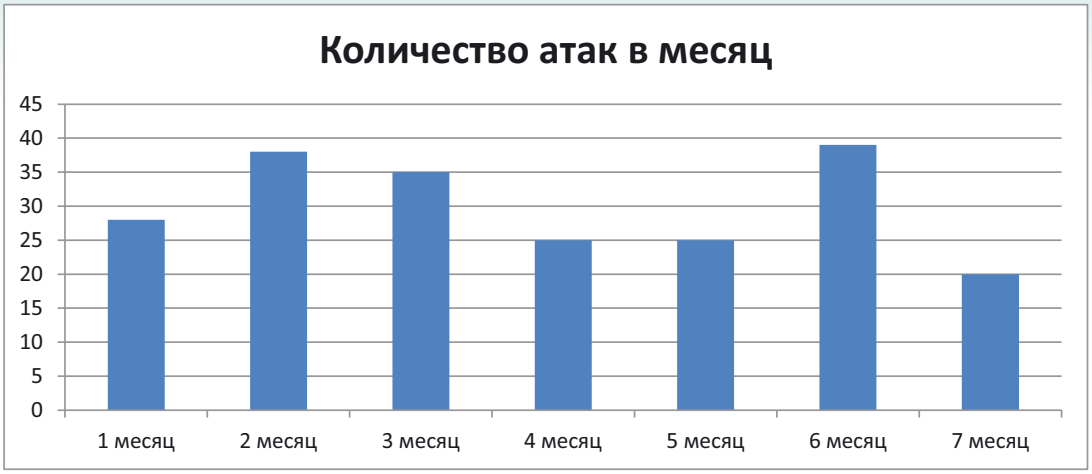


Рис. 1. Количество DDoS-атак по месяцам

2) **PF_RING** – это высокоскоростная библиотека захвата пакетов, которая превращает карту в эффективное и дешевое сетевое устройство, ориентированное для активного анализа трафика и его управления [3]. Является основным инструментом захвата трафика в пассивном снифере ntop(ng).

3) **Data Plane Developer Kit (DPDK)** – это комплект для разработки программного обеспечения, который содержит набор прикладных программных интерфейсов и примеры использования для ускорения сетевой передачи данных посредством переноса важнейших программных функций на аппаратную основу, повышая тем самым пропускную способность и совершенствуя распределение нагрузки между доступными ядрами [4].

4) **NetFlow** – сетевой стандарт, предназначенный для учёта сетевого трафика, разработанный компанией Cisco Systems. Является фактическим промышленным стандартом и поддерживается не только оборудованием Cisco, но и многими другими устройствами (в частности, Juniper, MikroTik и Enterasys) [5]. Также существуют свободные реализации для UNIX-подобных систем.

5) **sFlow** – протокол компании Cisco и предназначен для захвата трафика.

6) **Pcap** (Packet Capture) библиотека, позволяющая создавать программы анализа сетевых данных, поступающих на сетевую карту компьютера [6]. Данная библиотека является одной из наиболее часто используемых для задач мониторинга и тестирования сети.

7) **AF_PACKET** – домен сокета [7], который используется для приема и передачи необработанных пакетов на канальном уровне.

Сравнительный анализ проводился по следующим показателям:

- поддерживаемая скорость сети;
- необходимые требования для установки инструмента;
- степень загрузки центрального процессора при захвате трафика;
- типы операционных систем (ОС), на кото-

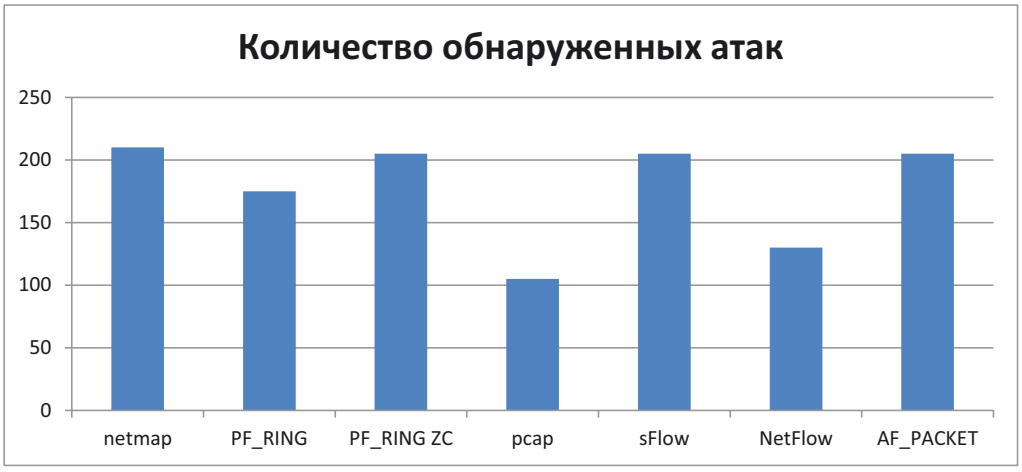


Рис. 2. Количество обнаруженных DDoS-атак каждым инструментом

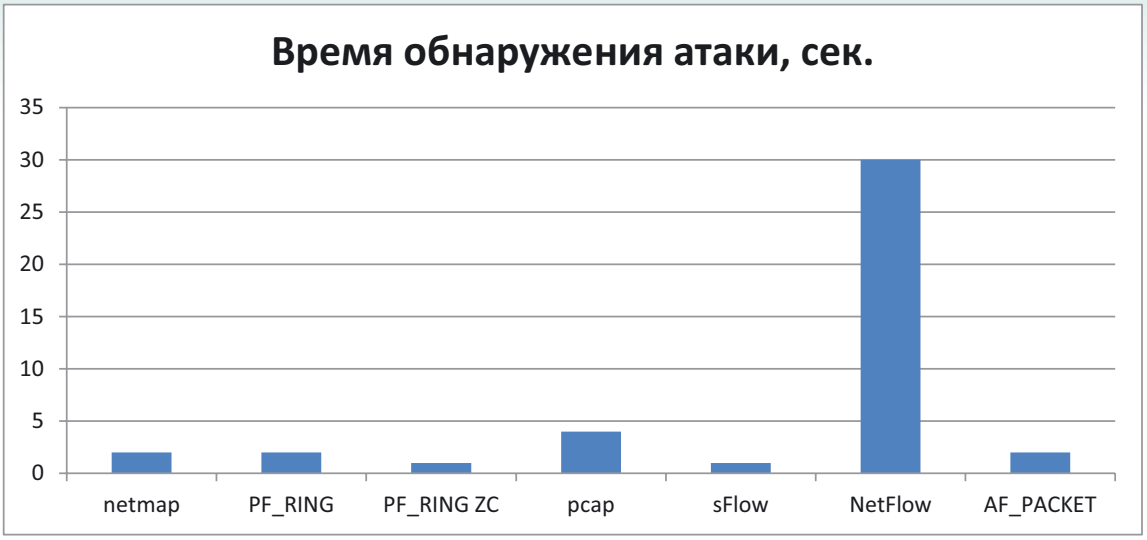


Рис. 3. Скорости обнаружения DDoS-атаки каждым инструментом

рых может функционировать инструмент;

- стоимость инструмента;
- точность обнаружения DDoS-атаки (распределенная атака «отказ в обслуживании»);
- время, необходимое для обнаружения DDoS-атаки.

Каждый инструмент захвата сетевого трафика эксплуатировался в течение 6-ти месяцев на серверах, которые были подключены к сети с пропускной способностью 10 Гбит/сек. Каждый сервер функционировал под различной ОС. Основные технические характеристики сервера: объем оперативной памяти – 32 Гбайт, 8-ми ядерный процессор, видеокарта с объемом памяти – 4 Гбайт.

Установка программного обеспечения была осуществлена в соответствии с инструкциями на каждый инструмент. При этом в некоторых случаях необходимо было переустановить модуль ядра ОС.

Основной функционал каждого инструмента предоставляется бесплатно, а их исходные тексты — открыты. Однако для максимальной эффективности некоторых инструментов необходимы дополнительные лицензии, которые приобретаются на платной основе.

Скорости захвата трафика, которые были указаны в описаниях к инструментам, на практике не всегда соответствовали заявленным.

При обнаружении DDoS-атаки всеми анали-

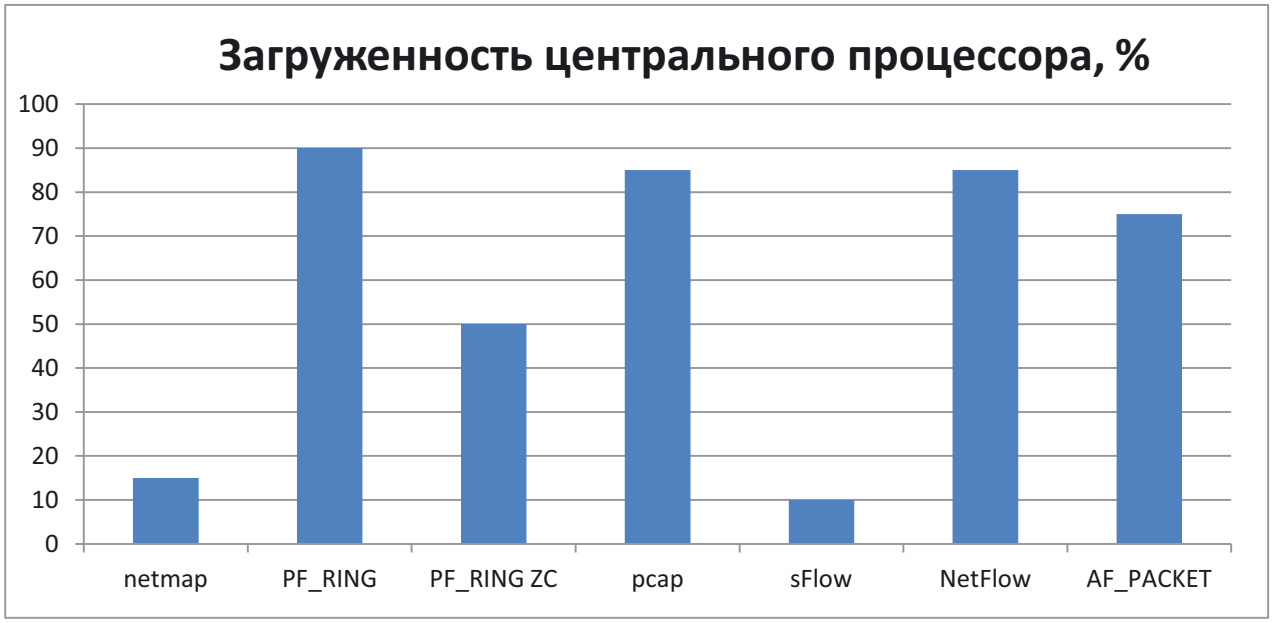


Рис. 4. Загруженность центрального процессора при активной работе инструментов

Таблица 1

Сравнительные характеристики анализируемых способов захвата трафика

Имя утилиты	Скорость захвата	Установка	Степень загрузки ЦП	ОС	Стоимость	Точность обнаружения атаки	Время обнаружения атаки
netmap	10 Гбит, 14 млн пакетов в сек. (Mpps)	необходима переустановка модуля ядра ОС и драйвера сетевой карты ixgbe. Для FreeBSD необходимо пересобрать ядро ОС	низка загрузка	Linux, FreeBSD	бесплатно для Linux, для FreeBSD необходима лицензия BSD	высокая точность	минимальное
PF_RING	2-3 Mpps, 2-3 Гбит	необходима переустановка модуля ядра ОС	высокая загрузка	Linux	лицензия GPLv2	средняя точность	минимальное
PF_RING ZC	10 Гбит, 14 Mpps	необходима переустановка модуля ядра ОС и изменение драйвера сетевой карты	средняя загрузка	Linux	200 евро на 1 MAC-адрес	высокая точность	минимальное
pcap	очень медленная, 10-100 Мбит	не требуются дополнительные настройки	высокая загрузка	FreeBSD, Linux, Windows	лицензия GPL	низкая точность	минимальное
sFLOW	10 Гбит	не требуются дополнительные настройки	низкая загрузка	Linux, FreeBSD, MacOS	бесплатно	высокая точность, но зависит от частоты дискретизации	минимальное
NetFlow	4-10 Гбит	не требуются дополнительные настройки	высокая загрузка	Linux, FreeBSD, MacOS	бесплатно, но могут потребоваться дополнительные лицензии	низкая точность	максимальное
AF_PACKET	2 MPPS, 5-10 Гбит	не требуются дополнительные настройки	средняя-высокая загрузка	Linux (для ядра версии 3.6 и выше)	необходима лицензия GPLv2	высокая точность	минимальное

зируемыми инструментами были фиксированы следующие ее типы:

- ICMP-флуд – широковещательная рассылка (посредством ping-запроса) для проверки работающих узлов в системе;
- UDP-флуд – отправке множества UDP-пакетов (как правило, большого объема) на определенные или случайные номера портов удаленного хоста, который для каждого полученного пакета должен определить соответствующее приложение;
- SYN-флуд – отправке большого количества SYN-запросов (запросов на подключение по протоколу TCP) в достаточно короткий срок.

Полная статистика по входящим DDoS-атакам приведена на *рисунке 1*. Всего за 7 месяцев было зафиксировано 210 атак с помощью инструмента по обнаружению DDoS-атак FastNetMoon [9]. На *рисунке 2* отображены данные по обнаружению атак каждого средства захвата сетевого трафика.

Исходя из данных, полученных эмпирически, были сформированы критерии оценки точности обнаружения атак.

Будем считать точность обнаружения атаки высокой, если вероятность обнаружения атаки $P_0>0.8$; средней, если вероятность обнаружения атаки $0.6<P_0<0.8$, и низкой, если вероятность обнаружения атаки $P_0<0.6$.

На *рисунке 3* отображены данные по времени обнаружения атак каждым средством захвата сетевого трафика.

Аналогично критериям точности обнаружения атак эмпирически были определены критерии скорости обнаружения атак.

Будем считать скорость обнаружения атаки наименьшей, если количество обнаруженных атак за секунду > 0.25; средней, если количество атак за секунду лежит в диапазоне (0.06–0.25); низкой, если количество атак за секунду <0.06.

На *рисунке 4* отображены данные по загрузке центрального процессора при активной работе каждого средства захвата сетевого трафика.

Аналогично критериям точности и скорости обнаружения атак эмпирически были определены критерии степени загруженности центрального процессора.

Будем считать степень загруженности центрального процессора высокой, если загруженность центрального процессора >80%; средней, если загруженность центрального процессора лежит в диапазоне (60% – 80%), и маленькой, если загруженность центрального процессора < 20%.

Выводы

В ***таблице 1*** приведены основные характеристики работ рассмотренных способов захвата сетевого трафика. Как видно из таблицы почти все средства способны захватывать трафик при скорости 10 Гбит/сек. Однако PF_RING при этом очень сильно загружает центральный процессор, и для работы полного функционала данного инструмента необходима покупка лицензии на 1 MAC адрес. Кроме того, для сборки данного продукта необходимо пересобрать ядро операционной системы. Основной недостаток NetFlow заключается в его низкой скорости точности обнаружения атаки, кроме того данный инструмент очень сильно загружает ЦП. AF_PACKET также в процессе работы сильно загружает ЦП. Pcap способен захватывать трафик только на скоростях – до 100 Мбит/с, что ограничивает область его применения. Кроме того, pcap сильно загружает ЦП при активном захвате трафика, при этом точность обнаружении атаки очень мала.

Таким образом, одним из оптимальных инструментов захвата трафика является netmap, хотя для его установки необходимо пересобрать модуль ядра ОС и драйвер сетевой карты, и sFlow. Оба инструмента в процессе работы слабо загружают центральный процессор и отличаются высокой точностью и скоростью обнаружения атаки.

Литература

1. Маркин Ю.В., Санаров А.С. Обзор современных инструментов анализа сетевого трафика / Препринты ИСП РАН, 2014. №27. С. 1-24.

2. The netmap project [Электронный ресурс] // netmap – the fast packet I/Oframework. URL: http://info.iet.unipi.it/~luigi/netmap.

3. ntop [Электроныйй ресурс] // High-speed web-basic traffic analysis. URL: http://www.ntop.org/products/packet-capture/pf_ring.

4. DPDK [Электронный ресурс] // Data Plane Development Kit. URL: http://dpdk.org

5. ManageEngine [Электронный ресурс] // Netflow Analyzer. URL: https://www.manageengine.com/products/netflow/cisco-netflow.html?gclid=CNrG19bd8cgCFcTNcgodqlgC-g.

6. Tcpdump & Libpcap [Электронный ресурс] // the official web site of tcpdump. URL: http://www.tcpdump.org/.

7. Стивенс У., Феннер В. UNIX: Разработка сетевых приложений. СПб.: Питер, 2007. 1040 с.

8. OpenNet [Электронный ресурс] // FastNetMon – программа для выявления входящих/исходящих DDoS-атак. URL: https://www.opennews/art.shtml?num=40058.

УДК 53.023; 53.06; 781.1

ПРЕДСКАЗАНИЕ ТАКТОВОЙ ЧАСТОТЫ ПРОЦЕССОРА БУДУЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ КОМПЬЮТЕРОВ КАК ПРИМЕР ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ТЕХНИКЕ СВОЙСТВ ФРАКТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УТРАИВАЮЩИХСЯ ПЕРИОДОВ

PREDICTION CLOCK FREQUENCY OF THE PROCESSOR OF THE FUTURE GENERATION OF COMPUTERS AS AN EXAMPLE OF EFFECTIVE USE OF TECHNOLOGY IN THE PROPERTIES OF FRACTAL SYSTEMS TRIPLES PERIODS

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

Евгений Валерьевич Коломбет
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

Аннотация

Статья посвящена количественному прогнозу развития современных компьютерных процессоров. На этом частном примере иллюстрируется значимость для технических приложений т.н. темпорального фрактала, проявляющегося в широком диапазоне физических, биологических и технических явлений в форме системы утраивающихся периодов/частот. В статье делаются два вывода. Во-первых, можно существенно ускорить процесс разработки любого мультимасштабного технического устройства, изначально согласовав его спектр частот с темпоральным фракталом. По сути, это частичный отказ от метода проб и ошибок. Второй вывод: для частного примера мультимасштабного устройства – компьютерного процессора принципиально нового поколения – перспективной является тактовая частота 10 ГГц.

Ключевые слова: дискретный спектр частот, утроение частоты, темпоральный фрактал, мультимасштабность, сложные технические системы, тактовая частота компьютерного процессора.

Summary

The article is devoted to the quantitative prediction for the development of modern computer processors. This particular example illustrates the importance for technical applications of the so-called temporal fractal, manifested in a wide range of physical, biological and technical phenomena as a set of triples periods / frequencies. The article makes two conclusions. Firstly, you can significantly accelerate the development of any multiscale technical device. It is sufficient to coordinate ahead its frequency spectrum with the corresponding fragment of the temporal fractal. In fact, this is a denial from the method of trial and error. The second conclusion: for a particular example of multiscale systems – for computer processors of the next generation – value 10 GHz is the most perspective clock frequency.

Keywords: discrete spectrum of frequencies, tripled frequencies, temporal fractal, multiscale, complex technical systems, clock frequency of computer processor.

История развития процессоров современных компьютеров – это отражение напряженного стремления повысить производительность этих сложных технических систем. В процессе эволюции процессоров для решения этой задачи нужно было основную переключающую ячейку (ключ, комплементарную пару транзисторов) делать как можно более быстродействующей. Нужно было уменьшать размеры элементов, что достигалось за счет перехода к более тонким технологическим процессам. При этом возникало множество проблем. Движение к тонким технологическим процессам это путь поиска новых технических идей, путь значительных финансовых затрат и путь технологических компромиссов, на которые, увы, приходится идти, несмотря на то, что они ограничивают возможности процессоров. Сначала уменьшали размеры ключа и за счет этого получали более высокие тактовые частоты. Тактовая частота характеризует производительность процессора, то есть количество выполняемых операций в секунду. Указанная на корпусе процессора частота является рабочей частотой ядра процессора (той части процессора, которая выполняет основные вычисления). Уменьшение размеров ключа давало возможность увеличить количество ключей в процессоре. Это приводило к усложненной структуре, позволявшей дополнительно увеличить производительность процессора. Основной прирост производительности процессоров обеспечивался ростом именно тактовой частоты. Приблизительно к 2005 году рост тактовой частоты замедлился и практически полностью остановился в окрестности 4 ГГц. За прошедшие десять лет этот предел так и не был преодолен. Почему?

Указывают различные причины [1, 2], но они фактически существовали и ранее. Мы здесь покажем, что у возникшего ограничения есть причина фундаментального характера. Ее выяснение позволяет надежно предсказать, что множественные многоплановые технологические находки приведут, в конце концов, к появлению эффективно работающего процессора с тактовой частотой близкой к 10 ГГц, то есть к скачку из области 3-4 ГГц сразу в окрестность 10 ГГц.

Эта причина – недавно обнаруженная фундаментальная система утраивающихся периодов (ФСУП), т.н. темпоральный фрактал [3, 4], который в совокупности компонуют (вероятно, так или иначе подстраиваются к нему с течением времени) периоды самых разнообразных процессов – астрономических (квазары, звезды, Солнце), геофизических (геомагнетизм, климат, вулканы) и биологических (вымирание биологических таксонов, особенности памяти человека и даже его музыкального слуха). Сейчас крайне перспективным становится поиск проявлений темпорального фрактала в эволюционирующих сложных мультимасштабных технических устройствах. Ниже описан результат эволюционной подстройки к темпоральному фракталу тактовой частоты современных компьютерных процессоров.

Утраивающиеся периоды ФСУП упорядочены в две главные серии. Сначала было найдено [3], что первая серия простирается в сторону увеличения периода от T_0=114.5722… лет,

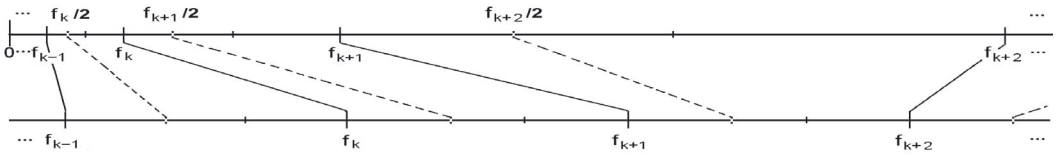


Рис. 1. При изучении утраивающихся периодов и частот удобно применять не обычный масштаб (верхняя ось), а логарифмический (нижняя ось), где утраивающиеся периоды/частоты располагаются через равные интервалы

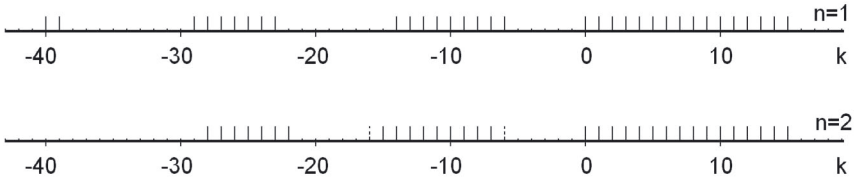


Рис. 2. Представленная в логарифмическом масштабе шкала утраивающихся периодов $T_{n,k}$, уже обнаруженных в различных сложных мультимасштабных процессах. Периоды $T_{n,k}$ выявлены в ходе множества наблюдений и экспериментов [3]; периоды $T_{n,k}$ из диапазона от k=–29 до k=–6 описаны в статьях [5, 6], а периоды с параметрами k=–39 и –40 описаны впервые в этой статье (см. *рисунок 3*).

Таблица 1

Тактовая частота современных процессоров (по [7]).

Марка процессора	Тактовая частота процессора ГГц	Марка процессора	Тактовая частота процессора ГГц
Celeron D 310	2,13	Celeron D 315	2,26
Celeron D 320	2,40	Celeron D 325	2,53
Celeron D 325J	2,53	Celeron D 326	2,53
Celeron D 330	2,66	Celeron D 330J	2,66
Celeron D 335	2,80	Celeron D 335J	2,80
Celeron D 336	2,80	Celeron D 340	2,93
Celeron D 340J	2,93	Celeron D 341	2,93
Celeron D 345	3,06	Celeron D 345J	3,06
Celeron D 346	3,06	Celeron D 350	3,20
Celeron D 351	3,20	Celeron D 355	3,33
Celeron M 310	1,2	Celeron M 320	1,3
Celeron M 330	1,4	Celeron M 340	1,5
Celeron M 350	1,3	Celeron M 350J	1,3
Celeron M 360	1,4	Celeron M 360J	1,4
Celeron M 370	1,5	Celeron M 380	1,6
Celeron M 390	1,7	Celeron M 420	1,6
Celeron M 430	1,73	Celeron M ULV 333	0,9
Celeron M ULV 353	0,9	Celeron M ULV 373	1
Celeron M ULV 383	1	Celeron M ULV 423	1,06
Pentium 4 505	2,66	Pentium 4 505J	2,66
Pentium 4 506	2,66	Pentium 4 520	2,80
Pentium 4 520J	2,80	Pentium 4 521	2,80
Pentium 4 530	3,00	Pentium 4 530J	3,00
Pentium 4 531	3,00	Pentium 4 540	3,20
Pentium 4 540J	3,20	Pentium 4 541	3,20
Pentium 4 550	3,40	Pentium 4 550J	3,40
Pentium 4 551	3,40	Pentium 4 560	3,60
Pentium 4 560J	3,60	Pentium 4 561	3,60
Pentium 4 570J	3,80	Pentium 4 571	3,80
Pentium 4 630	3,00	Pentium 4 631	3,00
Pentium 4 640	3,20	Pentium 4 641	3,20
Pentium 4 650	3,40	Pentium 4 651	3,40
Pentium 4 660	3,60	Pentium 4 661	3,60
Pentium 4 662	3,60	Pentium 4 670	3,80
Pentium 4 672	3,80	Pentium D 805	2,66
Pentium D 820	2,80	Pentium D 830	3,00
Pentium D 840	3,20	Pentium D 920	2,80
Pentium D 930	3,00	Pentium D 940	3,20
Pentium D 950	3,40	Pentium D 960	3,60
Pentium XE 840	3,20	Pentium XE 955	3,46
Pentium XE 965	3,73		

а вторая от вдвое меньшего периода. Согласно [3] периоды определяются эмпирической формулой

$$T_{n,k} = T_0 * 3^k / n,$$

где n=1 и 2, а k=0÷15,
а частоты, соответственно, формулой

$$f_{n,k} = 1/(T_0 * 3^k / n),$$

где n=1 и 2, а k=0÷15.

В работе [5] показано, что ФСУП простирается также далеко в область существенно более коротких периодов: до k=–29 при тех же значениях n.

На *рисунке 1*, имеющем методический, иллюстративный характер, изображен фрагмент ФСУП в обычном и логарифмическом масштабах. В логарифмическом масштабе утраивающиеся периоды/частоты формируют равномерные шкалы, что позволяет обозревать широкий диапазон масштабов (*рисунок 2*).

Все вышесказанное ставит вопрос о перспективности согласования дискретных спектров частот ($1/T_{n,k}$) в мультимасштабных технических комплексах с соответствующими фрагментами ФСУП. В подтверждение можно привести сглаженную гистограмму частот современных (т.е. уже довольно далеко проэволюционировавших, испытавших «естественный отбор») компьютерных процессоров [7]; см. *таблицу 1* и *рисунок 3*, построенный по содержащимся в ней данным.

Близость средних тактовых частот двух наблюдаемых на рисунке 3 пиков к вычисленным частотам $1/T_{1,-39}$ и $1/T_{1,-40}$ темпорального фрактала очевидна. Статистическая оценка (для оценки использовали статистический модуль ДОВЕРИТ программы MS Excel) приводит в каждом из двух пиков к попаданию в границу 99%-ного доверительного интервала, то есть очевидная близость середин пиков тактовой частоты к частотам $1/T_{1,-39}$ и $1/T_{1,-40}$ получает солидную статистическую поддержку.

Этот результат позволяет, в частности, предсказать, что принципиально новое поколение процессоров будет соответствовать k=-41 при n=1, то есть, опираться на тактовую частоту $1/T_{1,-41}$, лежащую в узкой окрестности 10 ГГц.

Авторы благодарны А.В. Елистратову за помощь в подготовке рисунка 3.

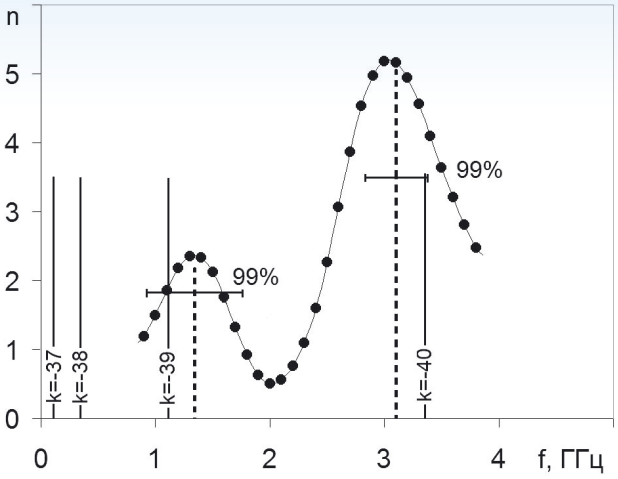


Рис. 3. Сглаженная гистограмма тактовой частоты процессоров современных компьютеров. Приведены 99% доверительные интервалы для математического ожидания генеральных совокупностей. Тактовые частоты процессоров проявили отчетливое тяготение к частотам $1/T_{1,-39}$ и $1/T_{1,-40}$ темпорального фрактала. Это тяготение выглядит результатом эволюции процессоров к эмпирически (методом проб и ошибок) отобранным современным формам. Таким образом, можно заключить, что настройка на частоты темпорального фрактала заметно повышает потребительскую стоимость процессоров.

Выводы

1. Тактовая частота процессоров следующего поколения компьютеров будет приходиться на узкую окрестность 10 ГГц.

2. Для создания компьютеров принципиально нового поколения уже нет необходимости в длительном и дорогом пути последовательного повышения тактовой частоты процессоров. Нужно сразу задать ее близкой к 10 ГГц и затем подбирать соответствующие технические и технологические решения в области создания «прорывных» направлений при разработке процессоров принципиально нового поколения.

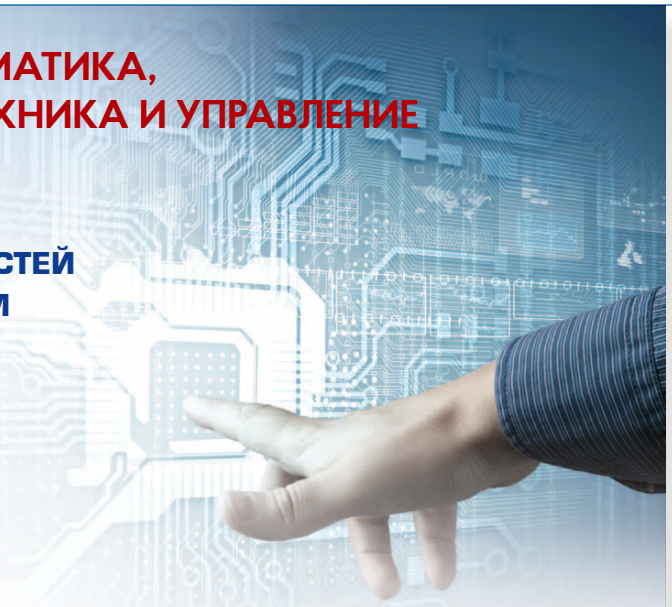
Литература

1. http://www.electrosad.ru/Processor/ProcTech3.htm
2. http://habrahabr.ru/company/intel/blog/194836/
3. Puetz Stephen J., Prokoph Andreas, Borchardt Glenn, Mason Edward W. Evidence of synchronous, decadal to billion year cycles in geological, genetic, and astronomical events // Chaos, Solitons & Fractals. 2014. Vol. 62-63. P. 55-75.
4. Muller H. Fractal scaling models of resonant oscillations in chain systems of harmonic oscillators // Progress in physics. 2009. Vol. 2. P. 72-76.
5. Бондарь А.Т., Федоров М.В., Коломбет В.А. Утраивающиеся периоды в мультимасштабных физических и биологических явлениях // Биофизика, 2015. Т. 60. №6.
6. Коломбет В.А., Коломбет Е.В., Лесных В.Н. О перспективе применения фундаментальной системы утраивающихся периодов в мультимасштабных технических устройствах // Известия Института инженерной физики, 2015. №3(37). С. 8-11.
7. https://ru.wikipedia.org/wiki/Маркировка_процессоров_фирмы_Intel

УДК 004.413.5

ГАРАНТИИ ВЫЯВЛЕНИЯ НЕДЕКЛАРИРОВАННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ В ПРОМЫШЛЕННОМ ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ

GUARANTEES THE DETECTION OF UNDECLARED OPPORTUNITIES IN INDUSTRIAL SOFTWARE SECURITY



Леонид Георгиевич Осовецкий
доктор технических наук, профессор
лауреат Государственной премии СМ СССР
советник директора
Ленинградское отделение Центрального научно-исследовательского института связи
Адрес: 196128, Санкт-Петербург, ул. Варшавская, д. 11
Тел.: +7(812)369-38-67

Анастасия Викторовна Ефимова
начальник лаборатории сертификации
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская область, г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: info@iifrf.ru

Аннотация
Обсуждается проблема повышения гарантий отсутствия недекларированных возможностей (НДВ) в функциональном программном обеспечении (ПО). Предлагается подход к получению гарантий по отсутствию программных закладок в ПО при сертификации по требованиям безопасности информации промышленного программного обеспечения.

Ключевые слова: сертификация ПО по требованиям безопасности информации, технология создания ПО, гарантии по отсутствию НДВ.

Summary
The problem of improving the Russian security requirements in terms of detection of undeclared capabilities (NDV) in the functionality of the software (SW). An approach to obtain guarantees from the absence of a software program bookmarks with their certification on information security requirements.

Key words: certification according to the requirements of information security technology for creating software that guarantees the absence of NDV.

Введение

Нужны ли научно-технические гарантии при сертификации по требованиям безопасности информации программного обеспечения современных информационных технологий (ИТ), вычислительной техники и телекоммуникационных систем? Рост применения ИТ в различных областях человеческой деятельности, в том числе в критических областях применения, рост влияния ИТ на качественные показатели жизни человека влечет за собой необходимость увеличения объемов разработок ПО, привлечение больших ресурсов на разработку, рост требований по качеству и надежности ПО. Эти проблемы были понятны еще на заре развития отечественного ПО для бортовых вычислительных комплексов[1] и были подробнейшим образом сформулированы В.В. Липаевым [1].

Рост требований и объемов разработки ПО привел к необходимости использования новых технологических решений, в том числе, использование распределенных коллективных усилий с привлечением ранее использованных компонент, жестким технологическим ограничениям для организации коллективной разработки, организацией единой базы разработки, единым управлением разработки, созданием мощных инструментально-технологических средств

[1] Макаренко Г.И. Отработка программного обеспечения пилотажно-навигационного оборудования. В кн.: Вычислительные процессы и структуры. Межвузовский сборник, вып. 148, ЛИАП, 1981. С. 103-108.

поддержки разработки. Количество технологических этапов создания и разработки современных ПО включает сотни жестко регламентированных процедур с фиксацией их результатов в технологическом процессе и передачи их последующим этапам.

Технология создания ПО превратилась в многоэтапный инструментально поддержанный регламентированный процесс для своевременного удовлетворения требований потребителя по качеству и безопасности ПО. Количество технологических этапов создания и разработки ПО таких крупных комплексов как ORACLE, MICROSOFT, SIBERGURD, NORTEL и многих других, включают более 600 технологических этапов и, соответственно, результатов их использования при создании ПО.

Поддержка таких технологий под силу только крупным ведущим фирмам разработчикам ПО, которые становятся по сути дела представителями владения стратегическими государственными ресурсами. В этих условиях вопросы безопасности и защиты информационных ресурсов пользователя разработанного ПО становятся в перечне показателей качества на первое место. Это характерно не только для государственного уровня потребителя ПО, но и для крупных фирм, банковских структур и малых фирм. В перечне многочисленных показателей уровня безопасности ПО для пользователя (речь идет и о стандартах ОК, BS 7799, американских стандартах, Российских требованиях по безопасности ПО) наряду с традиционными требованиями идентификации, целостности, конфиденциальности, декларируются специальные требования, в том числе требования по контролю отсутствия недекларированных возможностей (программных закладок).

К сожалению, в Российских РД ФСТЭК России не определены понятия недекларированные и декларированные возможности. Поэтому необходимо их определить ввиду роста объемов и сложности создаваемого ПО и соответственно, ростом сложности технологии их создания.

В пределах данной статьи мы не будем рассматривать те «программные закладки» которые внедряются в ПО в процессе его функционирования, только те которые закладываются в процессе его создания. Ясно, что такие «технологические закладки» не всегда злоумышленные. Часто они остаются в ПО по причинам избыточности технологического процесса его создания.

Мы предлагаем понятие «декларированные» возможности определять как все функции закладываемые в создаваемое и проектирование в ПО на всех технологических этапах его создания. Таким образом, «недекларируемые» возможности (далее НДВ) – это функции, которые не определены и не фиксированы в технологическом процессе создания ПО. Ввиду изменения технологии создания ПО в сторону использования входящих компонент, организации распределенной удаленной разработки, использования покупных (аутсорсинг) технологий, роль требований по отсутствию недекларированных возможностей возрастает.

С учетом необходимости использования рассматриваемого руководящего документа (РД) для сложных промышленных программ, необходимо понимать, что программные закладки возможны на всех технологических этапах разработки программ (а не только при разработке исходных текстов программ). Методика исследования на содержание НДВ на всех технологических этапах создания ПО, была реализована в ряде сертификаций на отсутствие НДВ.

Другой стороной использования такой методики при сертификации на отсутствие НДВ является различия между реальным НДВ и уязвимостями, которые выявляют большинство существующих средств, используемых при сертификации на отсутствие НДВ, но без объективного предоставления гарантий на их отсутствие.

Российский руководящий документ по недекларированным возможностям

Требования фиксации контрольных сумм исходных текстов и загрузочных модулей программ не учитывают наличия других технологических компонент, которые включают в современной технологии создания ПО до нескольких сотен операций и технологических объектов и которые вносят реальную вероятность наличия недекларированных возможностей, вносимых на любых этапах разработки ПО и, зачастую, носят технологически обоснованный характер, а не вредоносную программную закладку. Необходимо расширение требований по анализу всех компонент ПО и их фиксации контрольными суммами.

Технология получения гарантий по отсутствию НДВ в крупных комплексах программ

На *рисунке 1* приведен фрагмент технологии создания промышленных программных средств на примере технологии Rational фирмы IBM.

Эта многоэтапная технология включает фиксацию формализованных «артефактов», контролируемых в технологическом процессе на полноту и непротиворечивость. Формализованные

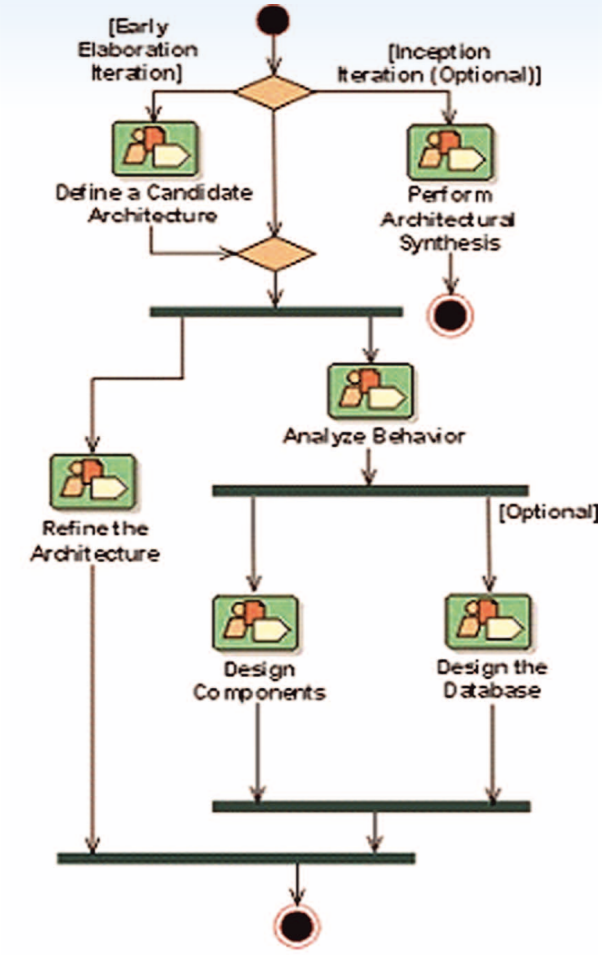


Рис. 1. Пример промышленной технологии создания ПО

артефакты могут быть представлены в виде иерархической системы таблиц покрытий, которые в этом случае являются формализованной декларацией функций разрабатываемого ПО.

Представление компонент ПО в таком виде позволяет проводить формализованное выявление недекларированных возможностей без использования фактического тестирования, встраивания контрольных точек и операций, то есть и в программных комплексах, «прошитых» во встроенных вычислительных системах.

Проект автоматизированной методики и комплекса ФОБОС на основе применения аппарата комплексных кубических покрытий и графо-аналитических моделей

Научно-технические аспекты процедуры сертификации по Российским требованиям безопасности информации программных продуктов (РД ФСТЭК России) предусматривают наличие обоснованных гарантий по отсутствию не декларированных возможностей (НДВ). В тоже время имеющиеся средства выявления НДВ и антивирусной защиты не дают высоких гарантий по их отсутствию, что заставляет проводить исследования по методам их гарантированного формализованного выявления и диагностики.

В данной статья предлагается принципиально новая методика сертификации программных средств с использованием графо-аналитической модели и комплексных кубических покрытий.

Любая программа реализует тот или иной вычислительный процесс, который порождается путем интерпретации ее команд процессором – реальным или виртуальным. Переход от программ к вычислительным процессам позволяет осуществить поиск решений при сертификации программ в общем виде.

Описанием вычислительного процесса может служить его графо-аналитическая модель (ГАМ) и ее описание в виде комплексных кубических покрытий [2-4].

ГАМ можно построить либо путем дешифрации машинного кода программы на основе системы команд процессора с использованием метода структурирования, либо построением ее по техническому заданию (спецификации программы). Формализация построения ГАМ программы и ее комплексного покрытия базируется на концептуальной двухконтурной итерационно-рекурсивной модели вычислительного процесса, порождаемого процессором при интерпретации команд программы. ГАМ представляется в виде множества вершин и связей (дуг) между вершинами. Вершины могут быть двух типов: линейными, в которых осуществляются вычисления по итеративным и рекуррентным формулам, и условными, в которых вычисляются значения условий-предикатов (УП). Связи являются направленными и осуществляют переход от вершины к вершине с помощью булевых функций управления. Комплексное покрытие объединяет в себе функции управления, логические переменные условий-предикатов и алгебраические выражения вычисляемых переменных. Покрытия строятся по ГАМ методом перебора путей на графе в виде последовательности линейных и условных вершин и связей между ними.

Таким образом, предложенная двухконтурная итерационно-рекурсивная модель вычислительного процесса программ, ГАМ на ее основе и построение комплексных кубических покрытий, объединяющих в себе булевы функции, переменные и алгебраические выражения, позволяет перейти от анализа программ к анализу вычислительных процессов. Это дает возможность построить автоматизированные системы для решения задач верификации и тестирования программ, поиска недекларированных возможно-

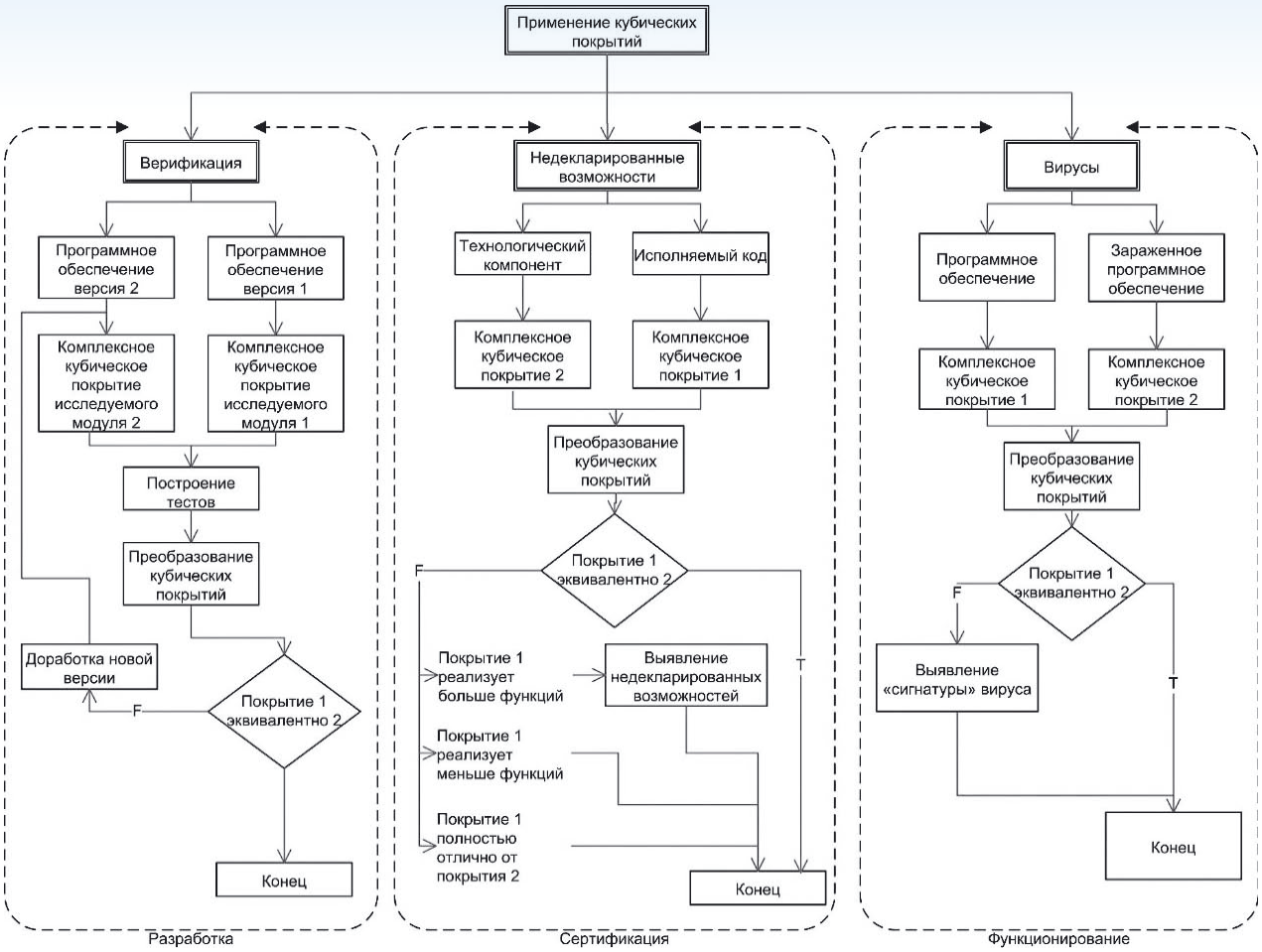


Рис. 2. Применение кубических покрытий

стей, средств защиты и анализа вирусной опасности и оптимизации программы с точки зрения быстродействия.

Область применения предлагаемой методики верификации можно разделить на три направления (*рисунок 2*).

Верификация

Под верификацией понимается установление соответствия между различными программами. Необходимость в этом действии может возникнуть по следующим причинам:

Иногда программный продукт может разрабатываться различными группами проектантов. В этом случае можно верифицировать различные варианты реализаций между собой для повышения объективности и качества выбора конкретной версии; в ходе жизненного цикла программа может подвергаться различным модификациям: обновление версии или устранение ошибки. Верификация в данном случае позволяет зафиксировать наличие и/или устранение ошибки, подтвердить идентичность логики программ, установить измененные элементы логики.

Выявление недекларированных возможностей и «мертвого» кода

В данном направлении ведется сравнение кубического покрытия построенного по исполняемому коду программы с кубическим покрытием, построенным на основе ее полной спецификации.

Основной задачей исследования вычислительного процесса является его верификация в соответствии с декларацией и состоит в верификации декларированных и недекларированных его возможностей и в поиске несуществующих значений, образующих множество don't care.

Таким образом, задача верификации вычислительного процесса может быть сведена к поиску НДВ и конъюнкций условий-предикатов, тождественно равных нулю, для которых системы неравенств не имеют решений. НДВ на гра-

фе вычислительного процесса образуют множество вершин и дуг, недостижимых через входные последовательности наборов, построенных по декларации и don't care, которые порождают частично-определенные булевы функции. Эти функции при их отображении на n-мерный двоичный куб могут быть заданы покрытиями комплекса, где f=1 (декларированные возможности, определенные спецификацией), $K^0(f)$, где f=0 (НДВ) и где f=d (don't care). В случае если верифицируемая программа в точности реализует логику, заданную спецификацией, покрытие K^0(f) будет эквивалентно покрытию, построенному по спецификации, а покрытия K^0(f) и K^d(f) равны пустому множеству. При отображение функций, заданных спецификацией, на n-мерный двоичный куб D_n^2, они могут быть заданы покрытием K^1(f). Таким образом, мы получаем равенство, позволяющее нам верифицировать логику проверяемой программы: ∪

$$E_n^2 - D_n^2 = K^0(f) \cup K^d(f)$$

Если правая часть равенства эквивалентна пустому множеству, то можно делать вывод о том, что логика проверяемой программы в точности соответствует логике заложенной в спецификации. В противном случае проводится дальнейший анализ покрытий K^0(f) и K^d(f).

Исследование вирусов

Как и при поиске недекларированных возможностей, исследуемым объектом является логика работы программ. Предполагается использовать разницу кубических покрытий зараженного экземпляра программы и «чистого». Найденная разница отображает логику вируса. В дополнении с данными о командах обработки данных назовем ее сигнатурой вируса.

Используя подобные сигнатуры можно:

1) исследовать программы на наличие вирусов;

2) исследовать логику работы вируса.

Заключение

В настоящее время основной угрозой в программном обеспечении является наличие не декларированных возможностей. Ни одно из существующих инструментальных средств поиска не декларированных возможностей не дает гарантий их обнаружения. Применение комплексных кубических покрытий позволит не только гарантированно решить данную задачу, но и автоматизировать этот процесс. Кроме этого существуют перспективы использования кубических покрытий в других областях безопасности информации, оптимизации программного кода в части быстродействия и поиска «мертвого» кода.

Литература

1. Липаев В.В. Программная инженерия сложных заказных программных продуктов: Учебное пособие. М.: МАКС Пресс, 2014. 312 с.

2. Немолочнов О.Ф., Зыков А.Г., Поляков В.И., Осовецкий Л.Г., Сидоров А.В., Кулагин В.С. Итерационно-рекурсивная модель вычислительных процессов программ // Известия вузов. Приборостроение, 2005. Т. 48. №12. С. 14-20.

3. Немолочнов О.Ф., Зыков А.Г., Поляков В.И. Кубические покрытия логических условий вычислительных процессов и программ. // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО, 2004. Вып. 14. Информационные технологии, вычислительные и управляющие системы. С.225-233.

4. Зыков А.Г., Немолочнов О.Ф. Поляков В.И., Сидоров А.В. Структурирование программ и вычислительных процессов на множество линейных и условных вершин / Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО, 2005. Вып. 19. Программирование, управление и информационные технологии. С. 207-212.

УДК 62-503.56

ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСНЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ СОВОКУПНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

THE OPTIMIZATION PROBLEM OF THE MAIN PARAMETERS OF THE MODEL PROGRAM MANAGEMENT OF RESOURCE POTENTIAL OF THE SET OF TECHNICAL DEVICES

Владимир Петрович Карулин

заслуженный работник высшей школы РФ
доктор технических наук, профессор

ведущий научный сотрудник
ФГБНУ «Госметодцентр»
Адрес: 115998, Москва,
ул. Люсиновская, д. 51
Тел.: +7(499)706-81-25

Аннотация

В статье представлены постановки задачи оптимизации программного управления ресурсными возможностями совокупности однотипных технических устройств. Дан подробный анализ критериальных функций, в том числе их графическое представление на всем диапазоне изменения параметров.

Ключевые слова: технические устройства, работоспособность, ресурс, техническое состояние.

Summary

The article presents the optimization problem of the program management of resource potential of the set similar technical devices. Detailed analysis of the criterion functions, including their graphical representation on the entire range of variations of parameters is given.

Keywords: technical devices, operability, resource, technical condition.

Особенности условий эксплуатации, содержание программ поддержания готовности технических устройств (ТУ) к применению по назначению, виды и характер расходования ресурсов агрегатов и систем ТУ, а также временные и экономические ограничения определяют возможности продления сроков эксплуатации технических систем в условиях ресурсных ограничений [1].

В статье [2] был рассмотрен ресурсосберегающий подход к сохранению работоспособности совокупности технических устройств в условиях изменения требований к уровню технического состояния. Он базируется на том, что продление сроков эксплуатации отдельных ТУ происходит за счет снижения интенсивности расходования ресурсов. Для этого изменяется исходное положение ТУ, что приводит к снижению в определенных условиях вероятности успешного выполнения задач, стоящих перед отдельными ТУ. В результате изменения исходного положения происходит перевод части ТУ из области работоспособных в область ограниченно работоспособных состояний. Важно подчеркнуть, что, рассматриваемые ТУ, находящиеся в состоянии ограниченной работоспособности должны быть переведены в работоспособное состояние в случайный момент времени. При этом для приведения в исходное положение и полного восстановления работоспособности ТУ требуются временные затраты.

В определенных условиях момент или интервал времени возможного применения ТУ по назначению может быть известен с некоторой достоверностью, что ослабляет требования по непрерывному поддержанию количественного состава ТУ, одновременно находящихся в работоспособном состоянии.

Естественно, что при ограниченных ресурсных возможностях с повышением требований к уровню технического состояния количество технических устройств, отвечающих этому уровню, имеет тенденцию к сокращению. При этом возникает необходимость продления сроков эксплуатации таким образом, чтобы исключить значительное сокращение общего количества ТУ, связанное с достижением ими предельных состояний.

Фактически, имеется проблемная ситуация, которая состоит в необходимости решения задачи обеспечения заданных требований по поддержанию количественного состава и технического состояния совокупности ТУ в условиях замедления темпов их модернизации. Разрешение такой проблемной ситуации возможно путем нахождения оптимальных вариантов программного управления ресурсными возможностями совокупности технических устройств.

Решение задачи оптимизации (нахождение оптимальных значений параметров) предполагает исходя из поставленной цели выбор и математическое представление целевой функции и функций ограничений, а также строгое и однозначное определение состава оптимизируемых параметров, выбранных из всей совокупности параметров модели.

Постановка задачи оптимизации

Прежде всего, определимся с параметрами модели. В качестве выходного параметра рассмотрим долю (количество) ТУ, находящихся в каждый момент времени $t_э$ в работоспособном состоянии – $N_{ТУ}$, чувствительную к режиму расходования ресурсов и изменению исходного состояния систем, входящих в состав ТУ.

В результате изменения исходного состояния происходит перевод части ТУ из области работоспособных в область ограниченно работоспособных состояний. Для приведения в исходное положение и полное восстановление работоспособности ТУ требуются временные затраты $t_{пр}$.

Принимая во внимание, что при выборе варианта ресурсосберегающей стратегии наиболее существенными являются требования к показателю $N_{ТУ}(t_э, t_{пр})$, в постановке задачи оптимизации в качестве функции ограничений рассмотрим функциональную зависимость $N_{ТУ}(t_э, t_{пр}, \bar{\theta})$, где $\bar{\theta}$ – вектор оптимизируемых параметров. В частном случае $t_э$ и $t_{пр}$ также могут входить в состав оптимизируемых параметров.

Тогда в качестве целевой функции целесообразно рассмотреть функцию, характеризующую стоимость процесса поддержания $N_{ТУ}(t_э, t_{пр})$ в работоспособном C_1 и ограниченно работоспособном C_2 состояниях, а также затраты на перевод ТУ из ограниченно работоспособного в работоспособное состояние C_3.

В качестве исходных параметров, необходимых для количественной оценки показателя, рассмотрим следующие:

- интенсивность достижения ТУ предельного состояния и, как следствие, прекращение его эксплуатации – λ;
- интенсивность восстановления работоспособности (перевод из области ограниченной работоспособности в область работоспособного состояния) – μ;
- доля ТУ, находящихся в начальный момент времени в области ограниченной работоспособности – k;
- продолжительность эксплуатации ТУ (срок эксплуатации) – $t_э$;
- продолжительность восстановления работоспособности – $t_{пр}$.

Примем в качестве оптимизируемых параметров $\bar{\theta} = \overline{k, \lambda_1, \mu}$ и дадим формулировку словесной постановки задачи.

Найти такие значения параметров вектора оптимизируемых параметров $\bar{\theta} = \overline{k, \lambda_1, \mu}$, при которых суммарная стоимость процесса поддержания готовности $N_{ТУ}(t_э, t_{пр})$ в работоспособном C_1, ограниченно работоспособном C_2 состояниях, а также затраты на перевод ТУ из ограниченно работоспособного в работоспособное состояние C_3 будут минимальными, а количество ТУ, находящихся в работоспособном состоянии $N_{ТУ}(t_э, t_{пр})$, на заданных временных интервалах $t_э = 1,...,t_э^{TP}$ и $t_{пр} = 1,...,t_{пр}^{TP}$ не снизится ниже требуемого значения $N^{TP}{}_{ТУ}(t_э, t_{пр})$.

Общая математическая постановка задачи примет вид:

$$\begin{aligned} &C_1(\mathbf{k}, t_э, t_{пр}) + C_2(\mathbf{k}, \boldsymbol{\lambda}_1, t_э, t_{пр}) + \\ &+ C_3(\mathbf{k}, \boldsymbol{\mu}, t_э, t_{пр}) \Rightarrow \min_{\mathbf{k}, \boldsymbol{\lambda}_1, \boldsymbol{\mu}, t_э, t_{пр}}; \\ &N_{ТУ}(\mathrm{k}, \lambda_1, \mu, t_э, t_{пр}) \geq N_{ТУ}{}^{TP}(t_э, t_{пр}); \\ &t_э = 1,...,t_э^{TP}; \\ &t_{пр} = 1,...,t_{пр}^{TP}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $N_{ТУ}^{TP}, t_э^{TP}, t_{пр}^{TP}$ – требуемые значения параметров.

Рассматриваемая задача в постановке (1) представляет собой динамическую задачу, решаемую в диапазоне изменения временных параметров

$$t_э = 1,...,t_э^{TP},\ t_{пр} = 1,...,t_{пр}^{TP}$$

с оптимизацией по параметрам k, λ_1, μ.

На практике представляет интерес решение статической задачи применительно к некото-

рым наперед заданным конкретным значениям временных параметров $t_э$, $t_{пр}$.

В этом случае задача формулируется следующим образом.

Найти такие значения параметров вектора оптимизируемых параметров $\overline{\theta} = \overline{k, \lambda_1, \mu}$, при которых суммарная стоимость процесса поддержания готовности $N_{ТУ}(t_э, t_{пр})$ в работоспособном C_1, ограниченно работоспособном C_2 состояниях, а также затраты на перевод ТУ из ограниченно работоспособного в работоспособное состояние C_3 будут минимальными, а количество ТУ, находящихся в работоспособном состоянии $N_{ТУ}^{ТР}$, в заданный момент времени $t_э = 1,...,t_э^{ТР}$, $t_{пр} = t_{пр}^{ТР}$, не снизится ниже требуемого значения $N_{ТУ}^{ТР}$. Математическая постановка такой задачи примет вид:

$$C_1(\mathbf{k}, t_э, t_{пр}) + C_2(\mathbf{k}, \boldsymbol{\lambda}_1, t_э, t_{пр}) + C_3(\mathbf{k}, \boldsymbol{\mu}, t_э, t_{пр}) \Rightarrow \min_{\mathbf{k}, \boldsymbol{\lambda}_1, \boldsymbol{\mu}};$$
$$N_{ПУ}(\mathbf{k}, \boldsymbol{\lambda}_1, \boldsymbol{\mu}, t_э, t_{пр}) \geq N_{ПУ}^{ТР}$$
$$t_э = t_э^{ТР}; \qquad (2)$$
$$t_{пр} = t_{пр}^{ТР}.$$

С целью проведения детального анализа характера изменения целевых функций и функций ограничений рассмотрим вариант, характеризуемый различными интенсивностями расходования ресурса ТУ в работоспособном и ограниченно работоспособном состояниях [2].

В этом случае функция ограничений для постановки задачи (2) будет иметь вид

$$N_{ТУ}(k, \lambda_1, \mu, t_э, t_{пр}) = (1-k)e^{-\lambda t_э} + ke^{-\lambda_1 t_э}(1 - e^{-\mu t_{пр}}) \qquad (3)$$

Целевая функция отражает суммарные затраты на эксплуатацию ТУ в различных режимах функционирования, в том числе и в процессе восстановления готовности в работоспособном состоянии. Характер изменения стоимостных затрат представлен на *рисунке 1*.

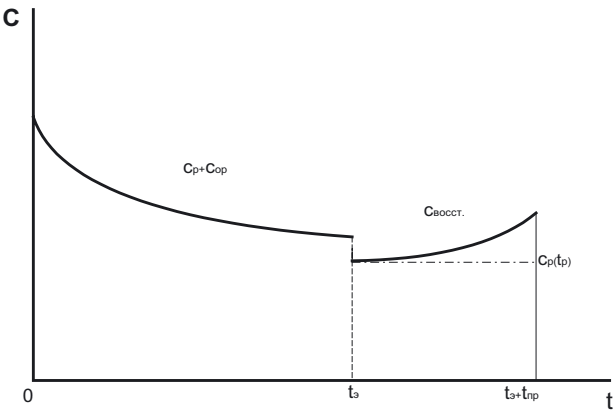


Рис. 1. Изменение стоимости поддержания готовности $N_{ТУ}(t_э, t_{пр})$ в процессе эксплуатации

На *рисунке* представлен характер изменения суммарной стоимости поддержания готовности C_{Σ}, включающей стоимости поддержания готовности работоспособных $C_р$ и ограниченно работоспособных $C_{ор}$ ТУ на интервале эксплуатации $(0, t_э)$, с последующим изменением затрат на интервале $(t_э, t_э + t_{пр})$ восстановления работоспособного состояния ТУ.

Характер изменения стоимости поддержания готовности $N_{ТУ}(t_э, t_{пр})$ определяется двумя факторами:

- на временном интервале $(0, t_э)$ снижение стоимостных затрат $C_{\Sigma} = C_р + C_{ор}$ объясняется сокращением со временем общего количества работоспособных и ограниченно работоспособных ТУ;
- на временном интервале восстановления работоспособности $(t_э, t_э + t_{пр})$ рост стоимостных затрат объясняется растущей интенсивностью восстановительных работ на ТУ.

В связи с тем, что величина интервала восстановления готовности значительно меньше интервала эксплуатации $(0, t_э)$, принято допущение о постоянном значении стоимости поддержания готовности работоспособных ТУ на интервале $(t_э, t_э + t_{пр})$ равном $C_р(t_э)$ и возможности не учета на этом интервале стоимости поддержания готовности ограниченно работоспособных ТУ.

Исходя из геометрических соображений (*рисунок 1*) суммарную удельную стоимость поддержания готовности ТУ можно представить в следующем виде

$$C_{сумм} = C_1^{уд}(1-k)\int_0^{t_э+t_{пр}} e^{-\lambda t}dt + C_2^{уд}k\int_0^{t_э} e^{-\lambda_1 t}dt +$$
$$+ C_3^{уд}ke^{-\lambda_1 t_э}\int_{t_э}^{t_э+t_{пр}}(1-e^{-\mu t})dt \quad , \qquad (4)$$

где $C_1^{уд}$ – удельная стоимость поддержания готовности в работоспособном состоянии, приходящаяся на одну ТУ в течение одного часа;

$C_2^{уд}$ – удельная стоимость поддержания готовности в ограниченно работоспособном состоянии, приходящаяся на одну ТУ в течение одного часа;

$C_3^{уд}$ – удельная стоимость восстановления работоспособного состояния, г ходящаяся на одну ТУ в течение одного часа;

$C_{сумм}$ – суммарная стоимость поддержания готовности.

С учетом приведенной выше словесной и общей математической постановки задачи (2) детальная математическая постановка задачи оптимизации примет вид

$$C_{сумм}(k,\lambda_1,\mu) = C_1^{y\partial}(1-k)\int_0^{t_э+t_{пр}} e^{-\lambda t}dt + C_2^{y\partial}k\int_0^{t_э} e^{-\lambda_1 t}dt +$$

$$+ C_3^{y\partial}ke^{-\lambda_1 t_э}\int_{t_э}^{t_э+t_{пр}}(1-e^{-\mu t})dt \Rightarrow \min_{\mathbf{k},\boldsymbol{\lambda}_1,\boldsymbol{\mu}};$$

$$N_{TY}(k,\lambda_1,\mu) = (1-k)e^{-\lambda t_э} + ke^{-\lambda_1 t_э}(1-e^{-\mu t_{пр}}) \geq N_{TY}^{TP\cdot} \quad (5)$$

Необходимо отметить, что представленные целевая функция и функция ограничений зависят от ряда параметров, но только параметры k, λ_1, μ являются параметрами оптимизации. Все остальные параметры определяются заранее выбранной совокупностью исходных данных.

Практика решения подобных задач не ограничивается рассмотренными видами функциональных зависимостей [3-6]. Часто представляет интерес не суммарная стоимость затрат на поддержание готовности, а затраты, приходящиеся на один объект или систему. В нашем случае целесообразно рассмотреть суммарную стоимость поддержания готовности, приходящуюся на одно ТУ. С учетом (5) искомая функция будет иметь вид:

$$L(t_э,t_{пр}) = \frac{C_{сумм}(t_э,t_{пр})}{N_{TY}(t_э,t_{пр})} =$$

$$= \frac{C_1^{y\partial}(1-k)\int_0^{t_э+t_{пр}} e^{-\lambda t}dt + C_2^{y\partial}k\int_0^{t_э} e^{-\lambda_1 t}dt + C_3^{y\partial}ke^{-\lambda_1 t_э}\int_{t_э}^{t_э+t_{пр}}(1-e^{-\mu t})dt}{(1-k)e^{-\lambda t_э} + ke^{-\lambda_1 t_э}(1-e^{-\mu t_{пр}})} \quad (6)$$

Следует отметить, что при решении задачи оптимизации с использованием в качестве критериальной функции (6), как и при решении задач (1, 2, 5), в качестве оптимизируемых параметров в зависимости от цели решения задачи из всей совокупности параметров выбирают те параметры, к которым целевая функция и функции ограничений наиболее чувствительны при принятых исходных данных.

Графическое представление критериальных функций

Произведем анализ целевых функций и функций ограничений с помощью математического пакета MathCAD 15.0.

Для целевой функции (5) с оптимизируемыми параметрами k и μ

$$C_{сумм}(k,\mu) = C_1^{y\partial}(1-k)\int_0^{t_э+t_{пр}} e^{-\lambda t}dt + C_2^{y\partial}k\int_0^{t_э} e^{-\lambda_1 t}dt +$$

$$+ C_3^{y\partial}ke^{-\lambda_1 t_э}\int_{t_э}^{t_э+t_{пр}}(1-e^{-\mu t})dt;$$

расчетное выражение в среде MathCAD примет вид

$$Q_{i,j} := cx\cdot\left(1-k_i\right)\cdot\int_0^{tx+ty} e^{-\lambda\cdot t}\,td + cx1\cdot k_i\cdot\int_0^{tx} e^{-\lambda_1\cdot t}\,td +$$

$$+ cy\cdot k_i\cdot e^{-\lambda_1\cdot tx}\cdot\int_{tx}^{tx+ty}\left(1-e^{-\mu_j\cdot t}\right)td\,. \quad (7)$$

Здесь функция $Q_{i,j}$ представляет собой зависимость суммарной стоимости от различных значений k_i и μ_j.

Для решения задачи примем следующую совокупность исходных данных, представленных на *рисунке 2*.

$\lambda := 0.00$ $\lambda 1 := 0.0002$ $tx := 150000$ $ty := 1000$

$cx := 10$ $cx1 := 1$ $cy := 100$

$n := 10$ $m := 20$ $i := 2..n$ $j := 2..m$

$k_i := 0.1\cdot i$ $\mu_j := 0.001\cdot j$

Рис. 2. Исходные данные

Для принятых исходных данных графическое представление целевой функции (7) в зависимости от параметров k_i и μ_j показано на *рисунке 3*.

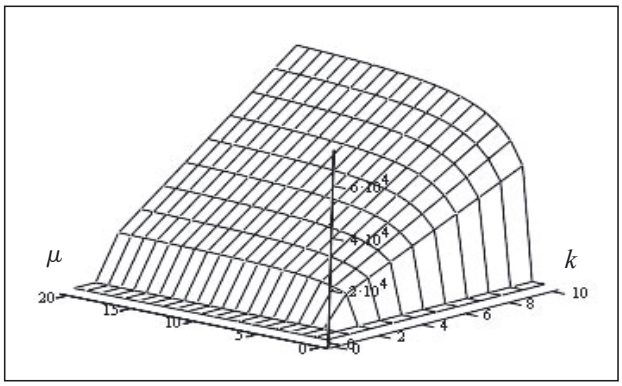


Рис. 3. График функции $Q_{i,j} \Leftrightarrow C_{сумм}(k, \mu)$

График функции $Q_{i,j}$ представляет собой возрастающую зависимость суммарной стоимости от доли ТУ, находящихся в состоянии ограниченной работоспособности (параметр – k) и интенсивности восстановления работоспособности

(параметр – μ). Такой характер изменения функции определяется соотношением частных стоимостных параметров, входящих в исходную зависимость (5). Действительно, в принятых исходных данных величины этих параметров отличаются на порядок: $C_1^{уд}=10$; $C_2^{уд}=1$; $C_3^{уд}=100$.

Проведем аналогичные преобразования для функции ограничений (3) с оптимизируемыми параметрами k и μ

$$N_{ПУ}(k,\mu)=(1-k)e^{-\lambda t_э}+ke^{-\lambda_1 t_э}(1-e^{-\mu t_{пр}}).$$

При тех же исходных данных график изменения значений функции U_{ij}

$$U_{i,j}:=\left(1-k_i\right)\cdot e^{-\lambda\cdot tx}+k_i\cdot e^{-\lambda 1\cdot tx}\cdot\left(1-e^{-\mu_j\cdot ty}\right) \quad (8)$$

от параметров k_i и μ_j показан на *рисунке 4*.

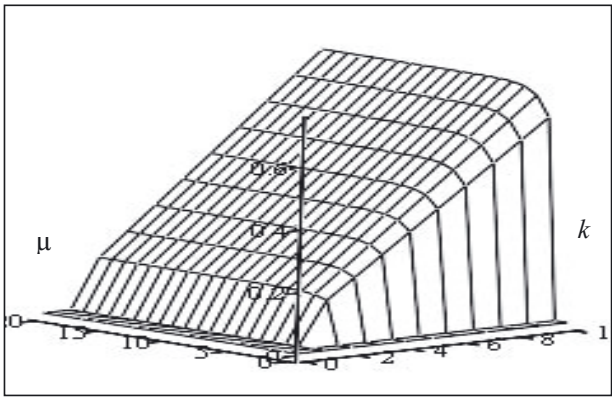


Рис. 4. График функции $U_{ij} \Leftrightarrow N_{ПУ}(k, \mu)$

Несмотря на то, что характер изменения графика функции U_{ij} в общих чертах подобен функции Q_{ij}, представленной на *рисунке 3*, причина такого положения определяется не соотношением стоимостей, а зависит от исходной доли ТУ, находящихся в состоянии ограниченной работоспособности (параметр – k).

Очевидно, что степень изменения рассмотренных критериальных функций от выбранных параметров различна и выбор конкретных значении параметров требует дополнительного анализа.

В связи с этим рассмотрим характер изменения функции (6), определяющей суммарную стоимость поддержания готовности, приходящуюся на одно ТУ

$$L(k,\mu)=\frac{C_{сумм}(k,\mu)}{N_{ПУ}(k,\mu)}=$$

$$=\frac{C_1^{уд}(1-k)\int_0^{t_э+t_{пр}}e^{-\lambda t}dt+C_2^{уд}k\int_0^{t_э}e^{-\lambda_1 t}dt+C_3^{уд}ke^{-\lambda_1 t_э}\int_{t_э}^{t_э+t_{пр}}(1-e^{-\mu t})dt}{(1-k)e^{-\lambda t_э}+ke^{-\lambda_1 t_э}(1-e^{-\mu t_{пр}})} \quad (9)$$

В среде MathCAD эта функция, зависящая от параметров k и μ, будет записана в следующем виде – см. формулу 10.

При тех же исходных данных график изменения значений функции L_{ij} от параметров k_i и μ_j показан на *рисунке 5*.

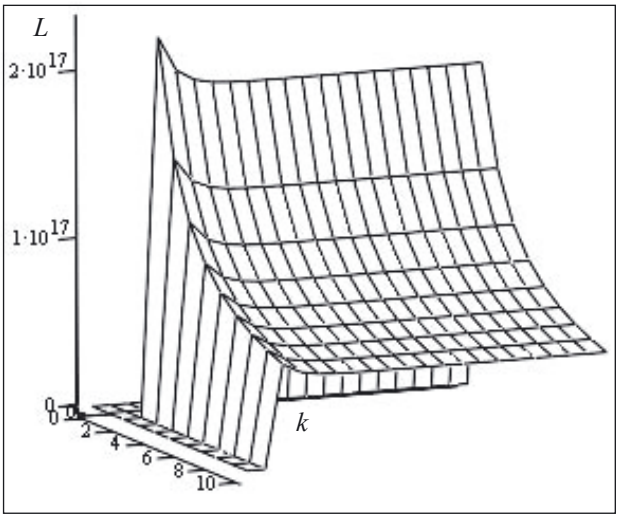


Рис. 5. График функции $L_{ij} \Leftrightarrow L(k, \mu)$

В отличие от стоимостного графика, представленного на *рисунке 3*, на анализируемом графике (*рисунок 5*) влияние аргументов на критериальную функцию имеет другой характер.

С ростом k наблюдается уменьшение значений функции, что объясняется влиянием эффекта ресурсосбережения. Характер изменения функции от μ обращает внимание на то, что су-

$$L_{i,j}:=\frac{cx\cdot\left(1-k_i\right)\cdot\left(\int_0^{tx+ty}e^{-\lambda\cdot t}\,td\right)+cxl\cdot k_i\cdot\left(\int_0^{tx}e^{-\lambda 1\cdot t}\,td\right)+cy\cdot\left(k_i\cdot e^{-\lambda 1\cdot tx}\right)\cdot\int_{tx}^{tx+ty}\left(1-e^{-\mu_j\cdot t}\right)td}{\left(1-k_i\right)\cdot e^{-\lambda\cdot tx}+k_i\cdot e^{-\lambda 1\cdot tx}\cdot\left(1-e^{-\mu_j\cdot ty}\right)} \quad (10)$$

ществует некоторое значение параметра μ, которое соответствует минимальному значению критериальной функции на всем диапазоне изменения параметра k. При этом дальнейшее увеличение значения μ незначительно влияет на изменение значения функции. Очевидно, что увеличение интенсивности восстановления работоспособности ТУ при одновременном сокращении объектов восстановления не приводит к существенному увеличению суммарной стоимости поддержания готовности.

Выводы

Представленные постановки задачи оптимизации программного управления ресурсными возможностями совокупности однотипных технических устройств учитывают состояние и характер расходования ресурсов агрегатов и систем ТУ, а также временные и экономические параметры процессов поддержания и восстановления работоспособности ТУ и позволяют получить количественные оценки возможности продления сроков эксплуатации ТУ в условиях ресурсных ограничений.

Литература

1. Карулин В.П. Критерии оценки возможности продления сроков эксплуатации технических систем в условиях ресурсных ограничений // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук, 2013. Вып. 3. С. 30-35.

2. Карулин В.П. Ресурсосберегающий подход к сохранению работоспособности совокупности технических устройств в условиях изменения требований к уровню технического состояния // Известия Института инженерной физики, 2015. №1(35). С. 76-82.

3. Карулин В.П., Пьянков В.В., Чобанян В.А. Интегральный показатель оценки технической готовности организаций и отраслей оборонно-промышленного комплекса // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук, 2013. Вып. 2. С. 28-33.

4. Емелин Н.М. Анализ и синтез систем обеспечения надежности информационно-управляющих систем (марковский подход) // Известия Института инженерной физики, 2015. №4(38). С. 3-9.

5. Емелин Н.М. Надежность ракетно-космических комплексов. М: Интерфизика, 2007. 232 с.

6. Волков Л.И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. М: Высшая школа, 1981. 368 с.

УДК 681.5

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ПРЕЦИЗИОННОЙ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

ON THE ELECTROMECHANICAL PART OF PRECISE DIGITAL SYSTEM MODULATION PECULIARITIES WITH PULSE-WIDTH CONTROL

Валерий Аркадьевич Коковин
кандидат технических наук
заведующий лабораторией
филиал «Протвино»
государственного университета «Дубна»
Адрес: 142281, Московская обл.,
г. Протвино, Северный пр-д, д. 9
Тел.: +7(4967)31-02-34
E-mail: alekskv@mail.ru

Александр Александрович Евсиков
кандидат технических наук
директор
филиал «Протвино»
государственного университета «Дубна»
Адрес: 142281, Московская обл.,
г. Протвино, Северный пр-д, д. 9
Тел.: +7(4967)31-01-90
E-mail: eaa@uni-protvino.ru

Анатолий Петрович Леонов
кандидат технических наук
старший научный сотрудник
заместитель директора
по учебной и научной работе
филиал «Протвино»
государственного университета «Дубна»
Адрес: 142281, Московская обл., г. Протвино,
Северный пр-д, д. 9
Тел. +7(94967)31-01-92
E-mail: anatoli.leonov@gmail.com

Аннотация

Систематизированы факторы, определяющие механические и электромагнитные процессы в электромеханической части прецизионной цифровой системы автоматического управления малой и средней мощности при широтно-импульсном управлении. С их учетом разработана нелинейная структурная схема электромеханической части, определены схемы замещения и расчетные выражения для ее моделирования. Исследовано влияние частоты коммутации на амплитуду пульсаций скорости, механические и динамические характеристики системы «управляемый преобразователь – двигатель – кинематическая передача – объект управления».

Ключевые слова: электромеханическая часть прецизионной цифровой системы автоматического управления, широтно-импульсное управление, мгновенные значения регулируемых величин, адекватность математической модели.

Summary

The factors are systematized that define the mechanical and electromagnetic processes in the electromechanical part of precise digital automatic system of low and medium power by pulse-width control. Taking them into account the nonlinear structural scheme of the electromechanical part is developed, substitutional schemes and calculation expressions for its modulation are defined. Commutation frequency influence by pulse-width control on the speed pulsation amplitude is analyzed as well as the mechanical and dynamical characteristics of the system "controlled transducer – motor – kinematic transmission – control object".

Keywords: electromechanical part of precise digital automatic system, pulse-width control, instantaneous magnitudes of controlled values, mathematical model adequacy.

Обеспечение заданных точности и производительности автоматизируемого оборудования является основной целью применения прецизионных цифровых систем автоматического управления (ЦСАУ). При этом реализуются автоматические режимы пуска, торможения, реверсирования, регулирования момента двигателя с его ограничением в переходных режимах, точного позиционирования. Проектирование ЦСАУ начинается с моделирования электромеханической части (ЭМЧ), поскольку ее параметры являются определяющими для обеспечения заданного качества управления [1] и исходными для выбора датчиков и структуры цифровой системы управления (ЦСУ). Математическая модель ЭМЧ при широтно-импульсном управлении (ШИУ) является нелинейной [2], а ее адекватность реальной системе определяется принимаемыми при построении допущениями.

1. Построение адекватной математической модели ЭМЧ прецизионной цифровой системы с широтно-импульсным управлением

Рассмотрим особенности построения математической модели ЭМЧ на базе двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ) малой или средней мощности с ШИУ по цепи якоря от реверсивного полупроводникового управляемого преобразователя (УП).

Для построения модели необходимо:

1. Выделить факторы, определяющие механические и электромагнитные процессы в ЭМЧ во всем диапазоне регулирования, с их учетом разработать ее структурную схему.

2. Разработать схемы замещения и определить выражения для расчета параметров ЭМЧ в ее различных режимах работы.

1.1. Разработка структурной схемы ЭМЧ прецизионной ЦСАУ

В структурной схеме должны быть учтены факторы, имеющие место при ШИУ по цепи якоря как в режиме точного позиционирования (ТП), так и в режиме отработки «больших» рассогласований [3, 4, 5, 6, 7].

Выделим общие для обоих режимов факторы [8]:

- напряжение $U_{ОВ}$ на обмотке возбуждения постоянно и равно номинальному, магнитный поток $Ф$ в двигателе постоянен;
- индуктивность цепи якоря $L_{ЯЦ}=L_{Я}+L_{Ф}\neq 0$, где $L_{Я}$ – индуктивность обмотки якоря; $L_{Ф}$ – индуктивность сглаживающего фильтра на выходе УП;
- механическая $T_{М}=JR_{ЯЦ}/c_{E}c_{M}$ и электромагнитная $T_{ЯЦ}=L_{ЯЦ}/\mathrm{R}_{ЯЦ}$ инерционности соизмеримы, где J – приведенный к валу двигателя момент инерции ЭМЧ; $R_{ЯЦ}$ – активное сопротивление цепи якоря, включающее выходное сопротивление УП, активные сопротивления сглаживающего фильтра, соединительных проводов, обмотки якоря; c_{E}, c_{M} – конструктивные постоянные двигателя;
- фактор, вызывающий переходный процесс, изменяется мгновенно;
- величина момента сопротивления M_{C}^{*} не постоянна и зависит от режима работы ЭМЧ.

В режиме ТП учитываются [3, 4, 5]:

- наличие люфта, $\varphi_{В}=f(\Delta\varphi)$, где $\Delta\varphi$ – величина люфта, $\varphi_{В}$ – угол поворота вала двигателя; при выборке $\Delta\varphi$ полагаем $M_{C}^{*}=M_{CXX}$ (M_{CXX} – момент сопротивления на холостом ходу двигателя), приведенный к валу двигателя момент инерции J равен моменту инерции якоря $J_{Я}$;
- «податливость» системы «ДПТ НВ – кинематическая передача (КП) – объект управления (ОУ)», $M_{C}^{*}=c\,(\varphi_{ДВ}-\varphi_{В})$, где c – жесткость механической системы, $\varphi_{ДВ}$, $\varphi_{В}$ – соответственно угол поворота вала двигателя и ходового винта [4];
- зависимость момента сопротивления M_{C}^{*} от координаты S ОУ, $M_{C}^{*}=f(S)$ [5].

Достоверный математический расчет указанных характеристик затруднителен. В литературе [3, 4, 5] авторами рассмотрены способы их экспериментального определения и методика выделения «зоны существования микроперемещений».

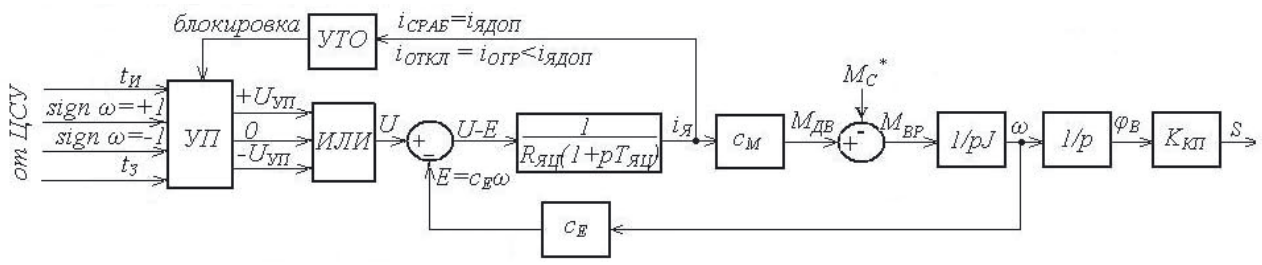


Рис. 1. Структурная схема ЭМЧ

В режиме «больших» рассогласований рекомендуется учитывать:

- зависимость M_C^* от линейной V или угловой ω скорости ОУ, $M_C^*=f(V)$ или $M_C^*=f(\omega)$ [5];
- введение устройства токового ограничения (УТО) для ограничения тока якоря $i_я$ в переходных режимах;
- блокировку УП на время $t_з$ при команде на реверс или торможение;
- учет упругих деформаций при выполнении условия $\omega_{РЕЗ}<\omega_{СР}$, где $\omega_{РЕЗ}$ частота резонансного пика амплитудно-частотной характеристики, $\omega_{СР}$ – частота среза ЦСАУ [5, 9].

С учетом указанных факторов разработана структурная схема ЭМЧ прецизионной ЦСАУ с ШИУ по цепи якоря ДПТ НВ (*рисунок 1*). Преобразование угла $\varphi_в$ в линейное перемещение S осуществляет КП с коэффициентом передачи $K_{КП}$ *[м/рад]*.

1.2. Построение схем замещения системы «УП – двигатель» и определение математических выражений для моделирования ЭМЧ

На основе структурной схемы ЭМЧ (*рисунок 1*) для определения расчетных соотношений разработаны схемы замещения системы «УП – ДПТ НВ»:

1.2.1. Схема замещения на *рисунке 2* соответствует двигательному режиму работы при $U=\pm U_{УП}$ в интервале $0 \le t \le t_И$ в режиме непрерывных токов (НТ) [8, 10] или в интервале $0 \le t \le t_И - t_{ТР}$ при ТП [3], где $t_И=kT$ – длительность импульса при ШИУ, T – период ШИУ, $0 \le k \le 1$, $t_{ТР}$ – момент трогания при ТП. При вращении вала по часовой стрелке (*sign* $\omega=+1$) ключи *K1* и *K2* замкнуты, *K3* и *K4* разомкнуты, направление тока $i_я$ указано стрелкой. При вращении вала против часовой стрелки (*sign* $\omega=-1$) ключи *K1* и *K2* разомкнуты, *K3* и *K4* замкнуты.

В режиме НТ механические и электромагнитные процессы в ЭМЧ, описываются системой уравнений [10]:

$$U=i_я R_{ЯЦ} + L_{ЯЦ}\cdot di_я/dt + c_E\omega$$
$$M_{ДВ}=M_C^* + Jd\omega/dt$$
$$M_{ДВ}=c_M\cdot i_я$$

В результате ее решения получаем дифференциальное уравнение 2-го порядка для скорости ДПТ НВ, что отражает наличие двух накопителей энергии: электромагнитной – якорная цепь ДПТ НВ и механической – механическая часть электропривода.

$$T_{ЯЦ}T_M\cdot d^2\omega/dt^2 + T_M\cdot d\omega/dt + \omega=\omega_{УСТ}. \quad (1)$$
$$\omega_{УСТ}=(U/c_E) - (sign\ \omega)\cdot M_C^*\cdot R_{ЯЦ}/c_E c_M. \quad (2)$$

Вид переходного процесса зависит от соотношения постоянных времени $T_{ЯЦ}$ и T_M, которые определяют корни p_1 и p_2 характеристического уравнения $T_{ЯЦ}T_M p^2 + T_M p + 1=0$.

При $T_M>4T_{ЯЦ}$ корни имеют действительные отрицательные значения. С учетом постоянных интегрирования и ненулевых начальных условий [10]

$$\omega(t)=\omega_{УСТ}+[1/(p_2-p_1)]\cdot\{[p_2\cdot(\omega_{НАЧ}-\omega_{УСТ})-(d\omega/dt)_{НАЧ}]\cdot e^{p1t} + [-p_1\cdot(\omega_{НАЧ}-\omega_{УСТ})+(d\omega/dt)_{НАЧ}]\cdot e^{p2t}\}. \quad (3)$$

где $\omega_{НАЧ}$ и $(d\omega/dt)_{НАЧ}$ – соответственно значения угловой скорости и ускорения при $t=0$.

Угол поворота вала двигателя

$$\varphi(t)=\varphi_{НАЧ}+\int_0^t\omega(t)dt=\varphi_{НАЧ} + \omega_{УСТ}\cdot t - [p_2\cdot(\omega_{НАЧ}-\omega_{УСТ}) - (d\omega/dt)_{НАЧ})\cdot(1-e^{p1t})]/p_1(p_2-p_1) + [p_1(\omega_{НАЧ}-\omega_{УСТ}) - (d\omega/dt)_{НАЧ})\cdot(1-e^{p2t})]/p_2(p_2-p_1), \quad (4)$$

где $\varphi_{НАЧ}$ – значение угла поворота при $t=0$.

Выражение для определения $i_я$

$$i_я(t)=i_{ЯНАЧ}+[U-c_E\omega\cdot(sign\ \omega)]\cdot(1-e^{-t/T_{ЯЦ}})/R_{ЯЦ}, \quad (5)$$

где $i_{ЯНАЧ}$ – значение тока $i_я$ при $t=0$.

В режиме ТП $i_{ЯНАЧ}=0$, $c_E\omega<<U$ и

$$i_я(t)=U\cdot(1-e^{-t/T_{ЯЦ}})/R_{ЯЦ}. \quad (6)$$

Формулы для определения $\omega(t)$ и $\varphi(t)$ в режиме ТП приведены в литературе [4].

1.2.2. При $U=0$ схема замещения представлена на *рисунке 3*. Направление $i_я$ указано для *sign* $\omega=+1$, когда ключ *K2* замкнут, ключи *K1*, *K3* и *K4* разомкнуты. Для режима НТ схема замещения соответствует паузе $0<t<T-t_И$ или при срабатывании УТО $0 \le t \le t_{ОГР} - t_{ДОП}$, где $t_{ДОП}$ – мо-

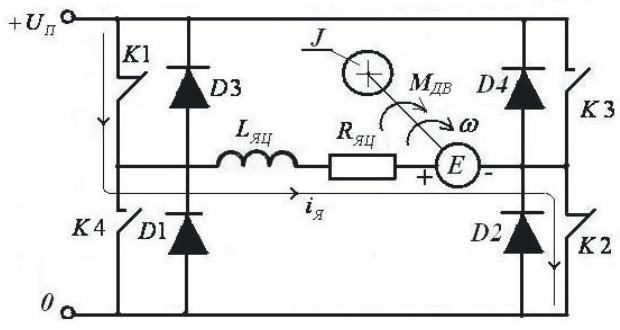


Рис. 2. Схема замещения для двигательного режима при $U=\pm U_{уп}$

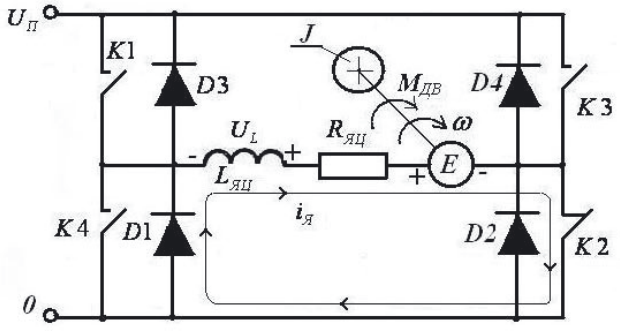


Рис. 3. Схема замещения для двигательного режима при $U=0$

мент, когда $i_Я=i_{ЯДОП}$; $t_{ОГР}$ – момент, когда $i_Я=i_{ЯОГР}$. При *sign* $\omega=-1$ ключ *K4* замкнут, ключи *K1*, *K2* и *K3* разомкнуты. Разница между величинами $i_{ЯДОП}$ и $i_{ЯОГР}$ определяет частоту срабатывания УТО. Для режима ТП схема замещения соответствует интервалу $0<t<t_0$, где t_0 – момент времени, когда $i_Я=0$.

Учитывая, что $0=i_Я \cdot R_{ЯЦ}+L_{ЯЦ} \cdot di_Я/dt+c_E \cdot \omega$, выражение для $i_Я$

$$i_Я(t)=i_{ЯКОН}-c_E\omega \cdot (sign\ \omega) \cdot (1-e^{-t/Tяц})/R_{ЯЦ}\ , \qquad (7)$$

где $i_{ЯКОН}$ – величина $i_Я$ в конце $t_И$ или $i_{ЯКОН}=i_{ЯДОП}$ при включении УТО.

При $M_{ДВ}=i_Я \cdot c_M>M_C^*$ определяем ω из выражения (3), где $\omega_{УСТ}$ вычисляется по формуле (2) при $U=0$; из выражения (4) определяем $\varphi(t)$.

Формулы для вычисления $i_Я(t)$, $\omega(t)$ и $\varphi(t)$ в режиме ТП приведены в литературе [4].

Если $M_{ДВ}=i_Я \cdot c_M<M_C^*$, то

$$\omega(t) = \omega_C - (sign\ \omega_C) \cdot M_C^* \cdot t/J\ , \qquad (8)$$

где ω_C – значение ω при $i_Я \cdot c_M=M_C^*$;

$$\varphi(t) = \varphi_C+\omega_C \cdot t - (sign\ \omega_C) \cdot M_C^* \cdot t^2/2J\ , \qquad (9)$$

где φ_C – значение φ при ω_C.

Если при $0<t_1<T-t_И$ скорость $\omega(t_1)=0$, то в формулах (8 и 9) значение $0 \le t \le t_1$.

1.2.3. Схема замещения на *рисунке 4* соответствует режиму блокировки УП ($U=0$) на время $t_З$ при включении реверса или торможения. Для исключения режима «сквозных токов» [6] все ключи разомкнуты. За время $t_З$ ток $i_Я$ ***уменьшается до нуля***. Его направление указано для *sign* $\omega=+1$.

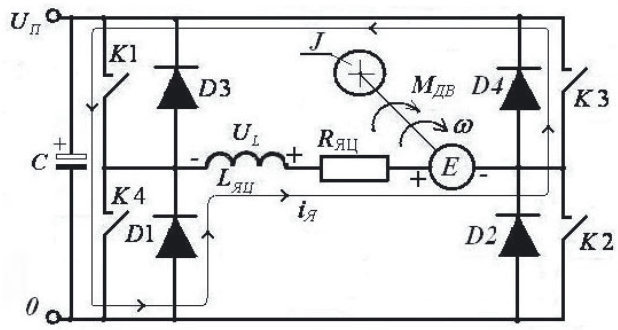


Рис. 4. Схема замещения для блокировки при реверсе

В интервале $0< t<t_З$ величина $i_Я$ определяется из выражения

$$i_Я(t)=i_{ЯНАЧ}+[1/(\beta_2-\beta_1)] \cdot \{[\beta_2 \cdot I_{ЯНАЧ}+(di_Я/dt)_{НАЧ}] \cdot e^{\beta 1t} - [\beta_1 \cdot I_{ЯНАЧ}+(di_Я/dt)_{НАЧ}] \cdot e^{\beta 2t}\}\ , \qquad (10)$$

где $i_{ЯНАЧ}$, $(di_Я/dt)_{НАЧ}$ – соответственно значения тока и скорости его изменения при $t=0$; β_1 и β_2 – корни уравнения $T_{ЯЦ} \cdot p^2 + p + 1/CR_{ЯЦ}=0$.

Пока $M_{ДВ}=i_Я \cdot c_M > M_C^*$ значения $\omega(t)$ и $\varphi(t)$ определяются по формулам (3, 4). Если $M_{ДВ}=i_{Я2} \cdot c_M < M_C^*$, то $\omega(t)$ и $\varphi(t)$ определяются по формулам (8, 9).

1.2.4. Схема замещения на *рисунке 5* соответствует генераторному режиму при торможении противовключением, направление момента двигателя противоположно направлению вращения. По окончании интервала $t_З$ при *sign* $\omega=+1$ ключи *K3 и K4*, замкнуты, *K1 и K2* – разомкнуты, при *sign* $\omega=-1$ ключи *K1 и K2*, замкнуты, *K3 и K4* – разомкнуты. Поскольку напряжение *U* и противо эдс *E* включены согласно *тормозной ток* $i_Я$ достигает величины $i_{ЯДОП}$ и включается УТО *(рисунок 3)*. При уменьшении $i_Я$, до $i_{ЯОГР}$ возвращаемся к данной схеме замещения.

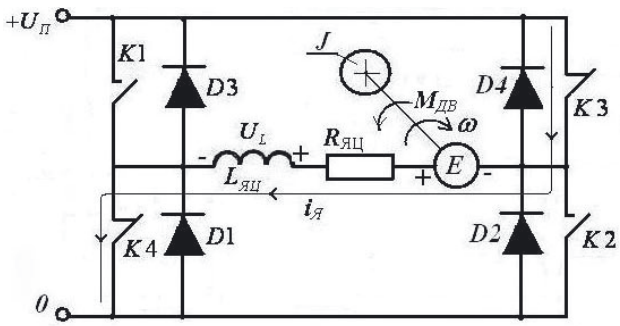


Рис. 5. Схема замещения для генераторного режима при торможении противовключением

В интервалах $0< t<t_И$ *или* $0< t<t_{ДОП}$ интенсивность торможения задается шириной импульса $t_И$

$$i_Я(t)=i_{ЯНАЧ}+[(U+c_E\omega \cdot (sign\ \omega)][(1-e^{-t/TЯЦ})]/R_{ЯЦ}\ , \qquad (11)$$

где $i_{ЯНАЧ}$ – значение $i_Я$ в начале интервала $t_И$.

Величины $\omega(t)$ и $\varphi(t)$ определяются из выражений (3, 4), но при $\omega_{УСТ}=(U/c_E) + (sign\ \omega) \cdot M_C^* \cdot R_{ЯЦ}/c_E c_M$. Расчет заканчивается при $\omega(t)=0$. Далее осуществляется или остановка ОУ, или его разгон в противоположную сторону (*рисунок 2*).

1.2.5. При реверсе в режиме НТ последовательно выполняются операции: блокировка напряжения на выходе УП *(рисунок 4)*, торможение противовключением *(рисунок 5)* с включением УТО *(рисунок 3)*, разгон двигателя в противоположном направлении *(рисунок 2)*.

2. Исследование влияния частоты коммутации УП на регулируемые параметры ЭМЧ

Для изучения влияния частоты коммутации УП на механические и динамические характеристики, амплитуду пульсаций мгновенной скорости была исследована система управления кареткой прибора для измерения треков заряженных частиц [4]. По расчетным и эксперимен-

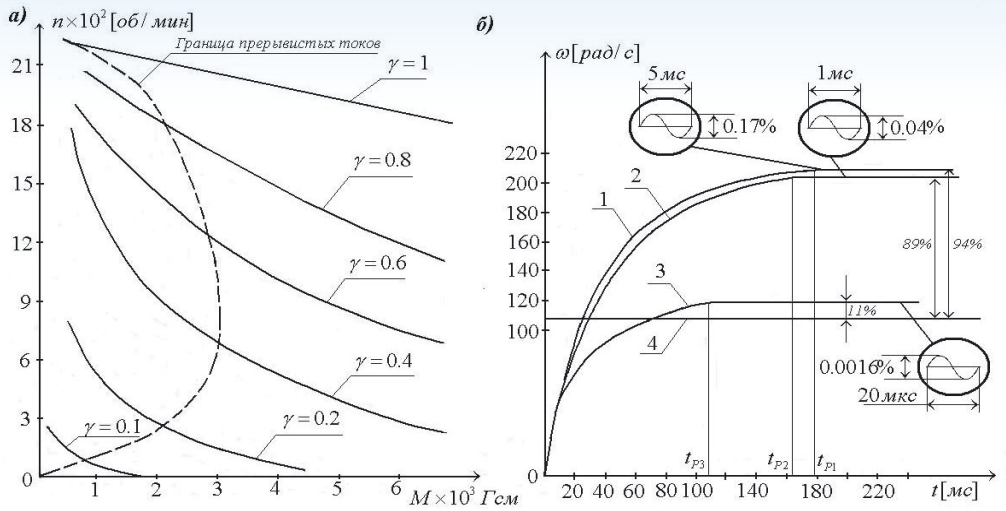


Рис. 6. Характеристики системы «УП – ДПТ НВ – КП – ОУ»: **а)** механические, **б)** динамические

тальным данным на *рисунке 6а* построены механические характеристики исследуемой системы «УП – ДПТ НВ – КП – ОУ» при частоте f=1 кГц. Их анализ показывает, что при такой частоте и несимметричном управлении УП невозможно обеспечить плавное регулирование скорости в широком диапазоне изменения скважности γ из-за появления режима «прерывистых токов». Увеличение частоты коммутации, например, до 50 кГц, связано с определенными трудностями. При f=50 кГц из-за большой рассеиваемой мощности в силовых транзисторах в моменты их переключения и возможности протекания сквозных токов в моменты реверса из-за увеличения времени рассасывания неосновных носителей значительно снижаются показатели габаритной мощности и надежности УП. Эти обстоятельства ограничивают сверху частоту коммутации УП при ШИУ. На *рисунке 6б* построены динамические характеристики исследуемой ЭМЧ при скважности импульсов $\gamma=0,5$ и частотах коммутации УП 0,2 кГц (график 1), 1 кГц (график 2), 50 кГц (график 3), постоянное напряжение $U=\gamma \cdot U_{УП}$ (график 4). Анализ графиков показывает, что при постоянном среднем напряжении на якоре ($\gamma=0,5$) и увеличении частоты коммутации время разгона и амплитуда пульсаций мгновенной скорости уменьшаются:

- при частоте коммутации f_1=0,2 кГц скорость достигает 210 рад/с и превышает скорость, соответствующую напряжению $U=\gamma \cdot U_{УП}$ на 94%, пульсации установившейся скорости – 0,17%, время разгона $t_{Р1} \approx 180$ *мс*;
- при f_2=1 кГц превышение скорости 89%, пульсации скорости – 0,04%, $t_{Р2} \approx 165$ *мс*;
- при f_3=50 кГц превышение скорости 11%, пульсации скорости – 0,0016%, $t_{Р3} \approx 110$ *мс*.

Выводы

1. При проектировании прецизионных систем с ШИУ расчет выполняется не по средним, а по мгновенным значениям момента и скорости.
2. В зависимости от режима работы ЦСАУ в модели ЭМЧ учитываются разные факторы.
3. При проектировании высокоточных систем используются экспериментальные зависимости $M_C^*=f(V)$, $M_C^*=f(S)$, $\varphi_B=f(\Delta\varphi)$ и др.
4. Для прецизионных ЦСАУ целесообразно применять УП с частотой коммутации от 20 кГц и выше.

Литература

1. Домнин А.Н., Смирнов В.А., Волков М.А. О выборе исполнительного двигателя гироскопического следящего привода // Известия Института инженерной физики, 2009, №4(14). С. 60-64.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. Изд. 4-е, перераб. и доп. СПб.: Профессия, 2007. 752 с.
3. Евсиков А.А., Леонов А.П., Устинов Е.А. Учет упругих деформаций механических звеньев при моделировании высокоточных позиционных сервоприводов малой мощности // Инженерная физика, 2009. №10. С. 25-28.
4. Леонов А.П. О построении математических моделей цифровых систем автоматического управления в режиме точного позиционирования // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2011. №12. С. 5-9.
5. Евсиков А.А., Леонов А.П. Учет механических параметров приводов при моделировании цифровых позиционных систем управления // Фундаментальные проблемы технических наук. Сборник статей Меж-дународной научно-практической конференции. Уфа: РИЦ БашГУ, 2014. С. 52-56.
6. Леонов А.П., Попов В.В., Устинов Е.А. Ревер-сивный транзисторный преобразователь для управления двигателем постоянного тока // Приборы и техника эксперимента, 1978, №5. С. 180-182.
7. Медведев В.С., Леонов А.П. Микропроцессорное управление следящими приводами станков для обработки печатных плат в гибком автоматизированном производстве // Известия Академии наук СССР. Техническая кибернетика, 1987, №3. С. 123-131.
8. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода: Учебное пособие для вузов. М.: Издательство МЭИ, 2003. 224 с.
9. Чернянский П.М., Селезнева В.В. Основы расчета динамических систем станков: Учебное пособие. М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1983. 34 с.
10. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 416 с.



УДК 539.182

ВВЕДЕНИЕ В ГЕОМЕТРИЮ N–АРНЫХ КОМПЛЕКСНЫХ ЧИСЕЛ

INTRODUCTION TO THE GEOMETRY OF THE N–ARY COMPLEX NUMBERS

Сергей Владимирович Смуров
доктор технических наук, профессор
Первый заместитель Генерального директора по научной работе – главный конструктор
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: svs_iif@mail.ru

Геннадий Германович Волков
доктор физико-математических наук, профессор
ведущий научный сотрудник
ФГБУ Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Адрес: 188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова роща
Тел.: +7(813-71)-46-025
E-mail: gennadii.volkov@rambler.ru

Николай Сергеевич Кукин
кандидат технических наук
начальник лаборатории
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93, доб. 305
E-mail: n.s.kukin@mail.ru

Анна Руслановна Мурадова
студентка
Университет машиностроения (МАМИ)
техник-программист
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93

Ирина Олеговна Глотова
студентка
Университет машиностроения (МАМИ)
техник-программист
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93

Аннотация

В данной статье мы следуем целям нашей предыдущей публикации [1], которые связаны с проблемами расширения алгебраических и геометрических основ современной квантовой физики на основе построения новых теорий комплексных чисел, альтернативных теориям комплексных и гиперкомплексных чисел. Мы исследуем теории с более сложной структурой комплексных чисел так, как этот путь может значительно обогатить наши представления о возможной пространственно-временной структуре микро- и макромиров, в части описания дополнительных пространственных и/или временных измерений, объяснить существование экзотической пра-материи с необычными спиновыми свойствами, которая могла бы быть кандидатом на темную материю, и, соответственно, возможное существование во вселенной «невидимых» видов излучений, связанных с новыми калибровочными абелевыми симметриями, которые естественно возникают в рассматриваемом подходе. В данной статье в качестве введения в эту математику мы обозреваем ряд важнейших достижений, касающихся применения бинарных комплексных чисел в квантовой физике, и необходимость их расширения в рамках N-арных комплексных чисел с N≥3. Для построения новых «комплексных чисел» и создания соответствующих теорий комплексного анализа могут быть использованы конечные абелевы циклические CN-группы (N=3,4,5,…) и их представления.

Ключевые слова: конечные группы, N-арные комплексные числа, N-арные алгебры, комплексификация n-мерных Эвклидовых пространств, нормделитель алгебра, структура материи.

Summary

In this paper we follow the goals of our previous publication [1], which is connected with the problems of expansion of algebraic and geometric foundations of modern quantum physics based on the construction of new theories of "complex numbers", an alternative theory of complex and hyper-complex numbers. We explore the theory with a more complex structure of complex numbers as this way can greatly enrich our understanding of the potential of space-time structure of the micro- and macrocosm such as additional spatial and temporal dimensions, or to explain the existence of exotic matter-great with unusual properties which could be a candidate for dark matter, and, accordingly, the possible existence in the universe of "invisible" types of radiation associated with the new gauge abelian symmetries that naturally occur in this approach. In this paper, as an introduction to the mathematical and philosophical understanding of the new structures of imaginary number we survey some of the most important achievements in the application of the theory of binary complex numbers in quantum physics, and discussed the need to extend it in the framework of N-ary complex numbers with N≥3.The finite abelian cyclic groups (N=3,4,5, ...) – C_N can be used to construct the new "complex numbers" and the creation of appropriate theory of complex analysis.

Keywords: finite groups, N-arny complex numbers, N-arny algebras, complexification of n-dimensional Euclidean spaces, norm-division algebra, structure of matter.

Введение

Одни из самых знаменательных событий в физике XX века были связаны с открытием спина и анти-материи. Что объединяет эти два события, открывшие нам новые фундаментальные свойства материи-фотона, электрона+позитрона, протона+антипротона, нейтрона-антинейтрона b, составляющие основу всей нашей видимой части Вселенной?

С точки зрения математического абстрактного мировоззрения за этими открытиями стоит мощный прогресс в теории чисел в XV-XIX веках, который привел к расширению понятий поля действительных чисел R на комплексные числа C, на некоммутирующие кватернионы H и их прямую связь с алгебрами и группами Ли [2, 3, 4]: ортогональными o(n), so(n) (O(n), SO(n)) и унитарными u(n), su(n) (U(n), SU(n)), соответственно. Специальная теория относительности, сформулированная на основе открытий электромагнитной природы света и фундаментального свойства света – абсолютизма, а также первые попытки квантового описания атома водорода, были сделаны на основе пространственных и временных симметрий, которые характеризуются ортогональными группами и их представлениями. Такое описание не давало полную картину возможных и невозможных явлений как в специальной теории относительности, так и в квантовой физике.

Дважды накрывающие группы в квантовой физике

Открытия спина и анти-материи показало исключительную роль унитарных Spin групп SU(2) и SU(2)XSU(2), дважды накрывающих ортогональные группы SO(3) и SO(1,3), соответственно.

$Spin(N) \overset{2}{\to} SO(N)$. $Spin(N)$ – компактная односвязная и для N>3 просто связанная группа [4,6]: $SU(2) = Spin(3) \overset{2}{\to} SO(3)$, $SL(2,C) = Spin(4) \overset{2}{\to} SO(1,3), SU(2,2) \overset{2}{\to} SO(2,4)$, причем Ли- алгебры ортогональных групп и их накрывающих изоморфны $spin(N) \approx so(N)$:

$$su(2) = spin(3) \approx so(3),$$

$$sl(2,C) = spin(4) \approx so(1,3), su(2,2) \approx so(2,4).$$

Сравним трехмерные ортогональные преобразования группы SO(3) и унитарные преобразования группы SU(2) в двумерном пространстве[5, 6].

Эрмитовы генераторы L_i **группы SO(3):**

$$L_1 = i\begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \; L_2 = i\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \; L_3 = i\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

образуют коммутационную so(3) алгебру Ли

$$\left[L_i, L_j\right] = i\varepsilon_{ijk}L_k\,. \quad (2)$$

Оператор вращения $R(\vec{n})$ в трехмерном пространстве вокруг произвольного направляющего вектора $\vec{n} = (n_1, n_2, n_3)$, выражается через известную формулу Ричардсона [5]. Ось вращения задается нормированным вектором $\hat{n} = \vec{n}/n$, а угол величиной $\vartheta = n = \sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2}$.

$$R(\hat{n}, \vartheta) = exp\left(i\vartheta\hat{n}\cdot\vec{L}\right) =$$

$$= \hat{1}_3 - sin\vartheta\left(i\,\hat{n}\cdot\vec{L}\right) + (1 - cos\vartheta)\left(i\,\hat{n}\cdot\vec{L}\right)^2, \quad (3)$$

где $\vec{L} = \sum_{i=1}^{3} L_1$.

SU(2)-преобразование выражается через 2x2-матрицу с единичным детерминантом

$$U = \begin{pmatrix} z_1^* & -z_2^* \\ z_2 & z_1 \end{pmatrix}, \quad |z_1|^2 + |z_2|^2 = 1. \quad (4)$$

Выражая $z_1 = x_0 + ix_3, z_2 = x_1 - ix_2$, убеждаемся, что группа SU(2) является групповым многообразием $SU(2) \cong S^3 = \{x_\mu \epsilon S^3, \mu = 0,1,2,3 | x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = 1\}$:

$$U = x_0\sigma_0 + i\vec{x}\vec{\sigma}, \quad (5)$$

где

$$\sigma_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Вводя параметризацию Кэли-Клейна через вектор вращения $\vec{n} = (n_1, n_2, n_3)$, $x_0 = cos\frac{n}{2}$, $\vec{x} = \hat{n}\, sin\frac{n}{2}$, SU(2) преобразование можно выразить в экспоненциальном виде:

$$U(\hat{n}, \vartheta) = \hat{1}_2\, cos\frac{n}{2} - i(\hat{n}\cdot\vec{\sigma})\sin\frac{n}{2} =$$

$$= \exp\left(-i\frac{\vec{n}\cdot\vec{\sigma}}{2}\right) = \exp\left(-i\,\vartheta\,\hat{n}\cdot\vec{I}\right), \quad (6)$$

где генераторы группы SU(2), представленные через матрицы Паули следующим образом: $I_1 = \frac{\sigma_1}{2}, I_2 = \frac{\sigma_2}{2}, I_3 = \frac{\sigma_3}{2}$, образуют su(2)-алгебру Ли

$$\left[I_i, I_j\right] = i\varepsilon_{ijk}I_k, \quad (7)$$

которая изоморфна Ли алгебре so(3) группы SO(3): $su(2) \approx so(3)$.

Итак, если локальные свойства групп SO(3) и SU(2) изоморфны, то глобальные свойства этих групп существенно различаются. Чтобы убедиться в этом рассмотрим действие оператора вращения на трехмерный вектор $\vec{x}$. Тогда можно показать, что преобразованный относительно группы SO(3) вектор $\vec{x}'$ выражается через вектор $\vec{x}$ следующим образом [5]:

$$\vec{x}' = \vec{x}\cos\vartheta + (\hat{n}\times\vec{x})\sin\vartheta + (\hat{n}\cdot\vec{x})\hat{n}(1 - cos\vartheta). \quad (8)$$

Теперь рассмотрим унитарное преобразование в двух комплексных измерениях.

Для этого введем Эрмитову матрицу

$$\hat{X} = \vec{x}\cdot\vec{\sigma}, \quad (9)$$

из которой следует

$$\vec{x} = \frac{1}{2}\left(\hat{X}\vec{\sigma} + \vec{\sigma}\hat{X}\right). \quad (10)$$

Тогда осуществляемое над эрмитовой матрицей $\hat{X}^+ = \hat{X}$ SU(2) – унитарное преобразование:

$$\hat{X}' = U(\hat{n}, \vartheta)\hat{X}\,U^+(\hat{n}, \vartheta),\ \hat{X}'^+ = \hat{X}' \quad (11)$$

соответствует преобразованию вектора $\vec{x} \to \vec{x}'$:

$$\hat{X}' = (\vec{x}\cdot\vec{\sigma})\cos\vartheta + (\hat{n}\times\vec{x})\cdot\vec{\sigma}\sin\vartheta +$$

$$+ (\hat{n}\cdot\vec{x})\widehat{(n}\cdot\vec{\sigma})(1 - cos\vartheta) \quad (12)$$

или

$$\vec{x}' = \vec{x}\cos\vartheta + (\hat{n}\times\vec{x})\sin\vartheta + (\hat{n}\cdot\vec{x})\hat{n}(1 - cos\vartheta). \quad (13)$$

Это совпадение позволяет установить справедливость следующего соответствия между вращением в трехмерном пространстве и двумерным унитарным преобразованием:

$$R(\hat{n}, \vartheta) = \frac{1}{2}\left(U(\hat{n}, \vartheta)(\vec{x}\cdot\vec{\sigma})U^+(\hat{n}, \vartheta)\cdot\vec{\sigma} +\right.$$

$$\left. + \vec{\sigma}\cdot U(\hat{n}, \vartheta)(\vec{x}\cdot\vec{\sigma})U^+(\hat{n}, \vartheta)\right). \quad (14)$$

Из (3) и (14) следует, что группа SU(2) дважды накрывает группу SO(3):

$SU(2) \overset{2}{\to} SO(3)$, то есть вращению $R(\hat{n}, \vartheta)\left(R(\hat{n}, \vartheta + 2\pi) = R(\hat{n}, \vartheta)\right)$ соответствует два унитарных преобразования: $U(\hat{n}, \vartheta)$ и $U(\hat{n}, \vartheta + 2\pi) = -U(\hat{n}, \vartheta)$.

Заметим, что Ли группы SO(3) и SU(2) являются различными многообразиями. Так если $SU(2) \approx S^3$ – трехмерная сфера, то $SO(3) \approx \mathbb{R}P^3$ – 3-х мерное проективное пространство. Действительно, рассматривая SO(3)-преобразования как вращения на угол ϑ вокруг единичного вектора $\hat{n}, \vec{n} = \vartheta\hat{n}$, получим, что множество изменения всех трех параметров группы охватывает шар радиуса π: $0 \le \vartheta \le \pi$, причем повороты на угол $\pi \le \vartheta \le 2\pi$ соответствуют поворотам на угол $0 \le \vartheta \le \pi$ вокруг направления $-\hat{n}$. Но, так как повороты на угол вокруг векторов $\hat{n}$ и $-\hat{n}$ – одно и то же преобразование, пары диаметрально противоположных точек сферы S^3 радиуса π должны быть отождествлены, и результирующее многообразие образует проективное пространство $\mathbb{R}P^3 \approx \frac{S^3}{Z_2}$.

Оказывается, что именно дважды накрывающие группы определяют в рассматриваемом пространстве-времени внутренние свойства существующей в нем материи. Так значения спина разделяют два вида материи в специальной теории относительности – фермионы и бозоны, то есть, например, материя излучения фотон имеет спин 1, а материя вещество-электрон – полуцелый спин ½. Именно это обстоятельство позволило предположить [7, 8], что три-нейтрино кроме спина имеют дополнительные пространственно-временные свойства (дополнительное квантовое число), и поэтому не обязано следовать кинематическим аксиомам специальной теории относительности [1, 7, 8]. Это же утверждение справедливо для темной материи или праматерии.

Проблемы современной квантовой физики и пути расширения структуры комплексного числа

Итак, открытие спина и анти-материи было связано с тем общим алгебраическим утвержде-

нием, что ортогональные группы имеют дважды накрывающие Spin-группы и дальнейшее расширение геометрии пространства-времени с размерностью D>4 в рамках ортогональных групп, имеющих только дважды накрывающие Spin группы, может приводить к последующим удвоениям $2^{[D/2]}$ либо самих состояний, либо их каких-то новых внутренних свойств [6]. Если мы хотим найти геометрическое описание в рамках пространства-времени три-нейтрино или три цвета кварков то нам надо искать какие-то новые универсально накрывающие группы, например, трижды накрывающие пространственно-временную группу, которая может описать геометрию того пространственно-временного континуума, включающего темную праматерию,которая возможно стала началом образования видимой материи?! [1, 8] Естественно возникает вопрос о расширении и самих ортогональных групп SO(n), которые прежде служили кандидатами на любые возможные расширенные теории многомерного пространства-времени D>4, например в теории струн D=26=(1+25) мерном пространстве-времени с группой SO(1, 25) или в D=10-мерной теории суперструн – с группой SO(1, 9). По-видимому, именно это обстоятельство привело к тому, что теории великого объединения или Теории Всего Сущего, базирующиеся на струнном квантовании элементарных частиц, так и не смогло ответить на многие вопросы физики высоких энергий (стандарная модель содержит до 30 свободных параметров!) и физики нейтрино. Более реалистичным кандидатом могла бы послужить, теория основанная на мебранной идее строения элементарных частиц. Сравните с эволюцией развития квантования атома водорода – от наивной одномерной планетарной SO(2)-модели до реальной трехмерной SO(4) (SO(2,4))-теории [9].

Традиционная Риманова геометрия симметрических однородных компактных и некомпактных пространств, ассоциированная с Киллинг-Картан-Ли алгебрами, которые использовались в современной квантовой физике (Стандартная Модель (физика элементарных частиц), Теория Великого Объединения, теории суперструн), были непосредственно основаны на уже хорошо известных теориях чисел: вещественные $\mathbb{R}$, комплексные $\mathbb{C}$, кватернионы $\mathbb{H}$ и октонионы $\mathbb{O}$, числовые поля, образующие 4-мультипликативные нормированные алгебры с делением [2, 3, 4]:

$$\mathbb{R} \to O(n), SO(n);$$
$$\mathbb{C} \to U(n), SU(n);$$
$$\mathbb{H} \to Sp(n), Sp(n) \times Sp(1);$$
$$\mathbb{O} \to Spin(7), G(2).$$

Дальнейший прогресс в квантовой физике элементарных частиц и Космологии также связывается с возможностями эксперимента обнаружить темную материю и/или пра-материю, ответственную за структуру и уже изученные свойства кварков и лептонов. Но успех поисков лежит в понимании сигнатуры проявления темной пра-материи материи в том или ином эксперименте, которая может быть изучена в ряде гипотетических моделей, основанных на новых алгебраических и геометрических идеях [10]. Одно из направлений могло бы быть связано с обобщением уже изученных алгебраических и Римановых структур [5] в *D>4*-мерные пространственно-временные континуумы, которые могли бы быть построены на основе теорий новых экзотических «комплексных» чисел, и соответствующих им алгебр и групп симметрий.

Используя исторический положительный опыт изучения эволюционного развития теории комплексных чисел, можно было бы продолжить это направление, но уже углубляясь в понятия самого комплексного числа, а точнее понятия мнимости. Наша идеология связана не с расширением спектра мнимых единиц, как это происходит в рамках 4-х норм-делитель алгебр, а в углублении понятия структуры мнимости. Исторически развитие теории чисел в рамках 4-х норм-алгебр с делением $\mathbb{R}$, $\mathbb{C}$, $\mathbb{H}$, $\mathbb{O}$, т.е. действительными числами, комплексными числами, кватернионами и октонионами [2,3], привело к открытию Киллинг-Картан-Ли и их классификации. Эти алгебры A=($\mathbb{R}$, $\mathbb{C}$, $\mathbb{H}$, $\mathbb{O}$) являются векторными пространствами, которые оснащены билинейной композицией m:A×A→A, называемой умножением, и ненулевым элементом 1∈A, называемым единицей такой, что

$$m(1,a) = m(a,1) = a.$$

Нормированная алгебра с делением – это алгебра A, у которой нормированное векторное пространство с |ab|=|a||b|. Так $\mathbb{R}$, $\mathbb{C}$ являются коммутативными ассоциативными нормированными алгебрами, H является некоммутативной ассоциативной нормированной алгеброй. $\mathbb{O}$ – октонионы не ассоциативная альтернативная алгебра[1].

Единственно альтернативными бинарными алгебрами с делением над $\mathbb{R}^n$ являются $\mathbb{R}$, $\mathbb{H}$, $\mathbb{C}$, $\mathbb{O}$. Эти алгебры допускают анти-инволюцию (или сопряжение) (a*)*=a и (ab)*=b*a*. Такие алгебры существуют только для $\mathbb{R}^n$ n = 1,2,4,8

[1] Алгебра альтернативна, если a(ab)=a2b и (ab)b=ab2(a(ba)=(ab)a). Альтернативная алгебра с делением имеет единичный и обратный элемент.

размерностей, где справедливы следующие тождества:

$$|ab|^2 = |a|^2 * |b|^2.$$

Одним из интереснейших следствий существования 4-х норм делитель алгебр является выделенность эвклидовых пространств $\mathbb{R}^n$ с размерностями n=1,2,4,8, для которых связанные с ними многообразия приобретают групповые свойства. Так, сферы

$$S^{n-1} = \{x \ni \mathbb{R}^n,\ |x|^n = 1\}$$

в этих пространствах являются групповыми многообразиями, то есть

$$S^0 \approx Z_2, S^1 \approx U(1), S^3 \approx SU(2), S^7 \approx G2.$$

Возникает естественный вопрос: можно ли построить теории чисел с норм делитель алгебрами в Эвклидовых пространствах $\mathbb{R}^n$ R^n с размерностями $D = 3^n, 5^n, 6^n, 7^n, \ldots n = 1, 2, 3$? Для решения проблем современной квантовой физики наиболее насущный вопрос стоит для D=3: как объяснить в рамках пространственно-временной геометрии появление трех кварк-лептонных поколений и трех цветов кварков? Это явилось одним из важнейших аргументом изучения n-алгебр, n-симметрий *с* [11].

Изучение класса несимметрических пространств *CY(n)* (Калаби-Яу), определяемых группами голономии SU(n) [12], приобрели огромный интерес в теориях суперструн. Классификация этих пространств может быть осуществлена на основе универсальной N-арной алгебры рефлексивных проективных чисел, где n= 2,3,…[13].

В этом случае мы приходим к идеям комплексификации Эвклидовых пространств $\mathbb{R}^n$ для любого $n \geq 3$ со всеми вытекающими следствиями и приложениями.

Мы будем следовать изложению и обсуждению случая «комплексификации» Эвклидового пространства $\mathbb{R}^3$ с намерением дальнейшего обобщения теории тернарных комплексных чисел на несколько 9-арных чисел, образующих неабелеву алгебру нонионов, придерживаясь исторического Гамильтонового пути развития теории комплексного числа в рамках комплексной плоскости C до гипер-комплексных чисел-кватернионов H.

Так заметим, что если бинарные альтернативные алгебры с делением (вещественные числа, комплексные числа, кватернионы, октонионы) над вещественными числами имеют размерности 2^n, $n=0,1,2,3,4,\ldots$, то тернарные алгебры уже имеют следующие размерности 3^n, $n=0,1,2,3,4,\ldots$, соответственно:

$\mathbb{R}$:	$2^0 = 1$	$\mathbb{R}$:	$3^0 = 1$
$\mathbb{C}$:	$2^1 = 1+1$	$\mathbb{TC}$:	$3^1 = 1+1+1$
$\mathbb{H}$:	$2^2 = 1+2+1$	$\mathbb{TH}$:	$3^2 = 1+2+3+2+1$
$\mathbb{O}$:	$2^3 = 1+3+3+1$	$\mathbb{TO}$:	$3^3 = 1+3+6+7+6+3+1$

Для поиска путей «комплексификации» Эвклидовых пространств $\mathbb{R}^n$ мы могли бы использовать представителей из огромного класса конечных групп и их представлений, но для построения Абелевых групповых алгебр и соответствующих модулей мы используем конечные абелевы циклические группы, их представления и свойства характеров для неприводимых и регулярного представлений.

N-арные структуры комплексных чисел (N>2)

Основополагающей идеей для поиска новых структур в Эвклидовых пространствах $\mathbb{R}^n$ будет использование конечных групп G, как первый шаг, конструирование конечных групповых алгебр K[G] [2, 3] над уже известными нам полями K=$\mathbb{R}$,$\mathbb{C}$, которые строятся как всевозможные суммы

$$\sum_g a_g g, \quad a_g \in K,\ g \in G,$$

удовлетворяющие операциям ассоциативной алгебры:

$$\sum_g a_g g + \sum_g b_g g = \sum_g (a_g + b_g) g$$

$$\sum_g a_g g * \sum_f b_f f = \sum_{g,f} a_g\, b_f\, (g * f) = \sum_h c_h h, \quad (15)$$

$$h = g * f,$$

где a, b, c – элементы поля K;
g, f, h – элементы группы G.

Так построенная групповая алгебра K[G] конечной группы G над полем K=$\mathbb{R}$,$\mathbb{C}$ представляет G-мерное векторное пространство, размерность которого совпадает с размерностью групповой алгебры K[G], с базисом, состоящим из элементов группы. Действие группы G на K[G] является регулярным представлением. Аналогично можно рассмотреть конечномерное пространство V представления группы G, которое называют модулем представления группы G: G-модуль. Между K[G] модулями, образующими конечномерные векторные пространства над K и неприводимыми представлениями конечной группы G существует взаимно одно-связанное соответствие [2, 6]. Для модулей справедливы те же теоремы, что и для неприводимых представлений. Так каждому неприводимому представлению соответствует простой *G*-модуль. Вполне приводимый модуль можно разложить в прямую сумму неприводимых модулей.

Представление группы G является гомоморфизмом этой группы в мультипликативную группу $GL_m(\Lambda)$ невырожденных матриц над полем Λ, где $\Lambda = \mathbb{R},\mathbb{C}$ или др. Размерность представления определяется размером кольца матриц. Если размерность равна одному, то представление является линейным. Из свойств унитарных представлений конечных групп мы будем использовать утверждение, что число неэквивалентных неприводимых представлений равно числу классов сопряжения. Другим важным свойством является равенство суммы квадратов размерностей неприводимых представлений порядку конечной группы |G|. Очень важным будет соотношение ортогональности неприводимых представлений, которое для матричных представлений $R(g)$ приобретает следующий вид [2, 4]:

$$\sum_{g\,\epsilon\,G}\left(R_{ij}^{(a)}(g)\right)^{+}R_{lm}^{(b)}(g)=\frac{|G|}{n_a}\delta_{il}\delta_{jm}\delta_{ab},\quad n_a=dimR^{(a)}. \quad (16)$$

Кроме неприводимых представлений группы нам будет важно регулярное представление, размерность которого совпадает с порядком группы |G|=N.

Заметим, что для абелевых групп все неприводимые представления и классы сопряжения одномерны и поэтому, более естественно, было начать с рассмотрения абелевых циклических групп, которая порождается одним генератором q:

$$\mathbb{C}_N=\{q^N=1|1,q,q^2,\dots,q^{(N-1)}\} \quad (17)$$

порядка $N>2$, то есть $N=3,4,5,\dots$ Для этих групп каждый элемент

$$q^a, a=0,\cdots,N-1$$

является классом сопряжения и, соответственно, число неприводимых одномерных представлений также будет равно N.

Другие более сложные случаи основаны на не абелевых конечных группах, например, диэдральные группы $\mathfrak{D}_{2N}$ порядка $2N$, определенные двумя генераторами q и r следующими соотношениями:

$$\mathfrak{D}_{2N}=\left\{q^N=r^2=(rq)^2=\right.$$
$$\left.=1|1,q,q^2,\cdots,q^{(N-1)},r,rq,rq^2,\cdots,rq^{(N-1)}\right\}, \quad (18)$$

или, не абелева бинарная тетраэдральная группа T_d 24-ого порядка, которая может быть задана двумя эквивалентными соотношениями:

$$T_d=\{s^3=t^3=(st)^2=1\}=\{s^3=t^3=r^2=str=1\}. \quad (19)$$

Циклическая группа порядка N описывает симметрию ориентированного правильного N – стороннего многоугольника N=3 равностороннего треугольника, N=4 квадрата, и т.д. Диэдральные группы дополнительно к вращениям на углы $\frac{2\pi m}{N}$, m=0,1,…,(N-1), включают N-отражений.

Для исследования представлений с точностью до эквивалентности целесообразнее работать с характерами представлений, являющихся инвариантами подобия [2, 3, 6]:

$$\chi\ (g)=Tr\,R(g), \quad (20)$$

которые однозначно маркируют классы сопряжения. Так, если H_a класс сопряжения в группе G, то есть

$$h_1,h_2\epsilon H_a,\quad \text{найдется } g\,\epsilon G,\ \text{что } h_1=gh_2g^{-1}.$$

Тогда из

$$R(h_1)=R(gh_2g^{-1})=R(g)R(h_2)R(g^{-1}) \quad (21)$$

следует, что

$$\chi(h_1)=\mathrm{Tr}(R(g)R(h_2)R(g^{-1})=\chi(h_2). \quad (22)$$

Приведем соотношение ортогональности характеров неприводимых представлений:

$$\sum_{g\epsilon G}\left(\chi^{(\alpha)}\right)^{*}(g)\chi^{(\beta)}(g)=|G|\delta_{\alpha\beta}. \quad (23)$$

Известно, что в разложении приводимого представления в прямую сумму неприводимых

$$R(g)=\sum_{\alpha}\oplus l_\alpha R^{(\alpha)}(g), \quad (24)$$

где число l_α показывает сколько раз неприводимое представление входит в приводимое. Если взять след из выражения (24), то получаем

$$\chi(g)=\textstyle\sum_\alpha l_\alpha\chi^{(\alpha)}\ (g),$$

откуда из условия ортогональности неприводимых представлений следует выражение для числа l_α:

$$l_\alpha=\langle\left(\chi^{\alpha}(g)\right)^{*},\chi(g)\rangle_G\,.$$

Для абелевого случая $l_\alpha=1$, то есть

$$R(g)=\sum_{\alpha}\oplus R^{(\alpha)}(g)\,. \quad (25)$$

Соотношение ортогональности можно переписать с учетом количества элементов в классах сопряжения и суммировать только по классам сопряженности:

$$\sum_{\alpha=1}^{k}p_\alpha\left(\chi^{(\alpha)}\right)^{*}(H_\alpha)\chi^{(\beta)}(H_\alpha)=|G|\delta_{\alpha\beta}\,. \quad (26)$$

Для абелевой циклической группы $\mathbb{C}_N$, можно легко найти таблицу характеров – $N\times N$ квадратную матрицу, строки которой соответствуют различным характерам для определенного класса сопряженности

$q^{a-1}, a = \overline{1:N}$.

Для циклических групп C_N N неприводимых представлений являются одномерными:

$$\begin{pmatrix} - & 1 & q & \cdots & q^a & \cdots & q^{N-1} \\ \xi^{(1)} & 1 & 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 \\ \xi^{(2)} & 1 & \xi_2^{(2)} & \cdots & \xi_a^{(2)} & \cdots & \xi_N^{(2)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \xi^{(k)} & 1 & \xi_2^{(k)} & \cdots & \xi_a^{(k)} & \cdots & \xi_N^{(k)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \xi^{(N)} & 1 & \xi_2^{(N)} & \cdots & \xi_a^{(N)} & \cdots & \xi_N^{(N)} \end{pmatrix}, \quad (27)$$

где символы $\xi^{(N)}$ могут быть определены через N-й корень из единицы. Например, таблица символов для C_N может быть обобщена как:

$$\xi_a^{(k)} = \xi^k \exp\{(2\pi i(k-1)(a-1))/N\}, \quad (k, a = \overline{1:N}). \quad (28)$$

Рассмотрим несколько примеров.

После комплексных чисел, где основой единичный мнимый элемент $i^2=-1$, мы будем рассматривать два случая: $q^N = \pm 1$.

Циклическая группа $\mathbb{C}_3$ имеет три класса сопряженности, q_0, q и q^2, и, соответственно, три одномерных неприводимых представления $R^{(k)}, k = \overline{1:3}$. Запишем таблицу их символов $\xi_a^{(k)}$:

$$\begin{pmatrix} - & 1 & q & q^2 \\ \xi^{(1)} & 1 & 1 & 1 \\ \xi^{(2)} & 1 & j & j^2 \\ \xi^{(3)} & 1 & j^2 & j \end{pmatrix} \quad (29)$$

для $\mathbb{C}_3$ $(j_3 \equiv j = \exp\{i\, 2\pi/3\})$.

Циклическая группа $\mathbb{C}_4$ имеет четыре класса сопряженности, q_0, q, q^2 и q^3, и, соответственно, четыре одномерных неприводимых представления $R^{(i)}, i = \overline{1:4}$. Запишем таблицу символов $\xi_l^{(i)}$:

$$\begin{pmatrix} - & 1 & q & q^2 & q^3 \\ \xi^{(1)} & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \xi^{(2)} & 1 & i & -1 & -i \\ \xi^{(3)} & 1 & -1 & 1 & -1 \\ \xi^{(4)} & 1 & -i & -1 & i \end{pmatrix}, \quad (30)$$

для $\mathbb{C}_4$ $(j_4 = \exp\{i\,\pi/2\})$.

Соответственно циклическая группа $\mathbb{C}_6$ имеет шесть классов сопряженности, q_0, q,…, q^5, и, соответственно, шесть одномерных неприводимых представлений, $R^{(i)}, i = \overline{1:6}$. Запишем таблицу символов $\xi_l^{(i)}$:

$$\begin{pmatrix} - & 1 & q & q^2 & q^3 & q^4 & q^5 \\ \xi^{(1)} & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \xi^{(2)} & 1 & j_6 & j_6^2 & j_6^3 & j_6^4 & j_6^5 \\ \xi^{(3)} & 1 & j_6^2 & j_6^4 & 1 & j_6^2 & j_6^4 \\ \xi^{(4)} & 1 & j_6^3 & 1 & j_6^3 & 1 & j_6^3 \\ \xi^{(5)} & 1 & j_6^4 & j_6^2 & 1 & j_6^4 & j_6^2 \\ \xi^{(6)} & 1 & j_6^5 & j_6^4 & j_6^3 & j_6^2 & j_6 \end{pmatrix} \quad (31)$$

и для $\mathbb{C}_6$ $(j_6 = \exp\{\pi i/3\})$, соответственно.

Во всех примерах можно увидеть ортогональные отношения

$$< \xi^{(k)}, \xi^{(l)} >= \delta_{kl},$$

где δ_{kl} – символ Кронекера.

Чтобы проверить это для случая $\mathbb{C}_6$ следует принимать во внимание следующие тождества:

$$1 + j_6 + j_6^2 + j_6^3 + j_6^4 + j_6^5 = 0,$$
$$1 + j_6^2 + j_6^4 = 0,\ j_6^5 - j_6^4 = 1,$$
$$1 + j_6^2 + j_6^4 = 0,\ j_6^5 - j_6^4 = 1, \quad (32)$$

или

$$j_6 = \frac{1}{2} + i\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad j_6^2 = \frac{-1}{2} + i\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad j_6^3 = -1,$$
$$j_6^4 = \frac{-1}{2} - i\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad j_6^5 = \frac{1}{2} - i\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad j_6^6 = 1. \quad (33)$$

Мы ограничились случаем циклической группы $\mathbb{C}_6$, так как мы хотим решить проблему нейтрино [7, 8], используя R^6 пространство.

Итак, основная идея заключается в использовании циклических групп $\mathbb{C}_N$ и новых алгебр/симметрий, чтобы найти новые геометрические «неприводимые» подстуктуры в R^n пространствах, которые не являются следствием простых расширений известных стуктур евклидового пространства R^2.

Заключение. Перспективы N-арных комплексных чисел в изучении структур новых видов материи

Прежде всего, мы остановимся на изучении N-арных комплексных чисел, построенных на основе расширения понятия мнимой единицы в рамках конечных абелевых циклических $\mathbb{C}_N$ групп: $q^N = q_0$, $q_0^N = q_0$, где n=1,2, , N≥3. Комплексное число в Эвклидовом пространстве Rn можно представить в виде разложения

$$z_N = x_0 q_0 + x_1 q + x_2 q^2 + \cdots + x_{N-1} q^{N-1}.$$

N-1 операций сопряжения этих чисел определяется теорией характеров для неприводимых и регулярного представлений циклических абелевых групп (27–33). В данной статье как плаццдарм мы подробно проанализируем не-

обходимые нам результаты случая n=3 [11], которые будут использованы для тернарной комплексификации Эвклидова пространства $\mathbb{R}^3$. Углубление понятия мнимой единицы в рамках циклических групп может позволить нам объяснить происхождение трех-кварк-лептонных поколений и, в частности, 3-нейтринных состояний с использованием новых пространственно-временных структур.

Для случая n=3 мы будем следовать статье [14], в которой были введены тернарные числа, а также статье [15], в которой был проведен ряд важных для наших вопросов исследований. В частности, для изучения физических приложений мы приводим фундаментальную тернарную формулу Эйлера, рассматриваем основные положения тернарных абелевых симметрий: изоморфных тернарных «ортогональной» и «унитарной» 2-х параметрических симметрий-аналогов изоморфных ортогональной SO(2) и унитарной U(1) групп симметрий, рассматриваем вопросы тернарной голоморфности и приводим дифференциальные уравнения третьего порядка Лапласа и первого порядка уравнения для тернарных спиноров. Как мы уже сказали, что эта статья послужит трамплином для рассмотрения с одной стороны, построения не абелевой алгебры нонионов, а с другой стороны – более сложных случаев n=4,5,6,…, и с третьей стороны – не абелевы группы, которые мы планируем изложить в последующих статьях.

Литература

1. Смуров С.В, Волков Г.Г., Кукин Н.С., Мурадова А.Р., Глотова И.О. Математические вопросы расширения основ квантовых теорий // Известия Института инженерной физики, 2015. №4(38). С. 73-86.

2. Kostrikin A., Algebra, Iv, IIv, IIIv, 2000.

3. Hamilton R.W., On Quaternions, Proceedings of the Royal Irish Academy, v.3 (1847). P. 1-16.

4. Ledermann W., Introduction to Group Characters, Cambridge University Press, 1977.

5. Beveren E., Some notes on group theory, Departa-mento de FisicaFaculdade de Cienciase Tecnologia, P-3000 COIMBRA, Portugal, 2012.

6. Jost J., Riemannian Geometry and Geometric Analysis, Springer, 1996.

7. Ammosov V., Volkov G., Can neutrino probes extra dimension, Padua, 2000.

8. Volkov G.G., Geometry of Majorana neutrino and new symmetries, Annales Fond Broiglie, 31 (2006). 227 p.

9. Perelomov A.M., Popov V. S., The Lorentz group as a dynamical symmetry group of the Hydrogen atom, SOVIET PHYSICS JETP, VOLUME 23, N1 (1966). P. 118-129.

10. Lipatov L.N., Sabio Vera A., Velizhanin V.N., Volkov G.G., From New Geometry Towards a New Symmetry. Reflexive Numbers and Berger Graphs from Calabi-Yau Spaces, Springer Berlin Heidelberg New York, 2004. P. 622-655.

11. Filippov V.T., N-ary Lie algebras, Sibirskii Mathematicheskii Zhurnal 26, 6 (1985). P. 126-140.

12. Berger M., Sur les groupes d'holonomie homogene des varietes a connexion affine et des varietes riemanniennes, Bull. Soc. Math. France, 83(1955). P. 279–310.

13. Anselmo F., Ellis J., Nanopoulos D., Volkov G., Towards an algebraic classification of Calabi-Yau Manifolds: study of K3 spaces, Phys. Part. Nucl., 32(2001). P. 318-375.

14. Appel P., CR, Acad. Sci., Paris, 84 (1877) , 540 p.

15. Lipatov L.N., Rausch de Traunbenberg M., Volkov G., On the ternary complex analysis and its applications, J.Math. Phys. 49, 2008.



УДК 623

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ: КЛЮЧЕВЫЕ ИДЕИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ

INTELLECTUALIZATION SPECIAL ROBOTICS: KEY IDEAS OF INTELLIGENT BEHAVIOR

Игорь Александрович Бугаков
заслуженный изобретатель РФ
доктор технических наук, профессор
Вице-президент
по инновационным проектам
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,
Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: bia11@mail.ru

Алексей Николаевич Царьков
заслуженный деятель науки РФ
доктор технических наук, профессор
Президент Института –
Председатель Правления Института
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская область, г. Серпухов,
Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: tsarkov@iifmail.ru

Андрей Сергеевич Бутранов
старший научный сотрудник
ВА РВСН им. Петра Великого
(филиал в г. Серпухове)
Адрес: 1422210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7(4967)72-19-11

Аннотация

Излагаются ключевые идеи интеллектуального поведения живых организмов, как основа для создания универсальной технологии интеллектуализации специальной робототехники, прообразом которой является универсальная природная технология интеллектуализации живого, объединяющая эволюцию и индивидуальное развитие, филогенез и онтогенез. Основной признак интеллекта – способность к предвидению в новых условиях на основе хранящегося в памяти и получаемого генетически и в процессе обучения (самообучения) опыта в виде сформированных рефлексов и автоматизмов. Типовые, базисные рефлексы помогают организму уменьшить размерность нашей модели мира, свести все многообразие ситуаций к ограниченному количеству типовых вариантов поведения в них. По сути, эволюция живого есть развитие его способности к предвидению. Показывается особая роль сознание как инструмента интеллекта высокоорганизованного живого для производства новых рефлексов (автоматизмов), инструмента объединения известного в новое, «сверхрефлекса» по порождению рефлексов (автоматизмов), а также необязательность наличия сознания для понимания и реализации интеллектуального поведения.

Ключевые слова: робототехника, интеллект, мозг, пластичность, автономность, универсальность, цель, функциональная система, динамическая самоорганизация, опыт, предвидение, сознание, память, рефлекс, автоматизм, ассоциация, инвариант, базис, эволюция.

Summary

We present the key ideas of intelligent behavior of living organisms as a basis for creating a universal technology intellectualization special robot, a prototype of which is the universal natural technology intellectualization of living that combines evolution and individual development, ontogeny and phylogeny. The main sign of intelligence – the ability to foresee the new conditions on the basis of stored in memory and the resulting genetically and in the learning process (self) experience in the form of shaped reflexes and automatisms. Standard, basic reflexes help the body to reduce the dimension of our model of the world, to reduce the diversity of situations to a limited number of typical behaviors in them. In fact, the evolution of the living is the development of his ability to foresee. Showing the special role of the mind as a tool of intelligence highly organized living for the production of new reflexes (automatisms), a tool known association to the new, "superreflex" for causing reflexes (automatism), and the optional presence of mind to understand and implement predictive behavior.

Keywords: robotics, intelligence, brain, plasticity, endurance, flexibility, goal, functional system, dynamic self-organization, experience, foresight, consciously, memory, reflex automatism, association, invariant, basis, evolution.

Эффективность любой технической (в том числе – робототехнической) системы специального (в частности, военного) назначения характеризуется базисными показателями:

точностью – P – precision (в широком смысле, как способностью с требуемым качеством выполнять свое предназначение в нормальных условиях функционирования);

живучестью – V – vitality (как способностью продолжать выполнять свое предназначение в экстремальных, несовместимых с длительным существованием, условиях с постепенным (не катастрофическим) ухудшением качества);

безопасностью – S – safety (для владеющей этой системой стороны) при ограничениях на *стоимость* – C – cost их достижения [1].

При этом разные требования к значениям триады PVS на разных этапах жизни системы позволяют оптимально перераспределять имеющиеся ресурсы, не выходя за допустимую границу их стоимости C.

Заметим, что этими же показателями характеризуется, в общем-то, и любой живой организм, причем природа «решает» проблему PVSC путем расширения возможностей поведения живого, что в процессе эволюции привело к появлению интеллекта и его главного инструмента – сознания, т.е. путем интеллектуализации. Интеллектуализация является основным путем и для решения проблемы PVSC применительно к робототехнике.

Сложившийся в настоящее время подход к развитию отечественных робототехнических средств и комплексов специального применения - специальной робототехники (СР) ориентирован на дистанционно-управляемый вариант, требующий наличия оператора и соответствующего человеко-машинного интерфейса. Между тем, очевидно, что перспективы развития СР связаны с ее *автономным* функционированием, которая позволяет получить высокую оперативность и надежность действий роботов, их живучесть, возможность применения на любых расстояниях от базы и в любых условиях помеховой обстановки (в том числе в недоступных для радиоуправления местах). Путь к желаемой автономности один – интеллектуализация, которая, к тому же позволяет получить дополнительные возможности: повысить обоснованность принимаемых решений, существенно усложнить выполняемые функции, увеличить эффективность группового применения и др.

Несомненно, что различные дистанционно-управляемые варианты, предполагающие обязательное наличие оператора (как человека, так и в отдельных случаях стационарного искусственного интеллекта, не ограниченного требованиями по размерам, массе, энергопотреблению, живучести и др.), не только останутся, но и должны и будут дальше развиваться, ибо они имеют свои уникальные достоинства и свою важную нишу применения – тыловое и некоторые виды боевого обеспечения (охранение, разведка, разминирование, устранение последствий чрезвычайных ситуаций и др.). Но и в них роботы будут становиться все более интеллектуальными, автономными, способными на эффективное самостоятельное поведение, минимизирующее негативное влияние пространственно-временного разделения «головы» (удаленный оператор) и «тела», других недостатков проявления «человеческого фактора».

Однозначно можно утверждать, что тенденция повышения на основе интеллектуализации автономности СР в технически развитых странах будет стремительно продолжаться, несмотря на риски, связанные с возникновением при этом проблемы ответственности и безопасности (в частности, связанной с самостоятельным применением роботом оружия), а также несмотря на наличие глобальной для человечества опасности неконтролируемого совершенствования искусственного интеллекта. Вероятнее всего, не далее чем через десятилетие победа в возможных вооруженных столкновениях будет за теми, чье оружие будет способно на автономное и более «умное» поведение с наилучшими показателями точности, живучести, безопасности, стоимости. Поэтому все рассуждения о преждевременности интеллектуализации роботов, необоснованности траты средств на крайне ненадежные их антропоморфные варианты, достаточности «операторного» подхода, являясь частично обоснованными с позиции сегодняшних экономических возможностей страны, представляются не совсем оправданными в перспективном плане[1].

В настоящее время применительно к робототехнике сформированы различные перечни критических и базовых технологий, среди которых, к сожалению, нет весьма важной технологии –

[1] В качестве примера темпов развития антропоморфной робототехники можно указать на появившееся 23.02.2106 в Интернете (https://news.mail.ru/society/24936093/?frommail=10) видео с демонстрацией возможностей усовершенствованного антропоморфного робота Atlas компании Boston Dynamics (автономное питание, самостоятельное движение по пересеченной местности с прекрасной устойчивостью, открывание дверей, погрузка на стеллажи ящиков), далеко шагнувшего вперед по сравнению с предыдущим неуклюжим роботом с тянущимся за ним толстым кабелем питания.

базовой, универсальной технологии интеллектуализации (УТИ) робототехники, прообразом которой является универсальная природная технология интеллектуализации живого, объединяющая эволюцию и индивидуальное развитие, филогенез и онтогенез. Универсальность этой природной технологии базируется на являющемся проявлением принципа минимальности [2, 3] единстве:

- принципов и законов природы;
- элементов и структур живой природы (клеточное строение, одинаковость геномов и др.);
- функций и реализующих их структур живых организмов;
- архитектуры реализации целесообразного поведения (функциональной системы);
- элементов, структур, процессов в нервной системе (одинаковость нервных клеток (нейронов), генерируемых ими сигналов (импульсов) и способа их передачи в мозг, алгоритмов их обработки в различных сенсорных зонах, процесса подготовки и реализации поведенческого акта с использованием множества однотипных функциональных систем, работающих по одинаковым алгоритмам);
- этапов и механизмов развития интеллекта в онтогенезе;
- в целом природной технологии интеллектуализации живых организмов, сформированной в процессе эволюции, реализуемой через онтогенез и закрепляемой филогенезом[2].

Есть ли сейчас такая единая универсальная технология интеллектуализации у тех, кто разрабатывает интеллектуальные робототехнические средства и комплексы? Думаем, что нет, как нет сегодня в науке единого понимания того, что такое интеллект, каковы его основные признаки, функции и алгоритмы, как он формируется и развивается, не говоря уже о том, что такое сознание и где оно «прячется» и как (с помощью какого мозгового кода) «воспроизводится» и пр. Сегодня каждый разработчик в рамках своих проектов решает (справедливости ради заметим, что порой весьма успешно) одну или несколько частных технических задач, интеллектуальных и не очень. Такой «полиморфизм» подхода к практической интеллектуализации в целом полезен, ибо он позволяет охватить проблему с многих сторон и служит неким гарантом нахождения в итоге правильного решения. Так часто поступает природа в силу диапазонности условий существования своих творений, дающая право на жизнь их различным реализациям: как «отличникам», так и «троечникам», способным стать «отличниками» при изменении параметров среды обитания и тем самым сохранить «нить жизни». Однако такой длительный эволюционный путь сегодня в науке и технике, тем более – специальной, неприемлем. Нужен революционный путь, путь быстрого получения желаемого решения на уровне «отличника». Во имя получения таких революционных результатов реализуются современные глобальные зарубежные проекты по исследованию мозга – США: BRAIN Initiative (2013-2026), Human Connectome Project (2009-2016); ЕС: Human Brain Project (2013-2023); Китай: Проект «Большой мозг Байду». И именно по такому пути надо сегодня идти в области отечественной робототехники, объединяя в рамках таких глобальных проектов специалистов самых разных направлений[3].

Говоря об интеллектуальном поведении, стоит снова вернуться к частично забытым и не до конца понятым и потому неразработанным идеям советской науки в области кибернетики. Прежде всего, к идее функциональной системы (ФС) П.К. Анохина (1935). При этом управляемая целью архитектура ФС: афферентный синтез (доминирующая мотивация, обстановочная афферентация, пусковая афферентация, память), принятие решения, формирование модели конечного результата, формирование программы действия и реализация действия с непрерывным сравнением полученных текущих и конечного результата с запланированными (акцептор результата действия) – универсальна для любой деятельности, даже для случая, когда нельзя предвидеть результат деятельности (например, при научном исследовании чего-либо но-

[2] Понимание сущности и механизмов реализации природной технологии интеллектуализации позволит перенести эти знания на интеллектуализацию техники. Создание и тиражирование УТИ даже в ее самом первичном, упрощенном варианте позволит минимизировать затраты на разработку как собственно интеллекта, так и его носителя («мозга» и «тела» при соответствии их возможностей друг другу), позволит оптимальным образом сформировать всю «линейку» требуемых (в том числе и для межвидового взаимодействия) средств и систем с минимально достаточными (но глубоко проработанными, «натренированными») поведенческими возможностями, перекрывающими весь спектр потребностей. Это особенно важно при коллективном применении роботов, а именно этот путь использования системы автономных роботов, каждый из которых имеет свой уровень интеллекта, быстро и точно выполняет свою частную задачу в общей задаче, находясь в единой информационной сети и легко понимая другого члена команды на основе видового родства, наиболее перспективен.

[3] Отрадные примеры – проекты Фонда перспективных исследований, а также АСИ и РВК (НейроНет).

вого): в этом случае целью является сам результат, каким бы он ни был. Доминирующая мотивация определяет, «что» надо сделать, обстановочная афферентация – «как» сделать, пусковая афферентация – «когда» сделать [3]. При этом отсеивается вся ненужная афферентная информация, устраняются избыточные степени свободы. При реализации поведения одновременно действует много ФС, каждая из которых включена в тот или иной иерархический комплекс ФС. Все казалось бы просто. Однако механизмы технической реализации этих этапов во многом непонятны до сих пор[4].

Так что есть интеллект? Говорят, что интеллект – способность живого организма принимать эффективные решения и обеспечивать реализацию сложного поведения в условиях неопределенности. Хорошее определение? Не очень, ибо сложность, эффективность, неопределенность – понятия относительные.

Основное свойство (признак) интеллекта - способность к предвидению (опережающему отражению по П.К. Анохину), достоверному прогнозированию развития событий, результатов действий *в новых условиях* на основе генетического и индивидуального (формируемого в процессе обучения, в том числе – самообучения) опыта. Результат работы интеллекта – новые алгоритмы, изобретения. То есть интеллект – это «сверхалгоритм» порождения (у высших животных – под контролем сознания) алгоритмов действий.

Интеллектуальное поведение образуют:

1. Инстинкты (филогенез) как генетический опыт выживания.

2. Сформированные условные рефлексы (в широком смысле – действия без контроля сознания), автоматизмы (онтогенез) как результат индивидуального обучения (самообучения) в среде обитания, как соединение биологического и культурного – основа адаптации (в том числе – активной), существенно расширяющий генетические поведенческие возможности, индивидуальный опыт выживания и развития.

3. Интеллектуальные поисковые действия, разработка новых алгоритмов. Работа интеллекта начинается там, где деятельность инстинкта или условных рефлнксов прекращается или затормаживается.

Формирование опыта и его накопление в памяти в процессе обучения – основное содержание развития организма, основная функция интеллекта. Любой объект (естественный или искусственный), способный предвидеть в новых условиях, обладает интеллектом, применение которого увеличивает опыт и прогностические возможности организма, величину самого интеллекта. При этом все живое, принимая с какой-то целью решение и воспринимая с этой целью настоящее, обращается при этом к прошлому и связывает между собой то, что оно получило в «прошлом будущем», с тем, что оно хочет получить в «настоящем будущем». То есть в нервной системе идут два взаимопроникающих процесса: процесс восстановления прошлого и процесс моделирования будущего. Потому действительно мозг «в каждый момент времени своей деятельности сочетает в себе прошлое, настоящее и будущее» [4].

При этом любой условный рефлекс есть реализация элементарного предвидения. По мере накопления опыта предвидение уже «пережитого» само становится все более автоматическим, в итоге становясь, по сути, рефлекторным процессом, как и все поведение в многократно повторяющейся ситуации. Это значительно повышает быстродействие поведения. Типовые, базисные рефлексы помогают организму уменьшить размерность нашей модели мира, свести все многообразие ситуаций к ограниченному количеству типовых вариантов поведения в них. Подчеркнем еще раз идею связывания интеллекта с предвидением: уровень развития интеллекта есть уровень развития способности к предвидению. По сути, *эволюция живого есть развитие его способности к предвидению*.

Ключевые идеи интеллектуального поведения.

1. *Типовая структура* для реализации поведения: сенсорная система, нервная (управляющая) система, моторная система, их соответствие друг другу и взаимовлияние в развитии. Особое значение для развития интеллекта имеет моторика, движение. Интеллект управляет телом, но развивается (в процессе своего становления) только через тело (посредством деятельности) и во имя тела. Как следствие, во-первых, обязательность взаимного соответствия уровней развития интеллекта и тела и, во-вторых, сложность (невозможность) понять интеллект без понима-

[4] П.К. Анохин считал, что в стадии афферентного синтеза на каждом нейроне коры головного мозга одновременно обрабатываются все возбуждения различных источников: 1. внутреннее возбуждение, связанное с формированием той или иной доминирующей мотивации; 2. внешние возбуждения, представленные содействием данной обстановки (обстановочная афферентация); 3. возбуждения памяти как мотивацией, так и данной обстановочной афферентацией, 4. стартовое возбуждение (пусковая афферентация). Но как и что при этом происходит? Важен процесс, динамика, но пока регистрируется статика. Непонятен мозговой код.

ния тела[5]. Важная задача интеллектуальной робототехники – создание библиотеки базисных «единичных» движений для различных систем робота, на различных иерархических уровнях, на основе которых можно было бы строить все многообразие сложных движений. При этом целесообразно генетическое задание этих базисов. Границу между «генетически» задаваемым и приобретаемым опытом следует проводить, исходя из предназначения робота, степени его возможной самостоятельности.

2. *Пластичность мозга* на основе универсальности используемых элементов, структур и процессов и, как следствие, их взаимозаменяемость, многократное последовательное и параллельное использование, способность выполнять различные функции, одновременное участие в работе различных ФС различного иерархического уровня, имеющих одинаковую универсальную архитектуру, и, как следствие, универсальные алгоритмы функционирования. Например, одни и те же зрительные нейронные структуры используются мозгом как при зрительном восприятии своих или чужих действий, так и при зрительном воображении. Именно с этих позиций следует, как нам представляется, объяснять функционирование так называемых «зеркальных нейронов». Соответствующей нейросети все равно, что происходит: «я делаю и вижу это», «я вижу, как делает кто-то другой» или «я думаю об этом делании». Будучи сформированной однажды (на основе личного опыта), соответствующая нейронная связь возбуждается при наступлении любого из этих случаев. Это и есть принцип минимальности в действии[6].

3. *Динамическая самоорганизация ФС*. Любая ФС – это временное образование для достижения доминантной цели, на пути к которой ФС может непрерывно (на каждом такте работы) корректироваться. Такая непрерывная адаптация приводит к тому, что «организму ежесекундно приходится решать ответ на вопрос «что делать» [4]. Отсюда следует многовариантность путей и множественность действующих для достижения цели ФС, причем на каждом шаге движения к цели может сформироваться новая, еще ни разу не бывшая в «употреблении» ФС, но которая (именно она!) нужна в этой ситуации в связи с непредвиденным изменением внешних и внутренних условий. Большинство же созданных человеком способных к адаптации машин делает то, что в них «генетически» (при создании) заложил человек, сформировал им в процессе проектирования разрешенные «траектории движения» (чаще всего по правилу «если, то…») и реализующие их ФС, так что никаких незапланированных «адаптационных движений», «самоадаптаций» более не допускается. Очевидно, что множество разрешенных человеком машине ФС и разрешенных траекторий существенно меньше того, что природа разрешила для своих, особенно высокоразвитых, созданий.

Исходя из этого, важным представляется правильное понимание сущности ставшей уже расхожей фразы о том, что мозг демонстрирует пример «супернадежной системы из ненадежных элементов». О чем речь? Конечно, как правильно говорил П.К. Анохин, не просто о системе как целостной совокупности элементов и связей между ними, но о функциональной системе, т.е. о надежности достижения цели функционирования той или иной системы мозга за счет высокой пластичности нейронов и нейронных зон, их взаимозаменяемости, вышеуказанной ежешаговой (при необходимости) перестройки. В мозгу нет привычного для инженеров способа резервирования в виде заранее созданной запасной (тем более не одной) системы. Это неэкономно и не всегда надежно. Вместо этого используется другой способ «резервирования», когда при отказе части элементов ФС живое оперативно перестраивает свои ФС с перераспределением роли используемых элементов, при необходимости переориентирует другие элементы

---

[5] Движение – основа поведения. Эта идея успешно развита в трудах Н.А. Бернштейна, ее знают детские психологи, ее же эксплуатируют успешные практики в области ИИ. По большому счету, именно для совершения тех или иных движений, перемещения в пространстве и существует нервная система. Об этом писал еще И.М. Сеченов в своих знаменитых «Рефлексах головного мозга» [5].

[6] Дальнейшее использование этого возбуждения различно, но в любом случае оно позволит предвидеть. Если это «я делаю», то зрительное возбуждение позволяет реализовать сформированный ранее автоматизм с ожидаемым (предвидение) результатом. Если же «я вижу другого» или «я думаю», то я могу предвидеть дальнейший ход реальных событий, обогатить свой опыт, прийти к новым выводам. Характерный пример – болевое ощущение при уколе, например, пальца. Почему человек, который видит, как укалывают палец другого человека, не ощущает боли, хотя у него задействуются те же нейроны, что и в случае, когда он получает укол в свой палец? (пример из [6]). Любой «технарь» скажет, что, по-видимому, потому, что отсутствует подтверждающий наличие укола сигнал от рецепторов боли пальца. Зона мозга, распознающая (точнее, предвидящая) боль, активизируется через зрительный канал, но лишь при наличии такого дополнительного подтверждения срабатывает соответствующая схема «и» (новый нейрон), которая и «включает» итоговое ощущение боли.

на выполнение нужных задач и вовлекает их в процесс достижения цели ФС. Надежным является достижение результата действия [4].

4. *Наличие генетического опыта* – «врожденного фонда реакций» (инстинкты, простые моторные базисные движения, врожденная картина мира, стратегические цели, ценности, поддержание жизненно важных параметров в заданных пределах, «самораскрывающиеся» при наличии необходимых условий программы развития, своевременность их задействования). Мнение о врожденности нравственности.

5. *Формирование индивидуального опыта* в процессе обучения и самообучения в соответствующей будущей деятельности среде с учетом генетически заданных предрасположенностей – в виде рефлексов (автоматизмов) как основы поведения, сущности развития.

Природа органично соединяет в каждом организме общее и особенное через индивидуальное развитие и настройку каждого организма в процессе его становления и роста (онтогенез), что обеспечивает реализацию в организме тех и только тех генетически предопределенных структур и выполняемых ими функций, которые наиболее полно отвечают проявленным потребностям организма.

Есть потребность – идет развитие соответствующей структуры, нет потребности – структура не развивается, причем существует генетически заданная последовательность и диапазон внешних условий «включения» и «выключения» соответствующей программы развития, нарушение момента и условий «запуска» которой может привести к невозможности ее реализации. Нужна та или иная функция – формируется соответствующая генетически предопределенная структура, как правило, из специально отведенного для этого материала нервной сети. Появляются новые (вследствие мутации или длительной тренировки) возможности тела – формируется по мере проявления и совершенствования этих возможностей новая соответствующая им нейронная структура. Причем, повторим, для каждой генетической программы существует оптимальный диапазон (момент) времени ее задействования, пропуск которого может привести к блокированию ее «включения» в дальнейшем («всему свое время»).

6. *Способность к ощущению, восприятию, пониманию, запоминанию, вспоминанию* и др. при комплексной параллельной обработке информации от различных (в частности, сенсорных) систем. При этом в живом все органы чувств работают при их минимально-достаточном количестве и качестве (точность, пороговая чувствительность, частотный и амплитудный диапазоны измерения[7]. Внешний мир воспринимает не глаз или ухо (они «честно» передают все, что формирует ощущение), но мозг, и воспринимает он внешний мир целостно, интегрируя информацию всех сенсорных систем с учетом цели, предшествующего опыта восприятия и внутреннего состояния организма. Любое восприятие всегда есть продукт видового и индивидуального развития и жизненного опыта, формируемый в рамках того или иного научения. Как интегратор работает и каждая сенсорная система, например, зрительная[8]. Диапазонность существования любых объектов в пространстве и времени позволяет и сенсорную информацию интегрировать не только в пространстве, собирая ее от различных сенсорных систем, но и во времени, что существенно упрощает качество идентификации.

7. *Наличие памяти*, ее пространственно-временная организация и ассоциативное (рефлекторное) функционирование. Пространственная – это, прежде всего, сохранение топологии при проецировании в высшие отделы мозга. Временной фактор, поскольку мозг запоминает не столько события, сколько их последовательности и вспоминает их («вынимает» из памяти) также последовательно, а не все сразу, причем ассоциативно, т.е. вспоминание одного события «тащит» за собой вспоминание другого, следующего, рядом расположенного (например, мы легко произносим алфавит от «а» до «я», но так же «автоматически» про-

[7] Такую параллельность демонстрируют, например, системы обработки различных сенсорных сигналов, выдавая одновременно свой результат в верхний иерархический интегрирующий уровень. Именно одновременность обработки сенсорной информации от различных сенсорных систем (зрения, слуха, осязания и др.) позволяет на основе их интеграции эффективно проводить идентификацию, распознавание источника входного сигнала, причем такое суммирование – сверхаддитивное.

[8] При этом существует «начальное зрение»: все, что отличается друг от друга, воспринимается отдельно. Дети, впервые смотрящие на мир, не могут собрать отдельные детали в единый образ. Прозревшие (после операции) дети любую визуальную сцену воспринимают как коллаж не связанных между собой цветных пятен (все, что отличается цветом, контрастностью, движением воспринимается как отдельные предметы, т.к. одни зрительные зоны реагируют на цвет, другие – на движение, третьи – на освещенность). Мозг интегрирует разрозненное, достраивает линии в единый контур. Такому объединению помогает движение. Также и осязание не является одномодальной характеристикой, а комплексной системой, объединяющей тактильные, болевые, температурные и кинестетические ощущения, производимые четырьмя различными анализаторами.

изнести его в обратном порядке вряд ли возможно). Более того, ассоциации позволяют нам легко идентифицировать объект по неполной и искаженной информации: мозг достраивает целое по части не только в пространстве, но и во времени. Мы легко достраиваем чужие предложения за собеседника и понимаем их смысл, слыша не все слова, так что мышление в большой степени есть действительно «цепочка воспоминаний» [7]. Временные процессы в мозгу должны быть глубоко изучены. При этом важно не только «что» возбуждается, но и «как», т.е. динамика процесса (это относится и к проблеме регистрации активности нейронов: важна не только статика, но и динамика). Динамика внешнего мира отображается в запоминаемую динамику процессов в мозгу, понимание которой – ключ к пониманию мышления и поведения, в реализации которых особая роль принадлежит ассоциациям.

При этом мозг, вероятнее всего, действительно «не «вычисляет» решение задач, он извлекает их из памяти, представляющей, по сути, хранилище готовых решений» [7]. Учитывая сравнительно (с компьютером) невысокое быстродействие каждого нейрона, на вычисление у него просто нет времени[9].

8. *Способность к предвидению* (достоверному прогнозированию) путем моделирования с использованием имеющегося опыта на основе повторяемости явлений и процессов, возможности устанавливать между ними ассоциативную пространственно-временную связь (при наличии внутренней метрики), глубина которой обратно пропорциональна «расстоянию». Предвидение – основная функция и признак интеллекта, возможность для сложных систем «успеть», не «опоздать» посредством приема «сделать заранее». Сущность эволюции – развитие возможности все более сложного предвидения. Управлять – значит предвидеть.

9. *Особая роль сознания* как инструмента интеллекта высокоорганизованных живых организмов для производства новых рефлексов (автоматизмов), инструмента объединения известного в новое, «сверхрефлекса» по порождению рефлексов (автоматизмов) [2]. *Необязательность наличия сознания для понимания, для интеллектуального поведения*. Значительная часть входной информации обрабатывается на *бессознательном* уровне (Гельмгольц, 1890 г.). Сознание «видит» не реальность, а образы, создаваемые, в основном, подсознанием с учетом опыта на основе более ранней информации и цели восприятия. При этом отсутствие сознания не означает отсутствие понимания (неосознанное понимание – мозг во сне правильно отвечает на вопросы) (Роджер Пенроуз).

Для высших организмов (для некоторых животных и человека) закрепление правильного действия путем его повтора в аналогичных ситуациях – обучение – осуществляется под контролем сознания. После достаточного количества повторений формируется соответствующий условный рефлекс (автоматизм), размещаемый в памяти (записываемый в «подсознание), откуда он впоследствии извлекается и «автоматически» (почти без контроля сознания) реализуется при появлении того или иного запускающего сигнала[10]. В новой ситуации для того, чтобы успеть, решение ищется по аналогии, используя ассоциации. Если же ситуация не имеет аналогий, на основе понимания ситуации под контролем сознания разучивается новая совокупность действий, впоследствии так же могущая стать автоматизмом. В итоге сознание – этот «прожектор в пространстве и времени» – выступает в качестве механизма познания и целесообразного поведения, механизма адаптации организма к новому, уникального приспособительного и развивающего инструмента интеллекта, главное предназначение которого – формирование автоматизмов (рефлексов), которые, во-первых, реализуются гораздо быстрее, чем под контролем сознания, во-вторых, реализуются наиболее эффективным для конкретной особи способом с учетом ее индивидуальных особенностей и наибо-

[9] Чтобы человек поймал брошенный кем-то мяч (пример из [7]), мозгу не надо решать дифференциальные уравнения движения мяча и руки с учетом инерции управления, не надо решать терминальную задачу встречи руки и мяча. Вместо этого вид летящего мяча и задача его поймать активизируют соответствующее воспоминание о предыдущем опыте и далее – необходимую временную последовательность моторных команд. При этом рука просто вскидывается навстречу мячу посредством некоторого типового (базисного) движения с последующей коррекцией (также с помощью более мелких, но тоже базисных движений) ее положения и параметров движения с учетом получаемой с помощью зрения информации о мяче. Большинство таких быстрых поведенческих актов реализуется по алгоритму «грубо-точно» с задействованием на конечном участке метода «последовательных приближений».

[10] Понятие «рефлекс» («автоматизм») здесь используется в широком смысле как неконтролируемое сознанием поведение – от простой неосознаваемой машинообразной врожденной реакции на внешний раздражитель до сложного многозвенного отработанного ранее под контролем сознания и заложенного в подсознание в качестве той или иной самораскрываемой программы поведения с контролируемым сознанием началом (появление запускающего импульса) и, возможно, окончанием.

лее точно соответствуют наступившей ситуации, в-третьих, требуют для своей реализации минимального расхода ресурсов, в-четвертых, освобождают сознание для формирования новых, в том числе и более сложных рефлексов, составляющими которых становятся уже созданные рефлексы. Таким образом, сознание позволяет превратить разработанный с его же участием алгоритм действий (как мыслительных, так и поведенческих) в новый рефлекс, автоматизм. Тогда кратко сознание можно определить как «сверхрефлекс по порождению рефлексов (автоматизмов)» [1-3, 9, 10].

10. *Наличие внимания, возбуждения, эмоций* как инструментов целесообразного восприятия, выбора доминанты поведения и закрепления в памяти результата ее достижения[11].

11. *Способность к социальному взаимодействию, подражание*. Сознание как социальный контакт с самим собой.

12. *Язык как фактор развития* (язык реальности, натуральная арифметика, непосредственное восприятие).

13. *Способность к созданию специальных орудий* как усилителей тела и мышления.

14. *Базисность и инвариантность* используемых элементов, структур, процессов (рефлексов). Типовые ФС условно можно представить, во-первых, в виде связки «рецептор-эффектор»[12], причем постоянство на протяжении жизни организма пороговой чувствительности, передаточного коэффициента и диапазона измерения управляющего действиями эффектора рецептора внутренней среды контролируется (корректируется) генетически, т.е. свойства такого рецептора наследственно детерминированы (пример – рецепторные нейроны, обеспечивающие постоянство осмотического давления крови) за счет функционирования связки «гены-рецептор». Во-вторых, для тех ФС, которые связаны с реализацией поведения во внешней среде, связка представима в виде «рецептор-решение-эффектор», т.е. в виде совокупности сенсорной, управляющей и исполнительной подсистем. Заметим, что архитектура «рецептор-эффектор» реализуется не только для поддержания постоянства внутренней среды организма (гомеостаза). Она присуща и поведению примитивных живых организмов, обеспечивая их максимальную реакцию (быстродействие) на происходящие изменения во внешней среде, а также и высшего живого в виде генетически заданных рефлексов (отдергивание, чихание и др.), что явно полезно использовать для обеспечения высокой реакции роботов. Особую роль в реализации восприятия, мышления, поведения играет использование мозгом идеи инвариантности[13]. Считается, что запоминаются существенные связи между элементами целого. Мозг выделяет во всем инварианты и запоминает их, как во времени, так и в пространстве. Эти инварианты существуют на всех иерархических уровнях.

15. *Динамическое восприятие* внешнего мира (принципы новизны, приоритета крутизны сигнала и др.). Восприятие как комбинация ощущений и прогнозов, составляемых мозгом на основе воспоминаний.

17. *Иерархичность, фрактальность, роль градиентов, инерции, полярности, приращений, диапазонности, пороговость взаимодействия и перехода в новое состояние и др.*

Конечно, до сих пор нет ответа науки на многие вопросы, в частности, связанные с:

- процессами формообразования;
- формированием и стиранием генетических программ в процессе эволюции;
- мозговым кодом, «формулой» мысли;
- механизмами интеграции ощущений с возникновением восприятия;
- механизмами хранения и воспроизведения информации;
- механизмами сознания, в т.ч. самосознания;
- направленностью вектора эволюционного усложнения живого и др.

Но это незнание не мешает разработке УТИ.

Практически все современные проекты в области создания ИИ можно отнести к одному из *трех следующих направлений*:

- моделирование выполняемых мозгом функций посредством традиционного программирования (наибольший успех – распознавание образов);
- воссоздание в модели структуры реального мозга в надежде, что она «заработает» как «настоящий» мозг со всеми его возможностями («обратное проектирование человеческого мозга» [11]);
- моделирование ускоренного эволюционного развития мозга «аниматов» (автономных аген-

[11] Причем степень запоминания в соответствии с идеей приоритета крутизны сигнала пропорциональна степени отклонения от эмоционального «нуля».

[12] Для ФС, которые обеспечивают реализацию вегетативных функций (обмен веществ, развитие организма, постоянство параметров его внутренней среды), и реакцию на угрожающие жизни внешние сигналы.

[13] Так, мы легко узнаем мелодию, исполненную в разных тональностях, или лицо знакомого под разными углами зрения, откуда следует, что мелодия запомнена в мозгу в форме, не связанной с высотой звука, а лицо знакомого – с углом видения.

тов, «поведение» которых построено на принципах поведения живых организмов) в специфической искусственной среде.

Все эти направления важны и нужны, и успехи есть на каждом направлении. В моделировании функций сегодня наблюдаются наиболее весомые практические результаты, связанные с распознаванием образов. Моделирование структуры мозга позволяет избавиться от ошибок понимания функций мозга. Исследование автономного или коллективного поведения анимат позволяет проверить гипотезы о принципах работы живых систем, применив их для реализации адаптивного «поведения» технических объектов. Создание условий для эволюции «анимат» может позволить приблизиться к пониманию природы «самоорганизации» и эволюции мозга [12, 13]. Представляется, что полезны все направления, т.к. каждое из них в качестве практического выхода имеет различные результаты и их приложение, причем для глубокого понимания мозга, природы интеллекта и сознания наиболее перспективным из этих трех представляется, конечно же, эволюционный подход.

И в то же время очевидно, что мало внимания сегодня уделяется четвертому направлению – *междисциплинарной интеграции*, обобщению современных теоретических и экспериментальных достижений в различных областях фундаментальной и прикладной науки для глубокого понимания работы естественного интеллекта и его искусственного воссоздания. И именно этот путь представляется наиболее важным, реализация которого требует соответствующего *фундаментально-поискового проекта* и *интегрированной* (причем, персонально подобранной из отдельных ученых и научных коллективов) *научно-исследовательской группы* для его выполнения, причем не только представителей технических, но и естественных, и даже традиционно гуманитарных наук (в том числе психологии, педагогики, философии). Считаем, что имеющиеся экспериментальные данные уже сегодня позволяют получить необходимые методологические основания (аксиомы, принципы), сформировать основные закономерности и построить теорию интеллектуализации, способную предсказывать новые экспериментально проверяемые факты и стать основой для разработки искомой УТИ специальной робототехники.

Литература

1. Бугаков И.А. Царьков А.Н. Базовая универсальная технология интеллектуализации ВВСТ: концептуальные идеи // Известия Института инженерной физики, 2015. № 2(36), С. 65-72.

2. Бугаков И.А. Принцип минимальности и деятельность мозга // Сборник научных трудов юбилейного симпозиума, посвященного изданию статьи И.М. Сеченова «Рефлексы головного мозга». М: ИИнтеЛЛ, 2014. С.291-316.

3. Бугаков И.А. Сознание, искусственный интеллект и принцип минимальности // Сборник научных трудов Института инженерной физики за 2014-2015 гг. Серпухов: МОУ «ИИФ», 2015. С. 69-108.

4. Анохин П.К. Избранные труды: Кибернетика функциональных систем. М.: Медицина, 1998. 400 с.

5. Сеченов И.М. Рефлексы головного мозга. СПб: Типография А. Головачева, 1866. 186 с.

6. Рамачандран В.С. Мозг рассказывает. Что делает нас людьми. // Пер.с англ. М.: Карьера Пресс, 2012. 422 с.

7. Хокинс Д., Блексли С. Об интеллекте // Пер. с англ. М.: ООО «И.д. Вильямс», 2007. 240с.

8. Анохин П.К. Философские аспекты теории функциональной системы. М.: Наука, 1978. 400 с.

9. Бугаков И.А. Бугаков А.И., Котов А.А., Умников Е.В., Царьков А.Н. Принцип минимальности и интеллектуализация робототехники: на пути к универсальной технологии. // Материалы Десятой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета. 2015, т.2. С.133-146.

10. Бугаков И.А. Базисные структуры интеллектуальной робототехники (бионический подход). Часть 1. Интеллект и поведение. // Сборник трудов участников V Всероссийской научно-практической конференции «Современное непрерывное образование и инновационное развитие» // Под редакцией проф. А.Н. Царькова и проф. И.А. Бугакова. Серпухов: МОУ «ИИФ», 2015. С. 102-109.

11. Курцвейл Р. Эволюция разума // Пер. с англ. М.: Издательство «Э», 2015. 352 с.

12. Гаазе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А. От амебы до робота: модели поведения. М.: Наука, 1987.

13. От моделей поведения к искусственному интеллекту // Под ред. Редько В.Г. М.: УРСС, 2006.

УДК 620.179.18

О ПРИМЕНЕНИИ ФАЗОВОГО МЕТОДА ОБРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ БЕТОНА

ON THE APPLICATION OF THE PHASE METHOD OF PROCESSING THE MEASUREMENT INFORMATION IN THE STUDY OF THE STRENGTH OF CONCRETE STRUCTURES

Алексей Геннадьевич Попов
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
начальник управления прочностных исследований и технической диагностики
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)12-80-04

Алина Сергеевна Пономарёва
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
отдел прочностных исследований и контроля состояния конструкций
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)12-80-04

Николай Дмитриевич Спорыхин
начальник лаборатории неразрушающего контроля и технической диагностики
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл. г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)12-80-04

Виктор Михайлович Дунилин
старший научный сотрудник
отдел прочностных исследований и контроля состояния конструкций
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл. г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)12-80-04

Михаил Юрьевич Авилов
заместитель начальника управления прочностных исследований и технической диагностики
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл. г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)12-80-04

Евгений Владимирович Бородай
инженер-испытатель испытательной лаборатории
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл. г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)12-80-04

Аннотация

В статье изложен фазовый акустический метод неразрушающего контроля состояния конструкций из бетона. Существо метода состоит в определении прочности бетона путем анализа волновых процессов, возникающих на поверхности бетона от точечного удара. Обработка цифровых сигналов, зарегистрированных на датчиках на поверхности бетона, проводится методом преобразования Фурье с последующим извлечением фазовой составляющей.

Ключевые слова: фазовый метод, акустический метод неразрушающего контроля, прочность бетона, дисперсионная кривая, спектральное разложение, разность фаз сигналов, фазовая скорость сдвиговой волны.

Summary

The article describes the acoustic phase method of non-destructive testing of structures made of concrete. This method consists in determining the strength of concrete by analyzing the wave processes occurring on the surface of the concrete from point of impact. Digital signals recorded on the sensors on the concrete surface, is carried out by Fourier transform with subsequent extraction of the phase component.

Keywords: phase method, acoustic method of non-destructive testing, strength of concrete, dispersion curve, spectral decomposition, the phase difference signals, the phase velocity of shear waves.

Одним из современных направлений исследования прочностных свойств конструкций, выполненных из бетона, является акустический, по определению ГОСТ [1], метод неразрушающего контроля.

Техническая реализация акустического метода универсальна и включает два основных элемента: генерацию волнового процесса в конструкции импульсным источником с длительностью сигнала *0.5 мс – 1 мс* и измерение параметров акустической волны (ускорений в направлении нормали к поверхности конструкции) равноудаленными друг от друга приемниками. Обычно расстояние между датчиками принимают равным половине толщины конструкции. Расстояние между источником сигнала и первым датчиком выбирают, как правило, равным *3-5* расстояний между датчиками.

Обработка измеряемых сигналов состоит в определении фазовых скоростей V сдвиговой волны, распространяющейся вдоль поверхности конструкции, и соответствующих им длин волн λ. Графическая зависимость $V(\lambda)$ представляет собой дисперсионную кривую, являющуюся основой для определения прочностных характеристик бетона.

Методы обработки измерительной информации волнового процесса существенно различаются. Один из методов, традиционно применяемый в сейсморазведке, состоит в полосовой фильтрации исходных реализаций волновых процессов, нанесении на них годографов, определении времени поступления волны на датчик по максимумам волны или по пересечениям кривой колебаний с осью абсцисс, по которой откладывается время, и нахождении скорости монохроматической волны. Такой метод применен, в частности, в работах [2, 3].

Кроме трудоемкости недостатком метода является дополнительная погрешность, вносимая оператором при определении положения экстремумов на монохроматическом пучке, выделенном из исходной реализации.

В 80-х годах прошлого столетия разработан метод спектрального анализа поверхностных волн SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) [4], основанный на получении оценки фазовой скорости по набегу фаз на каждой частоте для своей временной области.

Существо метода SASW состоит в разложении оцифрованных сигналов акустической волны (реализаций) для каждого из использованных датчиков в ряд Фурье и вычислении фазы регистрируемого сигнала.

В данной работе описывается фазовый метод построения дисперсионной кривой, являющийся, по сути, модификацией метода SASW. Достоинством фазового метода является то, что он полностью автоматизирован, вычисление данных для дисперсионной кривой производится в программе на Фортране и не требует вмешательства оператора.

Построение дисперсионной кривой

Пусть имеются ND датчиков, расположенных на одной прямой на расстоянии L м друг от друга. Зарегистрированные сигналы с датчиков, преобразованные в цифровую форму, представляют собой числовую последовательность S^k, $k=1..ND$, с одинаковым числом отсчетов N. Шаг дискретизации сигналов DT зависит от частоты преобразования АЦП.

Предположим, что $F(t)$ – периодическая функция с периодом $T=(N-1)*DT$. Для получения спектрального разложения применяется специальный алгоритм БПФ – быстрое преобразование Фурье [5, 6]. По этому алгоритму вычисляются коэффициенты интерполяционного тригонометрического полинома для любой функции, заданной в точках t_i, $i=1..N$, на отрезке [0, T].

Для монохроматической волны $F_m^k(t)$ из спектрального разложения сигнала S^k, $k=1..ND$, с частотой $\omega_m=2\pi f_m$, f_m=m/T вида

$$F_m^k(t)=\frac{2}{N}\left[A_m^k\cos\left(\frac{2\pi mt}{T}\right)-B_m^k\sin\left(\frac{2\pi mt}{T}\right)\right],$$

эквивалентная запись с введением фазы φ_m^k записывается следующим образом:

$$F_m^k(t)=C_m^k\sin\left(\frac{2\pi mt}{T}-\varphi_m^k\right), \qquad (1)$$

где $C_m^k=\frac{2}{N}\sqrt{\left(A_m^k\right)^2+\left(B_m^k\right)^2}$;

$$\cos\varphi_m^k=-\frac{N\cdot B_m^k}{2\cdot C_m^k};$$

$$\sin\varphi_m^k=-\frac{N\cdot A_m^k}{2\cdot C_m^k};$$

A_m^k, B_m^k – коэффициенты Фурье-разложения;
T – длина реализации в единицах времени, равная $T=(N-1)DT$;
N, DT – количество дискретных отсчетов в реализации и шаг дискретизации.

Сдвиг по времени прихода монохроматического сигнала с частотой ω_m на два смежных датчика равен

$$\tau_m^k=\frac{\Delta\varphi_m^k}{\omega_m},\quad k=1..ND-1,$$

где $\Delta\varphi_m^k=\varphi_m^{k+1}-\varphi_m^k$ – разность фаз сигналов двух смежных датчиков.

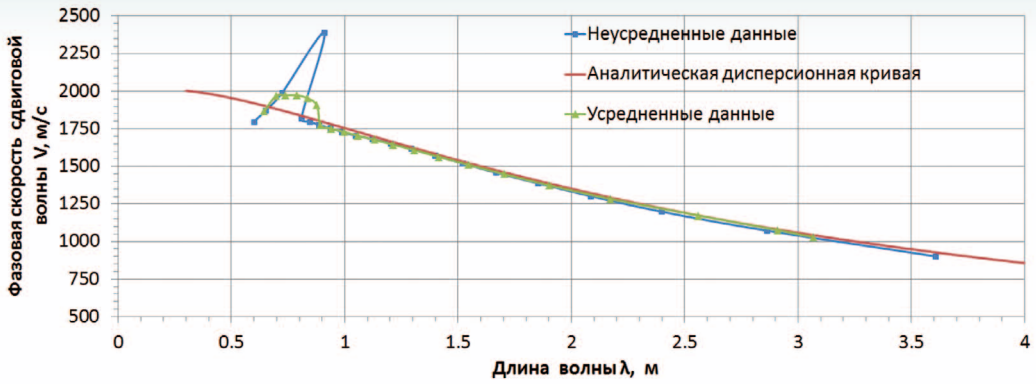


Рис. 1. Сравнение аналитической дисперсионной кривой и кривой, полученной методом преобразования Фурье с последующим извлечением фазовой составляющей сигнала

Сложность применения фазового метода в такой постановке состоит в том, что программная реализация вычисления фаз монохроматического сигнала в формуле (1) дает возможность вычислить только главное значение обратных тригонометрических функций. Таким образом, фаза сигнала рассчитывается с точностью до 2π, поэтому применяется специальная процедура «развертывания» фазы для каждой выбранной m-й гармоники. Данная процедура учитывает следующие соображения.

На каждый последующий датчик сигнал с частотой $\omega_m=2\pi m/T$ поступает позже, чем на предыдущий, поэтому соотношение между фазами должно иметь вид $\varphi_m^{k+1}>\varphi_m^k$, $k=1..\ ND-1$. Если для датчика с номером k получено соотношение $\varphi_m^{k+1}< \varphi_m^k$, то к φ_m^{k+1} добавляется 2π до тех пор, пока не будет выполнено условие $\varphi_m^{k+1}> \varphi_m^k$, $k=1..\ ND-1$.

После нахождения разности фаз и временного сдвига монохроматических волн между двумя соседними датчиками вычисляется среднее значение сдвига по времени относительно всех ND датчиков:

$$t_m^{sr} = \frac{1}{ND-1}\sum_{k=1}^{ND-1}\tau_m^k .$$

Далее определяются средняя скорость прохождения волны между ND датчиками и длина волны, соответствующая этой средней скорости:

$$V_m = \frac{L}{t_m^{sr}}; \qquad \lambda_m = V_m\frac{T}{m}.$$

Значения пар (λ_m, V_m) записываются в файл. Далее повторяется процесс вычисления фазовой скорости поперечной волны для других выбранных гармоник. Если для каких-то частот значение фазовой скорости или длины волны выходит из требуемого диапазона (например, 900 м/с ÷ 2600 м/с и 0.3м ÷ 7м для бетонной плиты толщиной 60 см), то эти пары (λ_m, V_m) исключаются из обработки. Диапазон допустимых фазовых скоростей и соответствующих им длин волн получается из аналитического решения для плоской однородной бетонной плиты заданной толщины h при разных значениях прочностей [7]. При необходимости применяется усреднение дисперсионной кривой по 5-ти точкам.

Фазовая скорость сдвиговой волны из дисперсионной кривой связана через ряд аналитических зависимостей [8, 9] со скоростью поверхностной волны Рэлея и, следовательно, со скоростью ультразвука в бетоне. По скорости уль-

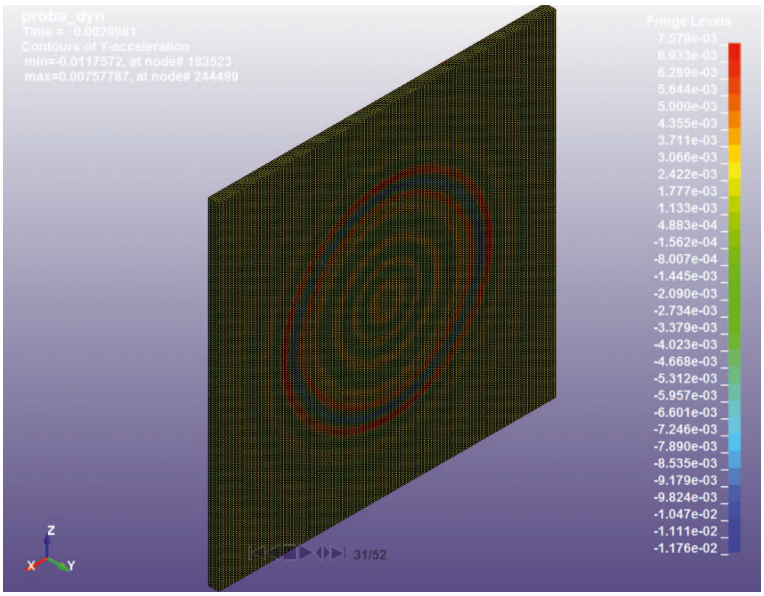


Рис. 2. Контуры Y-ускорений в однородной бетонной плите толщиной 60 см, момент времени 3 мс

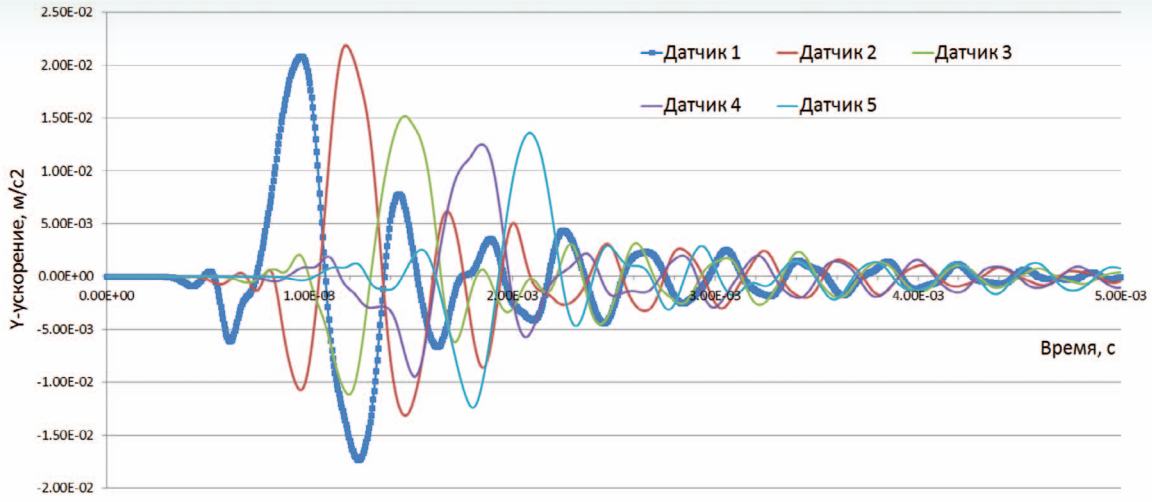


Рис. 3. Графики нормальных ускорений, полученных на датчиках 1-5, в математической модели распространения волны в бетонной плите толщиной 60 см

тразвука определяется по любой известной унифицированной зависимости, например, данной в [10], прочность бетона.

Приведем примеры дисперсионных кривых для задачи о распространении акустической волны в плоской однородной бетонной плите толщиной 60 см с прочностью 300 кгс/см^2 .

Математическое моделирование проводилось при помощи профессионального конечно-элементного пакета программ. Обработка сигналов с датчиков осуществлялась с использованием программы, написанной на Фортране.

На *рисунке 1* показаны полученная фазовым методом дисперсионная кривая (неусредненные и усредненные данные), а также дисперсионная кривая, найденная из аналитической зависимости [7] и соответствующая плоской однородной плите толщиной 60 см с прочностью 300 кгс/см^2 .

Из анализа дисперсионных кривых на *рисунке 1* видно, что дисперсионная кривая, полученная из аналитической зависимости между фазовой сдвиговой скоростью и длиной волны [7], совпадает с хорошей точностью с кривой, полученной после обработки сигналов из математической модели распространения волны в бетонной плите при точечном ударе. «Всплеск» расчетной дисперсионной кривой при малых длинах волн косвенно указывает на толщину плиты $h \approx \lambda$. В данном случае толщина плиты была выбрана $h=0.6$ *м*, «пик» дисперсионной кривой приходится на $0.6 \leq \lambda \leq 0.8$.

На рисунке 2 показаны контуры нормального ускорения в бетонной плите, полученные из численного расчета при помощи конечно-элементного пакета программ.

На *рисунке 3* приведены графики нормальных ускорений, зафиксированных в 5-ти точках (датчиках) на поверхности, расположенных на одной прямой с точкой приложения удара, на расстоянии от центра плиты 1.5 м, 2 м, 2.5 м, 3 м, 3.5 м.

Отметим, что плавная дисперсионная кривая соответствует однородной среде и, соответственно, одному значению скорости Рэлеевской волны, по которой вычисляется скорость ультразвука. По скорости ультразвука из известной экспериментальной зависимости определяется прочность бетона. Но если среда, в которой распространяются волны, не является однородной, или толщина плиты разная, то дисперсионная кривая представляет собой зигзагообразную кривую, усреднив которую можно получить интегральную характеристику прочности бетона.

Литература

1. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.

2. Ситников И.В., Савин С.Н. Методы обследования строительных конструкций зданий и сооружений с использованием их динамических характеристик и сейсмоакустических волн: www.rusnauka.com

3. Бойко О.В. Использование псевдорэлеевских волн для изучения упругих параметров пород, вмещающих тоннель, с бетонной или другой несущей обделкой / Технические и естественные науки, 2013. №5(67) С.162-167.

4. Heisey J.S., Stokoe K.H. et al. Determination of In Situ Shear Wave Velocity from Spectral Analysis of Surface Waves.- Master Thesis. Austin: University of Texas, 1982, 300 p.

5. Толстов Г.П. Ряды Фурье. М.: Наука. Физматлит, 1980.

6. Fortran 90 for Scientist. Документация к Фортрану 90.

7. Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах. М. Издательство Иностранной литературы, 1953.

8. Горшков А.Г. и др. Волны в сплошных средах: Учеб. пособ. для вузов. М.:Физматлит, 2004.

9. Гринченко В. Т., Мелешко В.В. Гармонические колебания и волны в упругих телах. Киев: Наукова Думка, 1981.

10. ГОСТ 17624-87. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности.

УДК 519.725

МАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РЕАЛИЗАЦИИ ПЛАНА НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

A MARKOV MODEL ASSESSING THE IMPLEMENTATION OF THE PLAN OF SCIENTIFIC-RESEARCH WORK OF STUDENTS

Николай Михайлович Емелин
заслуженный деятель науки и техники РСФСР
доктор технических наук, профессор
заместитель директора ФГБНУ «Госметодцентр» по научной работе
Адрес: 115998, Москва, ул. Люсиновская, д. 51
Тел.: +7(499)706-81-25

Елена Дмитриевна Володина
кандидат технических наук
начальник отдела
ФГБНУ «Госметодцентр»
Адрес: 115998, Москва, ул. Люсиновская, д. 51
Тел.: +7(499)706-81-27

Аннотация
В статье рассматриваются вопросы подготовки кадров для осуществления инновационной деятельности. С использованием марковских цепей построены модели оценки научно-исследовательской работы студентов.
Ключевые слова: научно-исследовательская деятельность студентов, научно-исследовательские работы, планирование, вероятность, цепи Маркова.

Summary
The article discusses the training of personnel for the implementation of innovation activities. Models of assessment of research work of students are built with the use of Markov chain.
Key words: research activities of students, research and development, planning, probability, Markov chains.

Основной проблемой реализации стратегии инновационного развития России остается дефицит кадров для инновационной деятельности, способных объединить интеллектуальные и технологические ресурсы страны и обеспечить коммерциализацию новшеств. Как показывает мировой опыт, для инновационной деятельности требуются специалисты, обладающие особой научной подготовкой и владеющие компетенциями, обеспечивающими эффективность инновационного процесса на основе междисциплинарной координации знаний.

Обеспечение подготовки в вузах квалифицированных специалистов и научно-педагогических кадров высшей квалификации на основе новейших достижений научно-технического прогресса – одна из основных задач высших учебных заведений в области научно-исследовательской деятельности. Именно на этапе обучения в вузе необходимо привить молодому специалисту тягу к научно-инновационной деятельности, дать возможность испытать потребность в творческой самореализации, работая как на кафедрах, так и на малых инновационных предприятиях, создаваемых при вузах [1, 2]. Формированию качественно новых, инновационно мыслящих специалистов способствует научно-исследовательская деятельность (НИД), являющаяся необходимым условием развития творческих способностей, важнейшим фактором повышения уровня компетентности студентов, саморегуляции их познания и самоутверждения [3].

Успех научно-исследовательской деятельности студентов старших курсов во многом зависит от формирования научно-исследовательской активности студентов на младших курсах. Поэтому целесообразно сформировать исследовательскую группу (ИГ) из студентов, окончивших

1 курс обучения и обладающих следующими качествами:

- студент имеет высокую мотивацию к научно-исследовательской деятельности и проявил ее на 1 курсе;
- студент достиг по итогам обучения на 1 курсе вуза высокого показателя образовательной деятельности, не ниже установленного для включения в исследовательскую группу.

Процесс выполнения студентами индивидуального плана научно-исследовательских работ (НИР) в ходе образовательного процесса удобно представить в виде простейшей графической модели (*рисунок 1*). Возможные состояния и переходы студента в процессе НИРС приведены в *таблицах 1* и *2*.

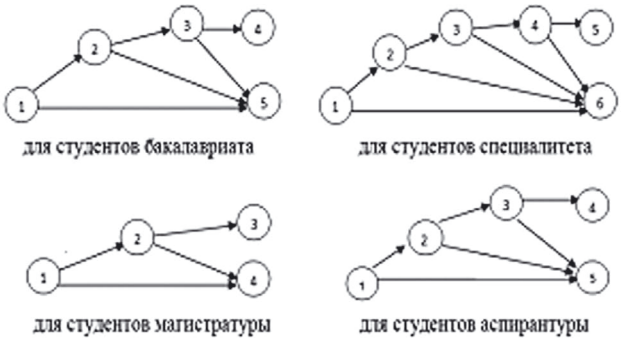


Рис. 1. Графы состояний и переходов студентов вуза в процессе выполнения НИРС

Формирование научно-исследовательской активности студентов происходит поэтапно в процессе обучения. По мере выполнения исследовательских работ, в том числе международных [4], приобретения опыта и совершенствования навыков и т.д., растет уровень приобретенных научно-исследовательских компетенций студента, причем скорость этого роста (так называемая *скорость «научения»*) у каждого студента индивидуальна.

Оценка роста уровня научно-исследовательской активности студентов может быть получена с использованием моделей обучаемости [5, 6], суть которых заключается в аппроксимации процессов приобретения компетенций экспоненциальными кривыми вида:

$$y_k = y_\infty - (y_\infty - y_0)\, e^{-\gamma x_k}, \qquad (1)$$

где y_k – уровень научно-исследовательских компетенций студента на k-ом курсе обучения;

k – период (курс) обучения студента;

y_0 – начальный уровень научно-исследовательских компетенций студента (соответствующий моменту начала «научения»);

y_∞ – конечный уровень научно-исследовательских компетенций студента, y_∞ асимптотически стремится к единице;

γ – скорость роста научно-исследовательских компетенций студента;

x_k – приведенный объем работ, выполняемый студентом для приобретения компетенций на k-ом курсе обучения.

Используя зависимость (1), можно, исходя из выполненного объема работ, получить оценку уровня научно-исследовательской активности y_k после окончания каждого курса. Задаваясь требуемым значением $y_{k\text{треб.}}$ выпускника, появляется возможность спланировать объем работ x_k на каждом курсе, обеспечивающий достижение этого требуемого значения.

Этапность формирования научно-исследовательской активности студента от курса к курсу наглядно показана на *рисунке 1*. Заметим, что переходы студента из одного состояния в другое осуществляются через дискретные, равные

Таблица 1

Состояния студента в процессе НИРС для различных уровней высшего образования

Описание состояния	Номер состояния			
	Б*	С*	М*	А*
студент обучается на 1 курсе и выполняет заданный объем ИР	-	-	1	1
студент обучается на 2 курсе и выполняет заданный объем ИР	1	1	2	2
студент обучается на 3 курсе и выполняет заданный объем ИР	2	2	-	3
студент обучается на 4 курсе и выполняет заданный объем ИР	3	3	-	-
студент обучается на 5 курсе и выполняет заданный объем ИР	-	4	-	-
студент закончил обучение, выполнив заданный объем ИР	4	5	3	4
студент не выполнил требуемый объем ИР	5	6	4	5

Таблица 2

Возможные переходы студента для различных уровней высшего образования

Физическая сущность перехода	Номер перехода			
	Б*	С*	М*	А*
Студент, выполнив заданный объем ИР на 1 курсе, переходит на 2 курс	-	-	1-2	1-2
Студент, выполнив заданный объем ИР на 2 курсе, переходит на 3 курс	1-2	1-2	-	2-3
Студент, выполнив заданный объем ИР на 3 курсе, переходит на 4 курс	2-3	2-3	-	-
Студент, выполнив заданный объем ИР на 4 курсе, переходит на 5 курс	-	3-4	-	-
Студент, выполнив заданный объем ИР на 2 курсе магистратуры, заканчивает обучение в магистратуре	-	-	2-3	-
Студент, выполнив заданный объем ИР на 3 курсе аспирантуры, заканчивает обучение в аспирантуре	-	-		3-4
Студент, выполнив заданный объем ИР на 4 курсе бакалавриата, заканчивает обучение в бакалавриате	3-4	-	-	-
Студент, выполнив заданный объем ИР на 5 курсе специалитета, заканчивает обучение в специалитете	-	4-5	-	-
Студент, не выполнив заданный объем ИР на 1 курсе, переходит на 2 курс	-	-	1-4	1- 5
Студент, не выполнив заданный объем ИР на 2 курсе, переходит на 3 курс	1-5	1-6	-	2-5
Студент, не выполнив заданный объем ИР на 3 курсе переходит на 4 курс	2-5	2-6	-	-
Студент, не выполнив заданный объем ИР на 4 курсе переходит на 5 курс	-	3-6	-	-
Студент, не выполнив заданный объем ИР, заканчивает обучение	3-5	4-6	2-4	3-5

* Б –бакалавриат, С – специалитет, М – магистратура, А – аспирантура

промежутки времени. Ежегодно студент, выполняя определенный объем исследовательских работ (ИР) в соответствии с индивидуальным планом НИР, приобретает новый опыт, совершенствует свои навыки, повышает уровень научно-исследовательской активности. Не все студенты, включенные в исследовательскую группу, успешно дойдут до выпускного курса *k*. Успешность выполнения заданного объема исследовательских работ зависит от ряда факторов, связанных как с особенностями организации НИР, так и самих студентов, и носит случайный характер. А сколько же студентов из исследовательской группы успешно выполнят программу научных исследований? Ответ на этот вопрос, учитывая случайный характер процессов выполнения НИР, а также поэтапную оценку уровня научно-исследовательской активности, можно получить, рассматривая данный процесс в виде конечной цепи Маркова [7, 8]. Такие модели описываются системами уравнений, характеризующими изменение вероятностей P_i нахождения рассматриваемого объекта в любом из возможных *i*-х состояний. Рассматривая данный процесс в виде конечной цепи Маркова, можно определить, сколько студентов из ИГ успешно выполнят индивидуальный план НИРС. Развитие такого случайного процесса описывается формулами:

$$P_i(k) = \sum_{j=1}^{n} P_j(k-1)p_{ji} \qquad (2)$$

или в матричной форме:

$$\left\| \mathrm{p}_{ij}(k) \right\| = \begin{Vmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1k} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{k1} & p_{k2} & \cdots & p_{kk} \end{Vmatrix}. \qquad (3)$$

В качестве показателей эффективности выполнения плана НИД студентов будем использовать вероятностные характеристики марковской цепи: вероятности состояний для каждого k-го шага $P_i(k)$ (i=1, 2...), а также вероятности p_{ij} перехода за один шаг из i-го состояния в j-ое.

В рассматриваемой модели

$$\sum_{j \in E} p_{ij} = 1 \quad \forall i \in \boldsymbol{E},$$

а матрица P[ij] является стохастической. Нулевые элементы матрицы означают невозможность перехода системы из состояния i в j за один шаг. Ненулевые элементы матрицы указывают на вероятность перехода именно по этому направлению. Другими словами, отражают успешность или неуспешность выполнения заданного объема исследовательских работ и формирования научно-исследовательской активности студентов.

Вероятности нахождения студента в каждом состоянии для каждого уровня высшего образования можно определить, решая системы линейных уравнений (2) с учетом условия нормировки:

$$\sum_{i=1}^{n} P_i(k) = 1. \qquad (4)$$

Вероятность успешного перехода студента p_{ij} из i-го состояния в j-ое, возможного при выполнении заданного объема ИР, можно определить, как вероятность выполнения заданного объема ИР z_k, используя зависимости вида:

$$z_{k=}\ z_\infty - (z_\infty - z_0)\, e^{-\gamma xk}, \qquad (5)$$

где k – курс, на котором студент выполняет заданный объем ИР;

γ – скорость роста научно-исследовательских компетенций студента;

z_0 – вероятность выполнения студентом заданного объема ИР при переходе на k-й курс;

z_∞ – максимальная вероятность выполнения студентом заданного объема ИР;

x_k – выполняемый объем ИР на k-м курсе обучения;

z_k – вероятность выполнения студентом заданного объема ИР к окончанию k-го курса.

Соответственно переходные вероятности при невыполнении студентом заданного объема ИР определяется как:

$$z_{k\ невып} = 1 - z_k. \qquad (6)$$

Система уравнений для графов (***рисунок 1***) имеет вид:

для бакалавриата

$$\begin{cases} P_2(k) = P_1(k)p_{12} - P_2(k)p_{23} - P_2(k)p_{25} \\ P_3(k) = P_2(k)p_{23} - P_3(k)p_{34} - P_3(k)p_{35} \\ P_4(k) = P_3(k)p_{34} \\ P_5(k) = P_1(k)p_{15} + P_2(k)p_{25} + P_3(k)p_{35}, \end{cases} \qquad (7)$$

для специалитета

$$\begin{cases} P_2(k) = P_1(k)p_{12} - P_2(k)p_{23} - P_2(k)p_{26}; \\ P_3(k) = P_2(k)p_{23} - P_3(k)p_{34} - P_3(k)p_{36}; \\ P_4(k) = P_3(k)p_{34} - P_4(k)p_{45} - P_4(k)p_{46}; \\ P_5(k) = P_4(k)p_{45}; \\ P_6(k) = P_1(k)p_{16} + P_2(k)p_{26} + P_3(k)p_{36} + P(k)_4 p_{46} p_{46}, \end{cases} \qquad (8)$$

для магистратуры

$$\begin{cases} P_2(k) = P_1(k)p_{12} - P_2(k)p_{23} - P_2(k)p_{24}; \\ P_3(k) = P_2(k)p_{23}; \\ P_4(k) = P_1(k)p_{14} + P_2(k)p_{24}, \end{cases} \qquad (9)$$

для аспирантуры

$$\begin{cases} P_2(k) = P_1(k)p_{12} - P_2(k)p_{23} - P_2(k)p_{25} \\ P_3(k) = P_2(k)p_{23} - P_3(k)p_{34} - P_3(k)p_{35} \\ P_4(k) = P_3(k)p_{34} \\ P_5(k) = P_1(k)p_{15} + P_2(k)p_{25} + P_3(k)p_{35}, \end{cases} \qquad (10)$$

Значение z_0 на каждом k-м курсе, следующим за первым, равно значению z_{k-1}. Значению z_0 на *2* курсе (т.е. в начале выполнения исследовательских работ) в рамках нашего исследования поставим в соответствие результаты его успеваемости после 1-го курса.

Таблица 3

Исходная стохастическая матрица и матрица результата для z_0 = 0,80

Исходная стохастическая матрица					
P_{ij}	1	2	3	4	5
1	0	0,829	0	0	0,171
2	0	0	0,865	0	0,135
3	0	0	0	0,895	0,105
4	0	0	0	1	0
5	0	0	0	0	1

Шаг / P	Матрица результатов				
	1	2	3	4	5
1	1	0	0	0	0
2	0	0,829	0	0	0
3	0	0	0,718	0	0
4	0	0	0	0,642	0,642
5	0	0,171	0,282	0,358	0,358

Таблица 4
Исходная стохастическая матрица
и матрица результата для $z_0 = 0,89$

Исходная стохастическая матрица					
P_{ij}	1	2	3	4	5
1	0	0,906	0	0	0,094
2	0	0	0,926	0	0,074
3	0	0	0	0,942	0,058
4	0	0	0	1	0
5	0	0	0	0	1

Шаг / P	Матрица результатов				
	1	2	3	4	5
1	1	0	0	0	0
2	0	0,906	0	0	0
3	0	0	0,839	0	0
4	0	0	0	0,791	0,791
5	0	0,094	0,161	0,209	0,209

Таблица 5
Исходная стохастическая матрица
и матрица результата для $z_0 = 0,97$

Исходная стохастическая матрица					
P_{ij}	1	2	3	4	5
1	0	0,974	0	0	0,026
2	0	0	0,980	0	0,020
3	0	0	0	0,984	0,016
4	0	0	0	1	0
5	0	0	0	0	1

Шаг / P	Матрица результатов				
	1	2	3	4	5
1	1	0	0	0	0
2	0	0,974	0	0	0
3	0	0	0,955	0	0
4	0	0	0	0,940	0,940
5	0	0,026	0,045	0,060	0,060

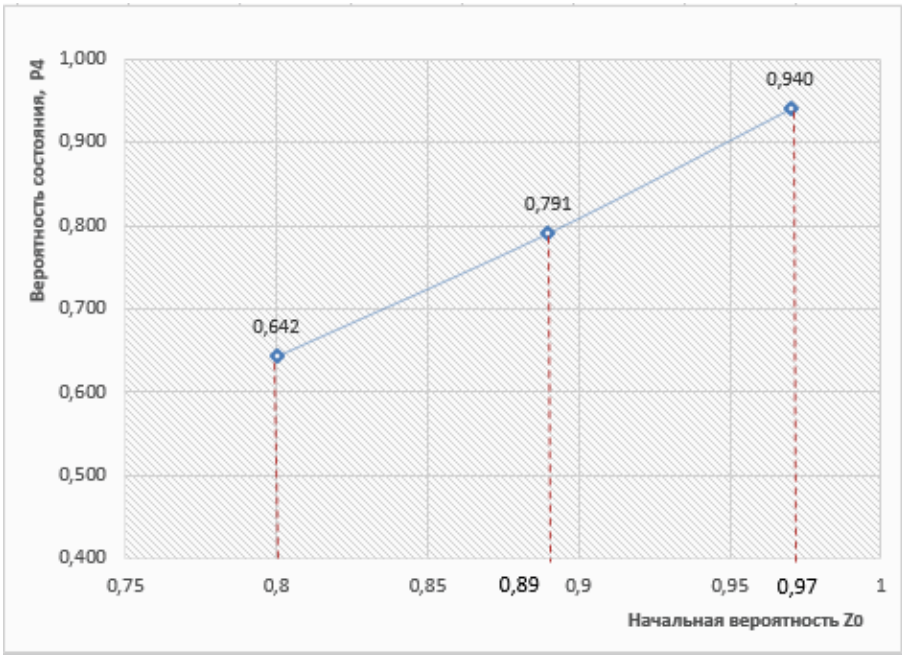


Рис. 2. Вероятности нахождения студента бакалавриата
в конечном состоянии 5 при различных значениях z_0

Рассчитаем вероятность нахождения студента бакалавриата в конечном состоянии 4, т.е. вероятность того, что студент закончит 4-й курс, полностью выполнив требуемый объем НИР, для различных уровней подготовки студента. Зададим варианты значений параметров z_0: 0,8; 0,89 и 0,97. Используя формулу (5), рассчитаем p_{ij} вероятность перехода из *i*-го состояния в *j*-ое для каждого значения z_0.

С помощью встроенных функций табличного процессора Microsoft Excel решим систему уравнений (7) для различных значений параметра z_0 и определим его влияние на вероятность нахождения студента в конечном состоянии 4. Исходные и результирующие матрицы для каждого z_0 представлены в *таблицах 3-5*.

Мы видим, что вероятность успешного окончания студентом 4-го курса, при котором он полностью выполнит требуемый объем НИР, для студента с наиболее высоким значением z_0=0,97 на 46,4% выше, чем у студента, имеющего z_0=0,80 и на 18,8% выше, чем у студента, имеющего z_0=0,89. Полученные результаты, отраженные графически на *рисунке 2*, показывают зависимость вероятности нахождения студента в конечном состоянии 5 от начального значения параметра z_0, т.е. фактическую зависеть от успеваемости студента после 1-го курса.

Построенная модель позволяет оценить вероятность того, что студент, входящий в состав ИГ, пройдет все курсы обучения и успешно выполнит объем научно-исследовательских работ в соответствии с индивидуальным планом НИР, а также позволяет спрогнозировать количество студентов, достигающих либо не достигающих заданного уровня научно-исследовательской активности к концу обучения.

Литература

1. Емелин Н.М., Артамонов Ю.Н., Володина Е.Д. Каталог малых инновационных предприятий российских вузов в сфере нанотехнологий. М.: Российские нанотехнологии, 2012. Том 7, №№ 3-4, 5-6.

2. Емелин Н.М., Володина Е.Д., Голодкова О.В. Систематизация инноваций в образовательной деятельности // Известия Института инженерной физики, 2014, №1(31). С. 86-88.

3. Емелин Н.М., Шведова Е.А. Научная деятельность и научный потенциал.- М: Интерфизика, 2006. 168 с.

4. Володина Е.Д. Систематизация форм международной академической мобильности. Челябинск: Вестник Челябинского ГПУ, 2014. №2.

5. Новиков Д.А. Закономерности итеративного научения. М.: Институт проблем управления РАН, 1998.

6. Емелин Н.М., Володина Е.Д. Модель роста инновационных компетенций студентов в процессе международной академической мобильности // Известия Института инженерной физики, 2014. №2(32). С. 97-101.

7. Кемени Дж. Дж., Снелл Дж. Л. Конечные цепи Маркова. М: Наука, 1970.

8. Емелин Н.М. Марковские модели – простота и изящество // Известия Института инженерной физики, 2015, №2(36). С. 47-51.

AUTHORS

Victor E. Aksionov. Honoured scientist of Russia, Dr.Sci.Tech., professor. Branch of the Military academy of the Strategic missile forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Oleg S. Assur. Postgraduate student. National research university «MPEI». Moscow, Krasnokazarmennaya st. 14.

Mikhail Y. Avilov. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Sergey Y. Bobrus. Scientist. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Eugeniy V. Boroday. Engineer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Igor A. Bugakov. Dr.Sci.Tech., professor. Honoured devisor of Russia. Vice-President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Alexey A. Bukhtiyarov. Software engenieer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Andrey S. Butranov. Senior scientist. Branch of the Military academy of the Strategic missile forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Sergey G. Daniliuk. Dr.Sci.Tech., professor. Lead scientist. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Victor P. Dunilin. Senior scientist. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Anastasia V. Efimova. Head of laboratory. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Nikolay M. Emelin. Honoured scientist of RSFSR, Dr.Sci.Tech., professor. Federal state scientific institution "Gosmetodcentr". Moscow, Lusinovskaya st., 51.

Aleksandr A. Evsikov. Cand.Tech.Sci. Director of Protvino branch Dubna state university. Moscow reg., Protvino, Severny l., 9.

Sergey V. Frankov. Postgraduate student. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Andrey N. Furov. Cand.Tech.Sci. Lecturer. The Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Irina O. Glotova. Student. Moscow state university of mechanical engineering (MAMI). Moscow, Bolshaya Semionovskaya st., 38.

Denis O. Kapustkin. Software engenieer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Vladimir P. Karulin. Honored Worker of RF Higher school. Dr.Sci.Tech., professor. Lead scientist. Federal state scientific institution «Gosmetodcentr». Moscow, Lusinovskaya st., 51.

Valeriy A. Kokovin. Cand.Tech.Sci. Protvino branch Dubna state university. Moscow reg., Protvino, Severny l., 9.

Eugeniy V. Kolombet. Junior scientist. Head of the laboratory. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Valeriy A. Kolombet. Candidate of physical and mathematical sciences. Head of the laboratory. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Nikolay S. Kukin. Cand.Tech.Sci. Senior scientist. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Oleg P. Kuznetsov. Cand.Tech.Sci., associate professor. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Anatoliy P. Leonov. Cand.Tech.Sci., senior scientist. Deputy director on educational and scientific work. Protvino branch Dubna state university. Moscow reg., Protvino, Severny l., 9.

Vadim N. Lesnykh. Junior scientist. Head of the laboratory. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Sergey A. Lychagov. Cand.Tech.Sci. Head of department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Evgeniy P. Minakov. Dr.Sci.Tech, professor. Military space academy in the name of A.F. Mozhaysky. St.-Petersburg, Zhdanovskaya st., 13.

Anna R. Muradova. Student. Moscow state university of mechanical engineering (MAMI). Moscow, Bolshaya Semionovskaya st., 38.

Alexander A. Murashko. Chief of department. State corporation "Rosatom". Moscow, Bolshaya Ordynka st., 24.

AUTHORS

Andrey K. Nikitin. Software engenieer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Pavel Y. Odintsov. Technical director. «FastVPS.ru» Ltd. St.-Petersburg, Verbnaya st., 27.

Leonid G. Osovetsky. Dr.Sci.Tech, professor. Saint-Petersburg branch «Leningrad branch of Central science research telecommunication institute». St.-Petersburg, Varshavskaya st., 11.

Alina S. Ponomariova. Candidate of physical and mathematical sciences, senior scientist. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Alexey G. Popov. Cand.Tech.Sci., senior scientist. Head of department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Alexey Y. Poriadin. Adjunct. The Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Victor A. Prasolov. Cand.Tech.Sci. Head of department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Pavel A. Semionov. Candidate of physical and mathematical sciences. Senior scientist. State research center of Russian Federation institute for high energy physics. Moscow reg., Protvino, Ploshad' Nauki, 1.

Sergey N. Shimanov. Dr.Sci.Tech., professor. Deputy of general director. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyu l., 1a.

Sergey V. Smurov. Dr.Sci.Tech., professor. Deputy director general. General designer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Nikolay D. Sporykhin. Head of laboratory. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Semion V. Sukhanov. Postgraduate student. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Sergey V. Surovikin. Cand.Tech.Sci. Military space academy in the name of A.F. Mozhaysky. St.-Petersburg, Zhdanovskaya st., 13.

Alexey N. Tzar'kov. Honoured scientist of Russia, Dr.Sci.Tech., professor. President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Vladimir A. Tsimbal. Honoured scientist of Russia, Dr.Sci.Tech., professor. Head scientist at Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Alexandr N. Vasiliev. Doctor of physical and mathematical sciences, professor. National research nuclear Uuiversity «Moscow Engineering Physics Institute». Moscow, Kashirskoye h., 31.

Gennadiy G. Volkov. Doctor of physical and mathematical sciences, professor. Leading researcher. Petersburg nuclear physics institute name of B.P. Konstantinov. Leningrad reg., Gatchina, Orlova Roscha.

Elena D. Volodina. Chief of department. State Research and Consulting Centre. Moscow, Lusinovskaya st., 51.

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 (диске, дискете) и бумажного варианта.

Редакционная коллегия оставляет за собой право на редактирование статей, при этом с точки зрения научного содержания авторский вариант сохраняется.

Статьи, не принятые к публикации, не возвращаются.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается!

Приложение 1

РУБРИКАЦИЯ ЖУРНАЛА
«Известия Института инженерной физики»

Постоянные рубрики

- **Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы.**
- **Радиотехника и связь.**
- **Информатика, вычислительная техника и управление.**

Разовые рубрики

- **Техника специального назначения.**
- **Инновационные проекты.**
- **Техническое регулирование.**
- **Профессиональное образование.**
- **Искусственный интеллект и робототехника.**
- **Медицина и фармацевтика.**
- **Диагностические системы.**
- **Научные обзоры. Научные рецензии. Отзывы.**

В соответствии с Решением Межведомственной комиссии РФ по защите государственной тайны №69 от 26 февраля 2001 г., требованиями законов №5485-1 «О государственной тайне» от 21 июля 1993 г., №149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и защите информации» от 27 июля 2006 г. статьи для публикации принимаются только при наличии экспертного заключения с разрешением на открытое опубликование.

INTERREGIONAL PUBLIC INSTITUTION
"INSTITUTE OF ENGINEERING PHYSICS"
(SCIENTIFIC, EDUCATIONAL AND INDUSTRIAL INSTITUTION)

CONTENTS

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION–MEASURING DEVICES AND SYSTEMS

N.M. Emelin. Conditional optimization of the parameters of Markov models of diagnostic of information and control systems 2

S.G. Daniliuk, A.A. Murashko. The use of probabilistic and linguistic approach to solving the problem of assessing the vulnerability of the system security of important technical objects 5

E.P. Minakov, S.V. Surovikin. Technique of the organization concealed movement of ground objects 13

O.S. Assur. Development of a method of local positioning of objects on the basis of correlation-extreme systems algorithms 20

S.A. Lychagov, A.N. Furov, O.P. Kuznetsov. Guidance method of the aircraft along the line of sight of the analytical 27

V.E. Aksionov, A.Y. Poriadin. Mathematical model of a complex prelaunch calibration of accelerometers with nonlinear optimal estimation of their parameters in the mobile point of decomposition with a priori information 30

A.Y. Poriadin. Methodology a complex prelaunch calibration of accelerometers with nonlinear optimal estimation of their parameters in the a mobile point of the decomposition in two positions gyrostabilized platform with a priori information 35

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS

A.N. Vasiliev, S.V. Smurov, P.A. Semionov, N.S. Kukin, A.A. Bukhtiyarov, D.O. Kapustkin. Experimental observation of optically detected magnetic resonance in the crystal diamond with nitrogen impurities 40

S.N. Shimanov, V.A. Tsimbal, V.A. Prasolov, S.V. Frankov, S.Y. Bobrus. Improving the accuracy of synchronization chirp signals based on the use of adaptive filtering singular 45

S.V. Sukhanov, P.Y. Odintsov, A.K. Nikitin. Analysis of ways to capture network traffic 50

INFORMATION SCIENCE, COMPUTING AND MANAGEMENT

V.A. Kolombet, V.N. Lesnykh E.V. Kolombet. Prediction clock frequency of the processor of the future generation of computers as an example of effective use of technology in the properties of fractal systems triples periods 55

L.G. Osovetsky, A.V. Efimova. Guarantees the detection of undeclared opportunities in industrial software security 59

V.P. Karulin. The optimization problem of the main parameters of the model program management of resource potential of the set of technical devices 64

A.A. Evsikov., V.A. Kokovin, A.P. Leonov. On the electromechanical part of precise digital system modulation peculiarities with pulse-width control 70

S.V. Smurov, G.G. Volkov, N.S. Kukin, A.R. Muradova, I.O. Glotova. Introduction to the geometry of the N-ary complex numbers 75

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND ROBOTICS

I.A. Bugakov, A.N. Tsar'kov, A.S. Butranov. Intellectualization special robotics: key ideas of intelligent behavior 83

DIAGNOSTIC SYSTEMS

A.G. Popov, V.P. Dunilin, A.S. Ponomariova, M.Y. Avilov, N.D. Sporykhin, E.V. Boroday. On the application of the phase method of processing the measurement information in the study of the strength of concrete structures 92

PROFESSIONAL EDUCATION

N.M. Emelin, E.D. Volodina. Markov model of evaluation of implementation of scientific research work plan of students 96

Authors 102

Requirements to authors 104