

На правах рукописи

ГУРЕНКО ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ИМИТАЦИИ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕГО КОМПЛЕКСА**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (в технических системах)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Пролетарский Андрей Викторович**,
доктор технических наук, профессор, декан
факультета «Информатика и системы управления»
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Афанасьев Валерий Николаевич**,
доктор технических наук, профессор,
профессор Департамента прикладной математики
Московского института электроники и математики
им. А.Н. Тихонова ФГАОУ ВО НИУ ВШЭ

Пошехонов Василий Ильич,
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник НИИ обработки аэрокосмических
изображений (НИИ «Фотон») ФГБОУ ВО «Рязанский
государственный радиотехнический университет
им. В.Ф. Уткина»

Ведущая организация: **АО «ВПК «НПО машиностроения»**

Защита диссертации состоится «21» апреля 2020 года в 16 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный пер., д. 10, факультет Специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана» и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.02.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.02
кандидат технических наук, доцент

И.В. Муратов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Значительное усложнение современных разрабатываемых информационно-управляющих комплексов (ИУК) привело к расширению круга предварительных исследований и увеличению объемов и сроков натурных испытаний. Отечественный и зарубежный опыт подтверждает факт возрастания до 50% времени, необходимого для конструирования и изготовления опытных образцов, а их стоимость достигает 40% от стоимости разработок. Затягивание сроков испытаний приводит к моральному старению испытываемой системы к моменту ее создания.

Внедрение в технологический процесс методов и средств физического и математического моделирования сокращает сроки выполнения НИОКР и освоения разработок, причем качество и сроки проектирования в значительной степени зависят от полноты функционального анализа и правильного выбора аппаратных единиц разрабатываемой системы уже на этапе предварительных исследований. Однако проведение полного аналитического исследования современных ИУК на практике оказывается невозможным. Ввиду сложности и многокомпонентности ИУК особое место отводится полунатурному моделированию с заменой ряда звеньев контура управления блоками реальной бортовой аппаратуры, что позволяет уточнить основные характеристики уже изготовленных элементов, а также выбрать оптимальные характеристики и параметры проектируемых элементов.

Существенный вклад в теорию и практику полунатурного моделирования внесли отечественные и зарубежные ученые: К.А. Пупков, Н.В. Барышников, А.В. Бабиченко, Э.В. Баранов, В.М. Никифоров, Б.Н. Харин, Хемди А. Таха, У.Дж. Карплюс, П.Дж. Кивиа и другие.

Важным информационным и управляющим компонентом современных ИУК являются радиолокационные станции (РЛС), способные вести захват и сопровождение воздушных объектов в различных климатических условиях, в стационарном и динамическом состояниях при воздействии вибраций и качек, в широких диапазонах по высоте, азимуту и скорости, в сложной активной и пассивной помеховой обстановке, включающей отражение зондирующего сигнала от различного типа подстилающих поверхностей и гидрометеоров. При этом возможна многоканальная работа как по одиночным объектам, так и по коалициям объектов. Вследствие указанных факторов к РЛС предъявляются повышенные требования по точности и быстродействию. Для их удовлетворения необходим комплекс тестовых моделей сигналов внешней среды, обеспечивающих адекватное моделирование режимов функционирования РЛС и строящихся на основе известных физических законов и математических преобразований, традиционно применяемых в цифровой обработке сигналов, а также данных натурных экспериментов. Для формирования комплекса тестирующих процессов применяются модели и алгоритмы имитации детерминированных и случайных сигналов, в разработку которых внесли значительный вклад А.И. Алексеев, Л.П. Акимов, В.П. Бакалов, В.В. Бойков, В.В. Быков, А.Г. Ивахненко, Н.П. Кривулин, Е.С. Лобусов, О.А. Ситников, В.В. Сюзев, В.С. Пугачев, Б.И. Шахтарин, А.Г. Шереметьев, А. Гилл, С.В. Голомб, Р.Е. Гудсон, Г. Нидеррайтер, М.П. Поулис, С. Райс, Н. Цирлер и другие ученые.

Многие из существующих моделей и алгоритмов не обеспечивают реализацию процессов с энергетическими характеристиками произвольной формы, в том числе полученными экспериментально. В частности, корреляционные функции и функции спектральной плотности мощности (дисперсии) таких случайных процессов могут содержать выбросы или разрывы первого рода. Те же модели и алгоритмы, которые позволяют воспроизводить подобные случайные сигналы, либо обладают высокой вычислительной сложностью, либо содержат переходные процессы. Такие недостатки известных подходов затрудняют или делают невозможным их применение для расширенной обработки режимов существующих и перспективных РЛС ИУК в реальном времени при необходимости воспроизведения сложной сигнально-помеховой обстановки.

Таким образом, задача разработки новых эффективных алгоритмов имитации случайных сигналов, составляющих модель внешней среды ИУК, в настоящее время является актуальной. Применение алгоритмов должно обеспечивать снижение вычислительной сложности процесса имитации и расширение видов имитируемых сигналов внешней среды при полунатурном моделировании и тестировании компонентов ИУК.

Объектом исследования в настоящей работе является многофункциональная РЛС (МРЛС) ИУК, предметом исследования – модели и алгоритмы имитации случайных сигналов, образующих модель внешних радиолокационных воздействий и поступающих на вход блока обработки информации и управления (БОУ) МРЛС.

Цель работы: разработка и исследование высокоточных и простых в реализации спектральных моделей и алгоритмов имитации дискретных случайных сигналов с задаваемыми энергетическими характеристиками для моделирования внешней среды ИУК с ориентацией на вещественную арифметику.

Задачи работы:

1) анализ существующих методов и моделей имитации случайных процессов;
2) определение взаимосвязи спектров в гармонических базисах Фурье с задаваемыми энергетическими характеристиками сигналов – функцией спектральной плотности (ФСП) мощности (ФСПМ) или дисперсии (ФСПД) и автокорреляционной функцией (АКФ);

3) трансформация модели и алгоритмов имитации детерминированных дискретных сигналов в тригонометрическом базисе в случайные с последующей модификацией с целью сокращения вычислительной сложности, оценка статистических характеристик получаемых процессов;

4) дискретизация теоретических ФСПД и АКФ, заданных на конечных и бесконечных интервалах определения, с целью расчета дискретных спектральных коэффициентов в тригонометрическом базисе;

5) обоснование выбора системы вещественных функций Уолша – Пэли в качестве целевого базиса, преобразование тригонометрического спектра в спектр Уолша – Пэли с помощью оператора преобразования спектров, исследование его структуры и свойств с целью повышения вычислительной эффективности алгоритмов имитации;

6) разработка алгоритма имитации дискретных случайных стационарных сигналов в базисной системе Уолша – Пэли, синтез его быстрой версии и

модификация для имитации нестационарных сигналов, аналитическая оценка вычислительной сложности и точности разработанных алгоритмов;

7) экспериментальное исследование полученных результатов – программная реализация основного алгоритма имитации с целью проверки на корректность и точность на различных задаваемых энергетических характеристиках, оценка временных показателей имитации.

Методы исследования. В работе использованы методы теории управления, линейной алгебры, математического анализа, теории вычислительной сложности алгоритмов, теории цифровой обработки сигналов, теории вероятностей и математической статистики, в том числе статистический и сравнительный анализ для определения точности алгоритмов имитации с помощью автокорреляционных функций. Экспериментальное исследование алгоритмов имитации выполнялось методом математического моделирования в среде MATLAB.

Научная новизна проведенных исследований и полученных результатов заключается в следующем:

1) поставлена и решена задача обеспечения взаимосвязи спектров в гармонических базисных системах с задаваемыми энергетическими характеристиками сигналов, применяемых для моделирования внешней среды ИУК, разработаны модифицированная модель и алгоритм имитации случайных сигналов в базисе тригонометрических функций, имеющие меньшую вычислительную сложность в сравнении с существующими за счет введения случайного изменения знаков спектральных коэффициентов и сокращения числа операций умножения;

2) поставлена и решена задача дискретизации энергетических характеристик сигналов на ограниченных и бесконечных интервалах определения с целью получения дискретных значений дисперсий и спектральных коэффициентов в гармонических базисах, используемых в алгоритмах имитации;

3) предложен и реализован подход к разработке алгоритмов имитации с помощью оператора взаимопреобразования спектров на основе ядра Фурье в матричном представлении, исследованы его структура и свойства, выполнено преобразование тригонометрических спектров в спектры Уолша – Пэли, осуществлена оптимизация оператора преобразования спектров с целью повышения вычислительной эффективности алгоритмов имитации путем вынесения значительного объема вычислительных операций на этап настройки алгоритма;

4) разработаны спектральные алгоритмы имитации случайных стационарных и нестационарных сигналов в базисе Уолша – Пэли, обладающие преимуществом по вычислительной сложности в сравнении с существующими алгоритмами и предназначенные для эффективной имитации внешней среды информационно-управляющего комплекса.

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в создании новых спектральных алгоритмов имитации внешней среды, позволяющих воспроизводить случайные сигналы с энергетическими характеристиками – ФСПМ, ФСПД, АКФ, задаваемыми аналитически или таблицами значений, для полунатурного моделирования БОУ МРЛС ИУК. Энергетические характеристики могут быть как теоретическими, так и полученными экспериментально, иметь произвольную форму и содержать

выбросы и разрывы первого рода. Вычислительная эффективность разработанных алгоритмов позволяет в жестком модельном времени, приближенном к рабочему циклу ИУК в реальных условиях, имитировать случайные процессы внешней среды, образующие сложную сигнально-помеховую обстановку. Тем самым в процессе полунатурного моделирования обеспечивается более точная отработка алгоритмов обработки радиолокационной информации и управления, реализуемых в БОУ МРЛС, и расширяется диапазон испытываемых режимов МРЛС.

Диссертационная работа выполнена в рамках Госзадания проекта № 2.7782.2017/БЧ «Методы имитации детерминированных и случайных одномерных и многомерных сигналов в научных задачах моделирования информационно-управляющих систем реального времени» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается теоретической обоснованностью и практической состоятельностью взятых за основу существующих подходов к имитации сигналов, корректным использованием апробированного математического аппарата и методов исследования, адекватностью моделей и алгоритмов имитации, корректностью математических преобразований при их разработке, достаточным объемом программного моделирования, а также согласованностью полученных непротиворечивых результатов с данными, опубликованными в открытой печати.

Внедрение результатов работы. Полученные в работе результаты в виде моделей и алгоритмов имитации сигналов использованы АО «КБ Приборостроения им. академика А.Г. Шипунова» (г. Тула) при разработке математического и программного обеспечения стенда полунатурного моделирования компонентов комплексов ПВО, НИИ ИСУ МГТУ им. Н.Э. Баумана в НИОКР при отработке алгоритмов обработки информации и управления БОУ МРЛС, ЗАО «РТСофт» (г. Москва) при разработке аппаратно-программных средств информационно-управляющих систем, в учебном процессе кафедры «Компьютерные системы и сети» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на:

1) международной научной конференции «IEEE NorthWest Russia Conference on Mathematical Methods in Engineering and Technology MMET NW 2018» (Санкт-Петербург, 2018);

2) международной научной конференции «2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (Зеленоград, 2019);

3) XXI международной научной конференции «Научные тенденции: вопросы точных и технических наук» (Санкт-Петербург, 2019);

4) XVI международной научно-практической конференции «Инновационные научные исследования: теория, методология, практика» (Пенза, 2019);

5) научном семинаре кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2019).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 12 научных статьях, из них 6 – в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки РФ, 1 статья в научном издании, индексируемом в системе Scopus,

2 статьи в сборниках научных трудов, входящих в базу данных Web of Science, общим объемом 12.3 п.л./ 4.9 п.л.

Положения, выносимые на защиту:

1) модифицированная модель и алгоритмы имитации случайных сигналов в базисе тригонометрических функций, обладающие меньшей вычислительной сложностью по сравнению с существующими;

2) способы дискретизации энергетических характеристик сигналов на ограниченных и бесконечных интервалах определения;

3) подход к разработке алгоритмов имитации сигналов с помощью оператора взаимопреобразования тригонометрического спектра и спектра Уолша – Пэли на основе ядра Фурье факторизуемой структуры в матричном представлении;

4) спектральные алгоритмы имитации случайных сигналов в базисе Уолша – Пэли, обладающие преимуществом по сравнению с существующими по вычислительной сложности на этапе имитации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключения, списка литературы и приложения, содержит 217 страниц текста, 38 рисунков, 19 таблиц. Список литературы содержит 140 источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и основные задачи исследования, дана их общая характеристика, указаны научная новизна и практическая значимость результатов работы, перечислены методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены сведения о достоверности, апробации и внедрению результатов работы, о структуре и объеме диссертации.

В первой главе дано сравнительное аналитическое описание существующих методов и моделей имитации случайных сигналов, используемых для создания внешней среды ИУК. Рассмотрены методы и модели в рамках классической корреляционной теории: метод канонических разложений Пугачева, метод разложения в тригонометрический ряд Фурье, метод линейного преобразования, метод формирующих фильтров, модели Пугачева, Райса, Лобусова – Тьюнга, нерекурсивная модель Розанова – Сратовича, рекурсивная модель Быкова. Отмечены особенности методов имитации процессов с заданной многомерной плотностью вероятности и в рамках обобщенной корреляционной теории.

С целью оценки существующих методов и моделей имитации предложена система критериев, включающая основные требования, предъявляемые к моделям и алгоритмам имитации внешней среды ИУК. Среди требований выделены:

– необходимость формирования стационарных и нестационарных сигналов с вероятностными и энергетическими характеристиками, задаваемыми в табличном и аналитическом видах, включая экспериментальные ФСПМ, содержащие выбросы и разрывы первого рода;

– имитация сигналов с высокой точностью на относительно коротких интервалах времени;

– простота настройки алгоритмов имитации на задаваемые энергетические характеристики воспроизводимых сигналов;

- отсутствие переходного процесса в имитации;
- жесткое время имитации и связанная с этим допустимая вычислительная сложность алгоритмов.

На основании сформированной системы критериев дана оценка рассмотренных методов и моделей имитации. Наибольший интерес среди них представляют метод канонических разложений и модель В.С. Пугачева, позволяющие воспроизводить сигналы с высокой точностью без переходного процесса в широком диапазоне задаваемых энергетических характеристик.

Для повышения эффективности полунатурного моделирования компонентов ИУК и расширения совокупности испытываемых режимов поставлена задача разработки и исследования новых спектральных алгоритмов имитации, позволяющих в реальном времени создавать сложную сигнально-помеховую обстановку функционирования ИУК. Для решения поставленной задачи целесообразно воспользоваться методом канонических разложений и моделью Пугачева. Однако основным недостатком, ограничивающим их применение в жестком модельном времени, является высокая вычислительная сложность. Решения и разработки, предложенные в диссертации, направлены на преодоление этого недостатка.

Во второй главе решен ряд задач по разработке спектральных алгоритмов имитации сигналов в рамках корреляционной теории. Первой из них является *обеспечение связи спектров в гармонических базисах* (комплексном экспоненциальном и тригонометрическом) с заданными ФСП или АКФ имитируемого процесса. В дискретном варианте, показанном на Рис. 1, в частотных точках $\omega_k = k\Delta\omega = 2\pi k / T, k = 0, 1, 2, \dots$ ФСПМ $S(\omega_k)$ выражается соотношением:

$$S\left(\frac{2\pi}{T}k\right) = \frac{1}{T} \left\{ \text{Re}^2 \left[X\left(\frac{2\pi}{T}k\right) \right] + \text{Im}^2 \left[X\left(\frac{2\pi}{T}k\right) \right] \right\},$$

где T – период моделирования, X – спектральные коэффициенты, а символами Re и Im обозначены их действительная и мнимая части соответственно.

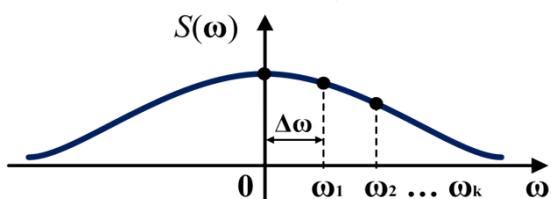


Рис. 1. Представление ФСПМ в частотных точках

В базисе комплексных экспоненциальных функций (КЭФ) $\left\{ \exp\left(j\frac{2\pi}{T}kt\right) \right\}, k = 0, 1, \dots,$

спектр $X_\phi(k)$ сигнала $x(t)$ есть разность $X_{\phiч}(k) - jX_{\phiн}(k)$, где четная $X_{\phiч}$ и нечетная $X_{\phiн}$ составляющие спектра

выражаются следующими интегральными соотношениями:

$$X_{\phiч}(k) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cos\left(\frac{2\pi}{T}kt\right) dt, \quad X_{\phiн}(k) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \sin\left(\frac{2\pi}{T}kt\right) dt.$$

С учетом вводимой для моделирования фазовой плотности λ_k , уравнения связи спектров в базисе КЭФ с ФСПМ принимают вид:

$$X_{\phi ч} (0) = \sqrt{\frac{S(0)}{T}}, X_{\phi ч} (k) = \sqrt{\frac{S\left(\frac{2\pi}{T}k\right)}{T(1+\lambda_k^2)}}, X_{\phi н} (k) = \lambda_k \sqrt{\frac{S\left(\frac{2\pi}{T}k\right)}{T(1+\lambda_k^2)}}, k = 1, 2, \dots \quad (1)$$

Сравнивая спектр $X_T(k) = \{X_{Tч}(k), X_{Tн}(k)\}$ в базисе тригонометрических функций (ТФ) $\left\{ \cos \frac{2\pi}{T}kt, \sin \frac{2\pi}{T}kt \right\}$ со спектром (1) в КЭФ $X_\phi(k)$, получаем связь с ФСПМ четной $X_{Tч}$ и нечетной $X_{Tн}$ составляющих спектров в базисе ТФ:

$$X_{Tч}(0) = X_{\phi ч}(0); X_{Tч}(k) = 2X_{\phi ч}(k); X_{Tн}(k) = 2X_{\phi н}(k), k = 1, 2, \dots \quad (2)$$

Первичным базисом для дальнейшей разработки определен базис тригонометрических функций.

Следующей решенной задачей является *дискретизация энергетических характеристик* сигналов – ФСПД и АКФ. Необходимость ее решения обусловлена представлением сигналов в теории цифровой обработки двумя классами определения – на ограниченных $[0, \omega_c]$ и бесконечных $[0, \infty)$ частотных интервалах, где ω_c – частота среза. В первом случае дискретизация выполняется непосредственно по теореме Найквиста – Котельникова. Во втором случае частота среза не задается, и правильно выполненная дискретизация позволяет корректно вычислить дискретные значения дисперсий и спектральных коэффициентов для алгоритма имитации. Для второго случая в работе предложены два способа дискретизации.

Применение первого способа целесообразно, когда ФСПД $S(\omega)$ аналитически интегрируема. В этом случае дискретные значения дисперсий σ_k^2 и спектральных коэффициентов $X_{\phi ч}(k)$ для ФСПД, представленной в виде

$$S(k) = S\left(\sigma^2, \frac{\omega_c}{x_c}, \frac{2\omega_c k}{N}\right), k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} \text{ или } k = 0, 1, \dots, \frac{N-1}{2},$$

можно получить из соотношений:

$$\sigma_k^2 = X_{\phi ч}^2(k) = \frac{S\left(\sigma^2, \frac{\omega_c}{x_c}, \frac{2\omega_c k}{N}\right)\omega_c}{2\pi N}, k = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1;$$

$$\sigma_0^2 = X_{\phi ч}^2(0) = \frac{S\left(\sigma^2, \frac{\omega_c}{x_c}, 0\right)\omega_c}{\pi N}, \sigma_{\frac{N}{2}}^2 = X_{\phi ч}^2\left(\frac{N}{2}\right) = \frac{S\left(\sigma^2, \frac{\omega_c}{x_c}, \omega_c\right)\omega_c}{\pi N}.$$

где $x_c = \omega_c / \omega_*$, а ω_* – максимально возможная частота в спектре.

Второй предложенный в работе способ дискретизации необходим, когда функция $S(\omega)$ аналитически не интегрируема. Тогда, приняв $bS(0) = S(x_c)$, где b – малая величина, например, $b \in [10^{-1}, 10^{-4}]$, можно определить x_c и далее действовать аналогично первому способу.

Разработанные способы устраняют методическую погрешность при дискретизации энергетических характеристик.

Далее во второй главе разработаны модели и алгоритмы имитации детерминированных и случайных сигналов в тригонометрическом базисе. *Гармоническая модель детерминированных сигналов* конечной мощности, определенных на полуинтервале $t \in [0, T)$, в базисе ГФ выражается следующим соотношением:

$$x_T(t) = X_{\phi\psi}(0) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \left[X_{\phi\psi}(k) \cos\left(\frac{2\pi}{T} kt\right) + X_{\phi\theta}(k) \sin\left(\frac{2\pi}{T} kt\right) \right], \quad (3)$$

а АКФ на интервале $[-T, T)$ приобретает вид:

$$R_A(\tau) = X_{\phi\psi}^2(0) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \left[X_{\phi\psi}^2(k) + X_{\phi\theta}^2(k) \right] \cos\left(\frac{2\pi}{T} k\tau\right), \quad \tau \in [-T, T). \quad (4)$$

Тогда *алгоритмы имитации дискретных детерминированных сигналов* в базисе ГФ выражаются формулами для четных и нечетных значений числа отсчетов N :

$$x(i) = X_{\phi\psi}(0) + 2 \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} \left[X_{\phi\psi}(k) \cos\left(\frac{2\pi}{N} ki\right) + X_{\phi\theta}(k) \sin\left(\frac{2\pi}{N} ki\right) \right] + X_{\phi\psi}\left(\frac{N}{2}\right) \cos(\pi i), \quad (5)$$

$$x(i) = X_{\phi\psi}(0) + 2 \sum_{k=1}^{\frac{N-1}{2}} \left[X_{\phi\psi}(k) \cos\left(\frac{2\pi}{N} ki\right) + X_{\phi\theta}(k) \sin\left(\frac{2\pi}{N} ki\right) \right], \quad i = 0, 1, \dots, N-1. \quad (6)$$

Модель непрерывного случайного сигнала $y(t)$ по Пугачеву имеет вид:

$$y(t) = v_0 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \left[v_k \cos(2\pi kt) + u_k \sin(2\pi kt) \right], \quad t \in [0, T). \quad (7)$$

В модели (7) случайный спектр Фурье формируется из независимых случайных величин $\{v_m, u_m\}$ с параметрами $(0, D[v_k])$ и $(0, D[u_k])$, где D – дисперсия, причем возможно получение стационарного эргодического процесса. Чтобы ФСПД и АКФ процесса (7) совпадали с ФСПМ и АКФ детерминированных сигналов (5) и (6), должны выполняться равенства:

$$D[v_0] = X_{\phi\psi}^2(0), \quad D[v_k] = X_{\phi\psi}^2(k) = D[u_k] = X_{\phi\theta}^2(k), \quad k = 1, 2, \dots$$

В этом случае обеспечиваются простота перехода от детерминированного сигнала к случайному процессу и его стационарность в широком смысле. *Алгоритмы имитации дискретных случайных сигналов* для четного и нечетного значений N приобретают вид следующих формул:

$$y(i) = v_0 + 2 \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} \left[v_k \cos\left(\frac{2\pi}{N} ki\right) + u_k \sin\left(\frac{2\pi}{N} ki\right) \right] + v_{\frac{N}{2}} \cos(\pi i), \quad (8)$$

$$y(i) = v_0 + 2 \sum_{k=1}^{\frac{N-1}{2}} \left[v_k \cos\left(\frac{2\pi}{N} ki\right) + u_k \sin\left(\frac{2\pi}{N} ki\right) \right], \quad i = 0, 1, \dots, N-1. \quad (9)$$

С целью сокращения вычислительной сложности алгоритмы (8) и (9) были модифицированы путем следующей замены случайных величин v_k, u_k :

$$v_0 = \mu_0 X_{\phi\psi}(0), v_k = \mu_k X_{\phi\psi}(k), u_k = \gamma_k X_{\phi\psi}(k), k = 1, 2, \dots$$

Здесь μ_k и γ_k – случайные независимые числа, равновероятно принимающие значения ± 1 и имеющие параметры $(0, 1)$, т.е.

$$M[\mu_k \mu_m] = M[\gamma_k \gamma_m] = M[\mu_k \gamma_m] = 0, k \neq m; M[\mu_k^2] = M[\gamma_k^2] = D[\mu_k] = D[\gamma_k] = 1. \quad (10)$$

Поэтому $D[v_0] = X_{\phi\psi}^2(0)$, $D[v_k] = D[u_k] = X_{\phi\psi}^2(k)$, $k = 1, 2, \dots$

В модифицированном варианте алгоритмы имитации дискретных случайных сигналов для четных и нечетных N выражаются следующими формулами:

$$y(i) = \mu_0 X_{\phi\psi}(0) + 2 \sum_{k=1}^{\frac{N-1}{2}} \left[\mu_k X_{\phi\psi}(k) \cos\left(\frac{2\pi}{N} ki\right) + \gamma_k X_{\phi\psi}(k) \sin\left(\frac{2\pi}{N} ki\right) \right] + \mu_{\frac{N}{2}} X_{\phi\psi}\left(\frac{N}{2}\right) \cos(\pi i), \quad (11)$$

$$y(i) = \mu_0 X_{\phi\psi}(0) + 2 \sum_{k=1}^{\frac{N-1}{2}} \left[\mu_k X_{\phi\psi}(k) \cos\left(\frac{2\pi}{N} ki\right) + \gamma_k X_{\phi\psi}(k) \sin\left(\frac{2\pi}{N} ki\right) \right], i = 0, 1, \dots, N-1. \quad (12)$$

Статистические характеристики процессов (11), (12) и (8), (9) совпадают.

В третьей главе выполнены разработки, направленные на повышение вычислительной эффективности алгоритмов имитации случайных сигналов. Проанализирована задача взаимопреобразования спектров на основе ядра Фурье, обосновано применение базиса Уолша – Пэли в качестве целевой базисной системы. Осуществлено преобразование тригонометрического спектра в спектр Уолша – Пэли с помощью линейного оператора на основе ядра Фурье факторизуемой структуры. Выделены независимые группы элементов ядра и спектральных коэффициентов. Получены прямой и оптимизированный алгоритмы имитации случайных стационарных сигналов в базисе Уолша – Пэли, разработана быстрая версия алгоритма, прямой и быстрый алгоритмы имитации нестационарных сигналов в целевом базисе. Проведена аналитическая оценка вычислительной сложности полученных алгоритмов имитации.

Задача преобразования спектров состоит в переходе от известного спектра сигнала в базисе $\{\psi(m, i)\}$ к его спектру в новом базисе $\{\varphi(k, i)\}$: $\{Y_\psi(m)\} \rightarrow \{Y_\varphi(k)\}$. Этот переход можно представить в следующем виде:

$$Y_\varphi(k) = \sum_{m=0}^{N-1} Y_\psi(m) \Phi(k, m); \Phi(k, m) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \psi(m, i) \varphi(k, i); k, m = 0, 1, \dots, N-1.$$

Здесь $\Phi(k, m)$ – ядро Фурье линейного оператора преобразования спектра. При одинаковой мощности базисов ψ и φ имеет место взаимопреобразование спектров с помощью одного и того же ядра Фурье.

В исследование базисных систем и ядер Фурье внесли вклад известные отечественные и зарубежные ученые – А.В. Вариченко, Э.Е. Драгман, А.В. Зеленков, Г.А. Кухарев, В.Г. Лабунец, В.Н. Пойда, Р.Х. Садыхов, В.В. Сюзев, А.М. Трахтман, В.А. Трахтман, П.М. Чеголин, В.П. Шмерко, Дж. Адамар, Н. Ахмед, Х. Крестенсон, Р. Пэли, Ф. Пихлер, К. Радемахер, К. Рао, Дж. Уолш, А. Хаар, Х. Хармут и другие. Исходя из требований к моделям и алгоритмам имитации сигналов внешней среды ИУК, функции базисных систем должны отличаться простотой реализации, быть

вещественными, обеспечивать возможность быстрых преобразований. В свою очередь, ядра Фурье должны быть слабозаполненными и факторизуемыми, т.е. допускать разбиение ненулевых элементов на независимые группы.

Анализ функций Радемахера, Уолша и Хаара показал, что в наибольшей степени требованиям к базисным функциям отвечают системы вещественных функций Уолша, имеющие только арифметическую операцию сложения и логическую операцию изменения знака. При этом в базисах Уолша есть быстрые преобразования. В работе применено упорядочение Пэли как более удобное для программной реализации. Вещественные функции Уолша – Пэли записываются следующим образом:

$$\varphi(k, i) = pal(k, i) = \cos\left(\pi \sum_{m=1}^n k_{n+1-m} \cdot i_m\right), \quad k \in [0, N), \quad i \in [0, N).$$

При этом аргумент k и номер i базисной функции раскладываются в позиционный n -разрядный двоичный код:

$$k = \sum_{m=1}^n k_m 2^{m-1}, \quad i = \sum_{m=1}^n i_m 2^{m-1}, \quad N = 2^n.$$

Ядро Фурье однозначно определяет *линейный оператор взаимопреобразования спектра* в тригонометрическом базисе и базисе Уолша – Пэли. Четные $\Phi_{\text{ч}}$ и нечетные $\Phi_{\text{н}}$ элементы ядра рассчитываются по следующим зависимостям:

$$\Phi_{\text{ч}}(k, m) = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \cos\left(\frac{2\pi}{N} mi\right) pal(k, i), \quad \Phi_{\text{н}}(k, m) = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sin\left(\frac{2\pi}{N} mi\right) pal(k, i).$$

Здесь $\Phi_{\text{ч}}(0, 0) = 1$; $\Phi_{\text{ч}}\left(k, \frac{N}{2}\right) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \cos(\pi i) pal(k, i)$; $k, m = 1, 2, \dots, N-1$.

Факторизованная структура ядра Фурье позволила сформулировать *правило образования независимых групп ненулевых элементов ядра* и спектральных коэффициентов. В общем виде правило представлено в Таблице 1. Переход к случайному спектру осуществляется при помощи случайных чисел μ_k и γ_k :

$$Y_{T\text{ч}}(k) = \mu_k X_{\text{Фч}}(k), \quad Y_{T\text{н}}(k) = \gamma_k X_{\text{Фч}}(k).$$

Таблица 1.

Правило выделения независимых групп элементов ядра Фурье

№ группы	Число элементов в группе	Спектр Фурье	Спектр Уолша – Пэли
1	1	$Y_{T\text{ч}}(0)$	$Y_{\text{П}}(0)$
2	1	$Y_{T\text{ч}}\left(\frac{N}{2}\right)$	$Y_{\text{П}}\left(\frac{N}{2}\right)$
λ , $\lambda = 3, 4, \dots, n+1$	$2^{\lambda-2}$	$Y_{T\text{н}}\left[\frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2l)\right]$, $Y_{T\text{ч}}\left[\frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2l)\right]$, $l = 0, 1, \dots, 2^{\lambda-3} - 1$	$Y_{\text{П}}\left[\frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2l)\right]$, $l = 0, 1, \dots, 2^{\lambda-2} - 1$

На основе правила выделения независимых групп элементов ядра получены *прямой и оптимизированный операторы преобразования спектра*. В погрупповой

записи они представляют собой выражения, приведенные в Таблице 2.

Таблица 2.

Операторы преобразования спектра в базисах ТФ и Уолша – Пэли

№ группы	Аналитическое выражение оператора
1	$Y_{II}(0) = \mu_0 X_{\Phi\psi}(0);$
2	$Y_{II}(N/2) = \mu_{N/2} X_{\Phi\psi}(N/2);$
<i>Прямой оператор</i>	
λ	$Y_{II}\left[\frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2l)\right] = \sum_{m=0}^{2^{\lambda-3}-1} \left\{ \gamma_{\frac{N}{2^{\lambda-1}}}(1+2m) X_{\Phi\psi}\left[\frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2m)\right] \Phi_H\left[\frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2l), \frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2m)\right] + \right.$ $\left. + \mu_{\frac{N}{2^{\lambda-1}}}(1+2m) X_{\Phi\psi}\left[\frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2m)\right] \Phi_{\psi}\left[\frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2l), \frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2m)\right] \right\}, \lambda = 3, 4, \dots, n+1,$ $l = 0, 1, \dots, 2^{\lambda-2} - 1$
<i>Оптимизированный оператор</i>	
λ	$Y_{II}\left[\frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2l)\right] = \sum_{m=0}^{2^{\lambda-3}-1} \left\{ \gamma_{\frac{N}{2^{\lambda-1}}}(1+2m) Z_H\left[\frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2l), \frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2m)\right] + \right.$ $\left. + \mu_{\frac{N}{2^{\lambda-1}}}(1+2m) Z_{\psi}\left[\frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2l), \frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2m)\right] \right\}, \lambda = 3, 4, \dots, n+1,$ $l = 0, 1, \dots, 2^{\lambda-2} - 1.$

Выражения для прямого и оптимизированного операторов групп 1 и 2 совпадают. Оптимизация оператора для групп с номером λ состоит в вынесении вычислений его четных Z_{ψ} и нечетных Z_H компонентов на этап настройки алгоритма имитации:

$$Z_H\left[\frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2l), \frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2m)\right] = X_{\Phi\psi}\left[\frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2m)\right] \Phi_H\left[\frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2l), \frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2m)\right];$$

$$Z_{\psi}\left[\frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2l), \frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2m)\right] = X_{\Phi\psi}\left[\frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2m)\right] \Phi_{\psi}\left[\frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2l), \frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2m)\right].$$

Таким образом, в оптимизированном варианте нахождение спектральных коэффициентов Y_{II} сводится к суммированию заранее рассчитанных величин Z_H и Z_{ψ} при случайном изменении их знаков, операции умножения отсутствуют. Это дает существенное снижение времени работы алгоритма на этапе непосредственной имитации сигнала.

С помощью разработанных операторов преобразования спектра получены прямой и оптимизированный алгоритмы имитации стационарных случайных сигналов в базисе Уолша – Пэли, выражаемые следующей общей формулой:

$$y(i) = Y_{II}(0) + Y_{II}\left(\frac{N}{2}\right) pal\left(\frac{N}{2}, i\right) + \sum_{\lambda=3}^{n+1} \sum_{l=0}^{2^{\lambda-2}-1} Y_{II}\left[\frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2l)\right] pal\left[\frac{N}{2^{\lambda-1}}(1+2l), i\right], i \in [0, N). \quad (13)$$

С использованием быстрого преобразования Уолша с прореживанием по времени сформулирована быстрая версия алгоритма (13). Также получены прямой и быстрый алгоритмы имитации нестационарных сигналов. Корректность алгоритмов подтверждена выполнением погрупповых и общего равенств Парсеваля.

Аналитическая оценка временной вычислительной сложности алгоритмов по

суммарному числу вычислительных операций дала следующие результаты. Сложность алгоритмов в базисе ТФ в немодифицированном и модифицированном вариантах составляет $2N^2$ арифметических операций, сложность прямого алгоритма имитации стационарных сигналов в базисе Уолша – Пэли оценивается в $(5N^2 - 6N)/3$, оптимизированного – в $(4N^2 - 6N)/3$ операций. Оценка сложности прямого алгоритма имитации нестационарных сигналов дает величину $N(N - 1)$, а для быстрых версий алгоритмов имитации стационарных и нестационарных сигналов – $N \log_2 N$ операций. Таким образом, при имитации стационарных сигналов вычислительная сложность по аналитической оценке сокращается не менее чем в 1.2 раза в случае прямого алгоритма и не менее чем в 1.5 раза в случае оптимизированного. Быстрые версии алгоритмов имитации дают сокращение сложности в $2N / \log_2 N$ раз. Снижение сложности алгоритмов позволяет имитировать внешнюю среду ИУК более интенсивно, в жестком модельном времени без переходного процесса при одновременном отсутствии ограничений на вид и форму энергетических характеристик воспроизводимых сигналов.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию полученных в работе результатов, практической оценке точности разработанных алгоритмов и времени имитации с помощью пакета математического моделирования MATLAB. Проведен анализ применимости средств моделирования MATLAB для исследования алгоритмов имитации. Разработана программа экспериментального исследования алгоритмов имитации в среде MATLAB. Оценка качества алгоритма выполнена сравнительным анализом трех АКФ – теоретической (эталонной) R_T , алгоритмической R_A (формируется по завершении этапа настройки алгоритма) и экспериментальной $R_Э$ (формируется по результатам воспроизведения конкретного сигнала), причем последняя рассчитывается в усредненном виде по нескольким реализациям сигнала.

Моделирование выполнено основным алгоритмом в базисе Уолша – Пэли в оптимизированном варианте. Вычислительные эксперименты проведены в два этапа. На первом этапе осуществлена имитация случайных процессов с аналитически заданными ФСПД физического белого шума, экспоненциальной и кусочно-линейной («треугольной»), показанными на Рис. 2.

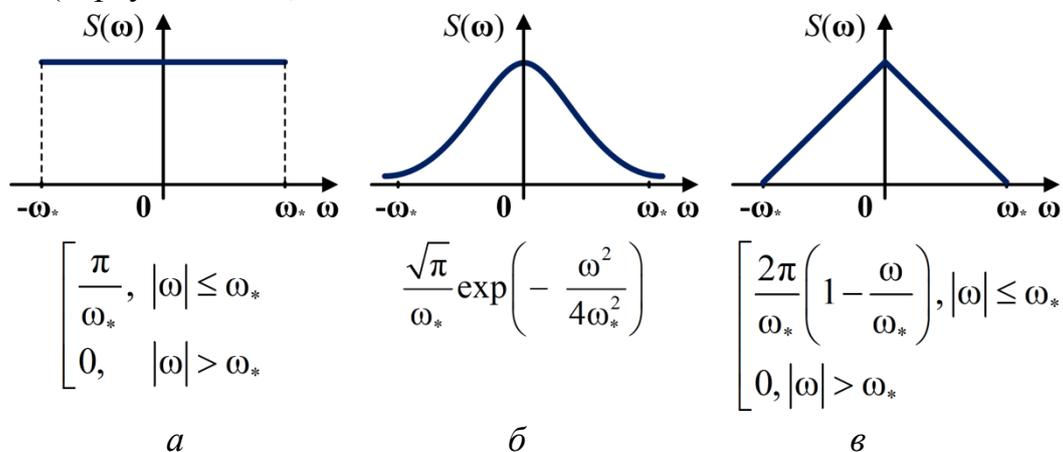


Рис. 2. Вид и аналитические выражения ФСПД для эксперимента:
a – физического белого шума; *б* – экспоненциальной; *в* – «треугольной»

Дискретизация названных ФСПД осуществлена разработанными в диссертации способами. В результате тестирования оптимизированного алгоритма имитации стационарных сигналов на пяти различных значениях N от 32 до 1024 установлено, что на указанных ФСПД погрешность нормированной алгоритмической АКФ R_A по отношению к АКФ R_T не превышает величины 0.067, а погрешность усредненной по 10 реализациям экспериментальной АКФ не выше 0.083. Это говорит о корректности алгоритма имитации и позволяет применять полученные модельные сигналы на практике. Погрешность экспериментальной АКФ во всех случаях меньше по сравнению с имитацией модифицированным алгоритмом

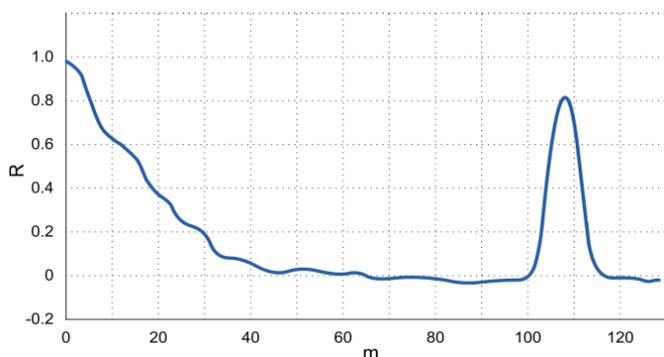


Рис. 3. Исходная АКФ сигнала по данным натуральных испытаний

в базе ТФ: снижение погрешности на заданных ФСПД составило диапазон от 0.0002 до 0.0293.

На втором этапе тестирования было осуществлено экспериментальное моделирование реального входного сигнала БОУ МРЛС ИУК, заданного дискретными значениями АКФ при $N = 128$, полученными в ходе натурных испытаний. График нормированной АКФ R_H после ее линейной интерполяции имеет вид,

показанный на Рис. 3. Имитация исследуемым алгоритмом показала средние значения абсолютных погрешностей алгоритмической АКФ R_A и усредненной по 10 реализациям экспериментальной АКФ R_{II} – 0.018 и 0.039 соответственно. При имитации модифицированным алгоритмом в базе ТФ для $N = 128$ погрешность экспериментальной АКФ $R_{TФ}$ составила 0.059. Визуально точность имитации новым алгоритмом подтверждается наложением графиков усредненных экспериментальных АКФ R_{II} и $R_{TФ}$ на график АКФ R_H , как это показано на Рис. 4 ($N = 128$).



Рис. 4. Наложение графиков АКФ заданного и имитационных сигналов

на пяти различных значениях N от 32 до 1024 показала, что в каждом случае погрешность экспериментальной АКФ ниже при имитации новым алгоритмом. В среднем абсолютная погрешность снизилась на величину 0.017.

Таким образом, как на теоретических энергетических характеристиках, так и на АКФ реального сигнала новый алгоритм показал сохранение (при незначительном улучшении) точности имитации, свойственные методу и канонических разложений и модели Пугачева.

Оценка времени программной генерации сигнала встроенными средствами MATLAB показала, что продолжительность этапа непосредственной имитации в новом алгоритме не превышает 2% общего времени его выполнения, а при имитации в тригонометрическом базисе это значение составляет около 49%. Общее время полного алгоритма в базисе Уолша – Пэли больше времени, требуемого для алгоритма в базисе тригонометрических функций. Это связано с большим объемом подготовительной работы на этапе настройки нового алгоритма. Однако по времени этапа непосредственного воспроизведения сигнала оценочное преимущество нового алгоритма составило от 16 до 23 раз на различных значениях N , в среднем – в 20 раз. Это объясняется значительным сокращением доли этапа имитации в общем времени выполнения алгоритма из-за вынесения большей части вычислительной работы на этап настройки, а также погрупповым выполнением операций на этапе имитации.

На основании полученных результатов можно обобщенно констатировать существенное преимущество по вычислительной сложности разработанных алгоритмов на этапе имитации перед гармоническими алгоритмами, лежащими в основе существующих подходов к спектральной имитации сигналов.

В общих выводах и заключении приведен перечень основных результатов диссертационной работы в соответствии с заявленной научной новизной.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнен аналитический обзор областей применения математического моделирования внешней среды ИУК, решающих задачи сбора, обработки, передачи и отображения информации в виде сигналов различной физической природы.

2. Осуществлен сравнительный анализ существующих методов и моделей имитации случайных процессов на основе предложенной системы критериев. Отмечено преобладающее значение требований по точности и вычислительной сложности, а также простоте настройки реализуемых алгоритмов на задаваемые энергетические характеристики сигналов, предназначенных для имитации внешней среды ИУК в жестком модельном времени. Предпочтение отдано методу канонических разложений и модели В.С. Пугачева.

3. Поставлена задача разработки новых эффективных спектральных алгоритмов имитации, позволяющих в жестком модельном времени создавать сложную сигнально-помеховую обстановку функционирования ИУК. Решение задачи осуществлено методом канонических разложений при преодолении главного недостатка модели Пугачева – большой вычислительной сложности.

4. Поставлена и решена задача обеспечения взаимосвязи спектров в гармонических базисных системах с задаваемыми ФСП и АКФ сигнала. Разработаны спектральные модель и алгоритмы имитации детерминированных дискретных сигналов в тригонометрическом базисе, которые преобразованы в случайные модель и алгоритмы и модифицированы путем исключения операций умножения.

5. Поставлена и решена задача дискретизации ФСПД и АКФ сигналов в гармонических базисах на ограниченных и бесконечных интервалах определения, даны способы вычисления дискретных значений дисперсий и спектральных коэффициентов для применения в алгоритмах имитации.

6. Предложен подход к разработке спектральных алгоритмов имитации сигналов с помощью линейного оператора преобразования спектров на основе

ядра Фурье факторизуемой структуры. Целью применения подхода является повышение вычислительной эффективности алгоритма имитации за счет переноса значительного объема вычислений на этап его настройки и сокращения сложности этапа непосредственной имитации.

7. Обосновано использование системы функций Уолша в качестве целевого базиса спектрального преобразования. Разработаны операторы преобразования тригонометрического спектра в спектр Уолша – Пэли и на их основе – прямой и оптимизированный алгоритмы имитации стационарных случайных сигналов в базисе Уолша – Пэли. С помощью быстрого преобразования Уолша – Пэли получена их быстрая версия. Синтезированы алгоритмы имитации нестационарных сигналов. Дана аналитическая оценка вычислительной сложности разработанных алгоритмов.

8. Проведен анализ применимости средств пакета моделирования MATLAB для исследования алгоритмов имитации сигналов. В среде MATLAB разработано программное обеспечение для сравнительного экспериментального исследования основного алгоритма имитации в базисе Уолша – Пэли и модифицированного алгоритма в тригонометрическом базисе. На первом этапе осуществлены эксперименты на трех аналитически заданных теоретических ФСПД при различных значениях числа отсчетов сигнала. Расчет погрешностей алгоритмической и экспериментальной АКФ в каждом случае подтвердил корректность алгоритма имитации в базисе Уолша – Пэли и в сравнении с алгоритмом в тригонометрическом базисе показал сохранение точности воспроизведения сигнала, свойственной методу канонических разложений. На втором этапе выполнена имитация реального сигнала внешней среды ИУК по заданной дискретной АКФ. Эксперименты на различных значениях числа отсчетов дали аналогичные результаты по точности имитации, а оценка времени имитации показала значительное преимущество нового алгоритма по сравнению с алгоритмом в тригонометрическом базисе: доля этапа имитации в общем времени выполнения алгоритма составила около 2%, а длительность этапа непосредственного воспроизведения сигнала сократилась в среднем в 20 раз.

Основным преимуществом разработанных алгоритмов является возможность генерировать имитационные случайные процессы с задаваемыми энергетическими характеристиками без ограничений на их форму и способ задания, расширить диапазон входных воздействий при полунатурном моделировании компонентов ИУК, имитировать сложную сигнально-помеховую обстановку для отработки режимов и настройки информационных и измерительных каналов ИУК в жестком модельном времени.

Решенные в работе задачи дают общий подход к расширенной имитации внешней среды ИУК. Эффективность имитационных процессов еще более может быть повышена за счет введения параллельных вычислений на этапе настройки разработанных алгоритмов – прежде всего, при расчете элементов ядра оператора преобразования спектров и спектральных коэффициентов. Отдельным направлением является синтез аналогичных моделей и алгоритмов в базисе обобщенных функций Хартли, Виленкина – Крестенсона и других вещественных и комплексных базисных системах при различных способах упорядочения их функций с последующим исследованием вычислительной эффективности и точности получаемых алгоритмов. Все это следует отнести к перспективным задачам дальнейшей разработки темы диссертации.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Алгоритмы преобразования спектров в базисах Хартли и Уолша / Гуренко В.В. [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. М.: Изд-во «Инновационное машиностроение». 2018. № 10. С. 453-461. (1.1 п.л./ 0.3 п.л.)
2. Гуренко В.В. Применение алгоритмов имитации сигналов в задачах моделирования систем реального времени // Инновационные научные исследования: теория, методология, практика: Сборник статей XVI Международной научно-практической конференции. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». 2019. С. 55-59. (0.3 п.л.)
3. Гуренко В.В. Применение спектральных алгоритмов имитации сигналов для отработки режимов информационно-измерительных систем // Научные тенденции: Вопросы точных и технических наук. Сб. научных трудов по материалам XXI международной научно-практической конференции. СПб., Изд. ЦНК МОАН. 2019. С. 30-32. (0.2 п.л.)
4. Методы представления и имитации дискретных случайных сигналов в рамках обобщенной корреляционной теории / Гуренко В.В. [и др.] // Динамика сложных систем – XXI век. М.: Изд-во Радиотехника. 2019. № 1. С. 17-24. (1.0 п.л./ 0.3 п.л.)
5. Операторы преобразования спектров в базисах Фурье и Уолша / Гуренко В.В. [и др.] // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2017. № 2. С. 138-156. (2.2 п.л./ 0.5 п.л.)
6. Сюзев В.В., Гуренко В.В. Гармонические алгоритмы имитации сигналов в рамках корреляционной теории // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 4. С. 98-117. (1.7 п.л./ 0.9 п.л.)
7. Сюзев В.В., Гуренко В.В. Описание и имитация псевдослучайных сигналов в рамках обобщенной корреляционной теории в одноосновных системах счисления // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 10. С. 102-116. (1.7 п.л./ 0.8 п.л.)
8. Сюзев В.В., Гуренко В.В., Смирнова Е.В. Аналитический обзор известных методов и алгоритмов имитации сигналов в рамках корреляционных теорий и законов распределения // Технологии инженерных и информационных систем. Научно-технич. журн. 2017. Вып. 2. С. 26-40. (0.9 п.л./ 0.3 п.л.)
9. Сюзев В.В., Гуренко В.В., Смирнова Е.В. Спектральные алгоритмы имитации сигналов как учебно-методический инструмент подготовки инженеров // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 7. С. 21-33. (1.5 п.л./ 0.6 п.л.)
10. Gurenko V.V., Bychkov B.I. The Discretization of the Energy Characteristics of Signals in Harmonic Simulation Algorithms. 2019 IEEE EConRus Proceedings. 2019. Pp. 2142-2147. (0.6 п.л./ 0.4 п.л.)
11. Signal's Simulation Methodologies Used in Scientific and Educational Tasks of Real-time Information System's Modelling / Gurenko V. [and others] // INTED2017 Proceedings. 2017. Valencia, Spain. Pp. 9140-9143. (0.3 п.л./ 0.1 п.л.)
12. Software for Signals Simulation Algorithms' Implementations as a New Form of Student's Research in the Field of Engineers Preparation / Gurenko V. [and others] // INTED2018 Proceedings. 2018. Valencia, Spain. Pp. 4114-4123. (0.8 п.л./ 0.2 п.л.)