

На правах рукописи



Крячко Михаил Александрович

**МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ И ОБРАБОТКИ
ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИЙ КРАВЧЕНКО-РВАЧЕВА И
ОБОБЩЕННЫХ АТОМАРНЫХ ВЕЙВЛЕТОВ В
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

Специальность: 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций
(отрасль наук – технические)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Научный руководитель: **Бестугин Александр Роальдович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Парамонов Александр Иванович**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры сетей связи и передачи данных
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-
Бруевича».

Рашич Андрей Валерьевич
кандидат технических наук, доцент,
доцент Высшей школы прикладной физики
и космических технологий Института электроники
и телекоммуникаций ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого».

Ведущая организация: ФГУП «Государственный научно-исследовательский
институт прикладных проблем», 191167, г. Санкт-
Петербург, набережная Обводного канала, д. 29.

Защита состоится «24» декабря 2025 г., в 16:00, на заседании диссертационного совета 24.2.384.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67. Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета <http://dissov.guap.ru>.

Автореферат разослан «10» ноября 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.384.01,
кандидат техн. наук, доцент



Сергеев Александр Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Актуальным направлением развития современных систем, сетей и устройств телекоммуникаций является анализ, обработка, хранение и передача информации, представленной с помощью различных типов сигналов. Для передачи целевой информации систем дистанционного зондирования Земли требуется обеспечить скорость передачи информации до 2 Гбит/с с учетом длительности сеанса связи около 10 мин. Передача фотографий высокого разрешения, а также возможность приема информации ограниченным числом наземных станций приводят к запросам на увеличение скорости в канале «космос–Земля» более 1 Гбит/с в X- либо Ka-диапазоне. Сети 5G должны обеспечить скорость передачи данных до 20 Гбит/с и среднюю скорость взаимодействия с пользователем 120 Мбит/с, а в проектируемых сетях 6G эти значения должны достичь 1 Тбит/с и 1 Гбит/с соответственно. Предполагается использовать для этих целей радиоинтерфейс на основе нейронного приемника с настраиваемой модуляцией. Реализация интегрированных измерений и связи в этом случае основывается на аспектах физического уровня, таких как оптимизация формы сигнала и требований к полосе пропускания, оптимальная архитектура системы и объединение данных связи и измерений в системе.

Алгоритмы вейвлет преобразования нашли широкое применение в существующих и перспективных телекоммуникационных системах. Эффективность представления сигналов в вейвлет области, их анализ и обработка существенно зависят от выбора материнских функций, которые при этом используются. Адекватный выбор таких функций обеспечивает необходимую точность аппроксимации информативных сигналов во время-частотной области, позволяет реализовать качественную декомпозицию и сосредоточить энергию сигнала в небольшом количестве значимых ненулевых коэффициентов.

При выборе материнской функции, учитываются такие характеристики, как размер носителя, количество нулевых моментов и гладкость базовых функций. Однако, указанные свойства предоставляют лишь математическое описание материнских функций, которое не позволяет получить явные рекомендации по их практическому применению для анализа и обработки различных типов сигналов. Поэтому, с целью поиска оптимальных материнских функций в современной технике обработки сигналов используются подходы, в основе которых лежат энергетические, корреляционные и информационные критерии.

Степень разработанности темы. В связи с интенсивным развитием беспроводных телекоммуникационных систем ощущается нехватка спектральных ресурсов, возрастает количество объемов передаваемой информации, повышаются требования к качеству передачи сообщений. В связи с этим возрастает актуальность решения проблемы построения сигналов, обладающих высокой скоростью спада уровня энергетического спектра при обеспечении необходимой достоверности приема сообщений.

Рассмотренные в данной работе новые подходы к выбору оптимальных вейвлет функций базируются на достижениях зарубежных ученых, в частности: М. Викиергойзера, И. Добеши, Д. Донохо, Р. Койфмана, С. Маллата, Макаричева В.А., Й. Мейера, Randall R.B., Ч. Чуи и др. Весомый вклад в развитие теоретических и прикладных основ время-частотного представления сигналов внесли также отечественные авторы: Астафьева Н.М., Ватолин Д.С., Дворников С.В., Кравченко В.Ф., Макаров С.Б., Пустовойт В.И., Рвачев В.Л., Цикин И.А., Чуриков Д.В. и др.

Проблема обработки цифровых изображений имеет большое значение. Одним из аспектов является сжатие данных, сопровождающееся потерями качества изображений. Сжатие изображений имеет свои особенности. Одна из них заключается в том, что человеческий глаз является лучшим критерием для оценки качества обработки. Используя алгоритмы сжатия с потерями, можно добиться значительного сокращения ресурсов при незаметных или почти незаметных изменениях исходного изображения. Во многих случаях эффективность алгоритма сжатия данных с потерей качества зависит от особенностей применяемых математических инструментов. В последней половине двадцатого века

появились новые инструменты аппроксимации, такие, как атомарные функции, например, функции Кравченко-Рвачева и вейвлеты. Причиной тому послужила невозможность решить различные инженерные задачи с помощью классических математических подходов. Применение данного подхода позволило разработать механизм контроля и управления потерей качества изображений. В ГУАП разработаны методы синтеза спектрально-эффективных сигналов и обработки цифровых изображений на основе атомарных функций Кравченко-Рвачева и обобщенных атомарных вейвлетов.

Для оценки качества обработки сигналов и цифровых изображений применен механизм контроля потери качества, основанный на использовании поперечника А.Н. Колмогорова, который обеспечивает возможность получения допустимой степени искажений.

Цель и задачи работы. Цель работы заключается в разработке спектрально-эффективных сигналов на основе атомарных функций Кравченко-Рвачева, которые обеспечивают высокую точность представления и быстродействие преобразования сигналов во время-частотной области и позволяют сосредоточить энергию сигнала в малом количестве значимых коэффициентов и обработки изображений с учетом механизма контроля потерь качества. Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие основные задачи:

- провести анализ способов построения и разработать методику численного решения задачи нахождения форм спектрально-эффективных сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией, в том числе и сигналов с межсимвольной интерференцией на основе атомарных функций Кравченко-Рвачева;
- разработать принципы построения, а также методы формирования и алгоритмы приема полученных новых спектрально-эффективных сигналов;
- осуществить анализ и выбрать способы и средства обработки цифровых изображений на основе обобщенных вейвлетов;
- исследовать эффективность предложенных способов, алгоритмов и критериев выбора материнских функций;
- провести компьютерное моделирование алгоритмов обработки сигналов и изображений.

Объект исследования - процессы преобразования и обработки непериодических одномерных сигналов и изображений.

Предмет исследования - методы преобразования и обработки цифровых сигналов и изображений с использованием кратного-масштабного анализа.

Научная новизна. Разработан способ многокритериальной оптимизации выбора обобщенных вейвлет функций для обработки одномерных непериодических сигналов, который в отличие от известных базируется на основе аппарата нечеткой логики и позволяет повысить эффективность выбора обобщенных вейвлет функций. Предложено и обосновано использование универсального индекса качества сигнала, как нового критерия выбора базовых вейвлет функций, который в отличие от известных позволяет осуществлять выбор обобщенных вейвлет функций на основе совокупности оценок коррелированности, изменения среднего значения и динамического диапазона обрабатываемого сигнала, что позволяет повысить качественные характеристики вейвлет преобразования в процессе очистки сигналов от шума.

Теоретическая и практическая значимость. Получили дальнейшее развитие: способы и устройства синтеза спектрально-эффективных сигналов на основе атомарных функций Кравченко-Рвачева, способы обработки цифровых изображений, на основе обобщенных вейвлет функций, способ оценки качества обработки цифровых изображений. Метод оценки эффективности выбора материнских функций *по критерию соотношения энергии вейвлет коэффициентов и энтропии распределения энергии Шеннона*, который отличается от известных использованием соотношения нормы энергии коэффициентов аппроксимации к энтропии детальных коэффициентов; *по критерию оценки*

коэффициента взаимной корреляции, который в отличие от существующего использует взаимную корреляцию между анализируемым сигналом и вейвлет коэффициентами; **по информационному критерию**, который отличается от известных использованием соотношения взаимной информации к относительной энтропии анализируемого сигнала, что позволило сосредоточить энергию сигнала в небольшом количестве значимых коэффициентов, обеспечить необходимую точность аппроксимации и наиболее полное представление сигналов во время-частотной области.

Разработаны новые и усовершенствованы существующие методы и алгоритмы эффективного выбора обобщенных вейвлет функций, которые могут быть использованы для разработки и усовершенствования телекоммуникационных систем, аппаратно-программных средств обработки сигналов в специализированных компьютерных системах, компьютеризированных системах диагностирования и контроля параметров процессов и сред, системах для измерения параметров случайных процессов и полей, системах идентификации сигналов, системах автоматического контроля технологических процессов и др., что позволит повысить эффективность обработки сигналов, в том числе изображений и видеосигналов, учитывая повышение быстродействия передачи таких сигналов и качественного их преобразования во время-частотной области.

Методология и методы исследования. Для решения сформулированных задач используется функциональный анализ, кратно-масштабный анализ, теория синтеза сигналов, конструктивный анализ, теория аппроксимаций, математический аппарат статистической радиотехники, теория вероятностей, математический анализ, а также численное моделирование на ЭВМ.

Положения, выносимые на защиту.

1. Метод построения спектрально-эффективных сигналов на основе атомарных функций Кравченко-Рвачева, отличающийся увеличением скорости вычислений и обеспечении требуемой точности построения огибающей сигналов с заданной крутизной ее спада.
2. Методика обработки новых спектрально-эффективных сигналов, имеющих сложные законы изменения амплитуды колебания, в отличие от известных, с заданной скоростью спада спектра вне занимаемой полосы при высокой концентрации энергии внутри занимаемой полосы частот и обладающей повышенной помехоустойчивостью.
3. Методика обработки цифровых изображений, основанная на обобщенных атомарных вейвлетах, отличающаяся наличием механизма контроля потерь качества изображений на основе равномерной метрики, определяемой максимальным абсолютным отклонением, основанной на использовании понятия поперечника А.Н. Колмогорова, среднеквадратичной метрики и отношения пикового сигнала к шуму.
4. Научно-технические предложения по реализации обработки и сжатия изображений, в базисах обобщенных вейвлетов, в трактах формирования и обработки телекоммуникационных систем с учетом показателей качества.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных в работе результатов определяется использованием апробированных методов теоретического анализа и эксперимента, а также согласованностью теоретических расчетов с результатами компьютерного моделирования и экспериментов. Результаты, представленные в диссертационной работе, доложены и обсуждены на следующих всероссийских и международных конференциях: Всероссийской научно-технической конференции: «Информационная безопасность - актуальная проблема современности. Совершенствование образовательных технологий подготовки специалистов в области информационной безопасности», г. Краснодар, 2013-2025; Международной конференции «Professional Search in the Modern World», St. Petersburg, Russia, 2014; International Conference for young researchers «Wave Electronics and its application in information and telecommunication systems» St. Petersburg, Russia, 2020-2025. Также полученные результаты

обсуждены на научных межкафедральных семинарах института радиотехники и инфокоммуникационных технологий ГУАП, 2018-2025.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 18 статьях и материалах конференций, из которых 10 статей опубликованы в изданиях, включенных в перечень ВАК, (3 из них без соавторов) и 8 работ – в сборниках трудов и тезисов конференций (2 из них без соавторов), 12 патентах на изобретение, 4 свидетельствах о регистрации программ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем составляет 183 страницы, 83 рисунка, список цитируемой литературы включает 118 позиций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Представлен обзор методов синтеза спектрально-эффективных сигналов, основанный на применении атомарных функций Кравченко –Рвачева, формулируется цель диссертационной работы.

В связи с интенсивным развитием радиотехнических средств передачи дискретных сообщений ощущается нехватка спектральных ресурсов, возрастает количество объемов передаваемой информации, повышаются требования к качеству передачи сообщений. В связи с этим возрастает актуальность решения проблемы построения сигналов, обладающих высокой скоростью спада уровня энергетического спектра при обеспечении необходимой достоверности приема сообщений.

Для повышения скорости спада уровня энергетического спектра (уровня внеполосных излучений) применяются отдельно и в совокупности различные методы:

- специальные виды модуляции – квадратурная амплитудная манипуляция (КАМ), амплитудно-фазовая манипуляция (АФМ), частотная манипуляция с непрерывной фазой (ЧМНФ);
- эффективные методы формирования последовательностей сигналов – введение межсимвольной интерференции, введение зависимости формы сигналов от вида передаваемой последовательности символов (зависимые сигналы), увеличение объема канального алфавита;
- сглаживание амплитуды, фазы или частоты в моменты перескока фазы или смены значений символов;
- спектрально-эффективные коды;
- цифровые методы реализации алгоритмов формирования и приема сигналов.

Использование атомарных функций для построения спектрально-эффективных сигналов позволяет легко формировать ортогональные последовательности подобные функциям Уолша, Хаара и др. Просто задается концентрация энергии в полосе и скорость спада уровня внеполосных излучений. Введение межсимвольной интерференции приводит к снижению значения пик-фактора колебаний, что очень важно в радиосистемах с ограниченным энергоресурсом.

Рассмотрены основные виды многоканальных цифровых телекоммуникационных систем, которые позволяют учесть различия по основным техническим характеристикам: ширине полосы занимаемых частот, способу модуляции, способу формирования сигнала и т.д. Одной из важнейших функций, осуществляемых комплексом технических средств радиосвязи, состоящей в концентрации значительных потоков информации, является частотно-пространственная локализация каналов связи и объединение их в пределах общих физических трактов передачи. Это относится к системам, как подвижной (с подвижными объектами), так и фиксированной радиосвязи. Данная задача решается путем объединения радиоканалов, либо уплотнением абонентских каналов.

Расширение полосы частот, занимаемой спектром, и усложнение формы сигнала, как функции времени, зависят от метода уплотнения. Используемые методы уплотнения можно разделить на 3 класса: частотное, временное и кодовое.

В работе представлены методы повышения эффективности использования частотного уплотнения путем использования сигналов, имеющих более узкие полосы занимаемых частот и высокую скорость спада энергетического спектра вне занимаемой полосы.

Для систем с кодовым уплотнением каналов интерес представляет формирование случайных последовательностей спектрально-эффективных сигналов на основе функций Уолша, Хаара, позволяющих получить требуемые спектральные характеристики наряду с многоадресностью системы передачи.

В работе рассмотрено противоречие, возникающие при построении многоканальных систем с частотным уплотнением каналов, между необходимостью применения спектрально-эффективных сигналов, имеющих максимальную скорость спада уровня внеполосных излучений и необходимостью сохранения высокой достоверности приема информации, что позволяет уменьшить значения защитных интервалов между каналами и снизить уровни межканальных помех.

В работе разработан общий подход к построению спектрально-эффективных сигналов на основе представления случайной последовательности спектрально-эффективных сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией (АФМ) длительностью T , соответствующих символам двоичного канального алфавита d_r , ($r=1,2$). Последовательность из N таких сигналов с амплитудой A_0 и несущей частотой ω_0 имеет вид:

$$y(t) = A_0 \sum_{k=0}^{N-1} a(t-kT) d_r^{(k)} \cos \omega_0 t, \quad 0 \leq t \leq NT \quad (1)$$

где $r=1,2$, $d_r^{(k)} = \begin{cases} 1, r=1, \\ -1, r=2, \end{cases}$ а функция $a(t)$ является огибающей сигнала, имеющего длительность

T . Комплексная огибающая последовательности (1) может быть записана в форме:

$$y_c(t) = A_0 \sum_{k=0}^{N-1} a(t-kT) d_r^{(k)} \quad (2)$$

Частным случаем АФМ сигналов являются КАМ сигналы – с дискретным количеством уровней амплитуды и фазы. Сигналы описываются как:

$$y_i(t) = \sqrt{2/T} a_i \cos \omega_0 t - \sqrt{2/T} b_i \sin \omega_0 t; \quad 0 \leq t \leq T, \quad i=1, \dots, M \quad (3)$$

или

$$s_i(t) = \sqrt{2/T} A_i \cos(\omega_0 t + \varphi_i), \quad i=1, \dots, M, \quad (4)$$

где $A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}$, $\varphi_i = \arctg(b_i / a_i)$.

Используя функции $\sqrt{2/T} \cos(\omega_0 t)$ и $-\sqrt{2/T} \sin(\omega_0 t)$ в качестве базисных, сигнал $s_i(t)$ в соответствии с (3) и (4) можно рассматривать либо как двумерный вектор с координатами a_i и b_i в декартовой системе, либо как вектор с амплитудой A_i и фазой φ_i в полярной системе координат. В принципе для каждого числа M можно построить бесконечное число ансамблей АФМ сигналов.

При равновероятной передаче сообщений оптимизация ансамбля заключается в таком размещении сигнальных точек, при которых собственные области S_i , $i=1, \dots, M$ примерно одинаковы и имеют одинаковый объем (площадь). Эта задача сводится в общем случае к плотнейшей укладке сфер одинакового радиуса в M -мерном пространстве сигналов или, как в рассматриваемом случае, к плотнейшей укладке окружностей на плоскости. При этом центры сфер или окружностей соответствуют сигнальным точкам.

Большинство известных ансамблей КАМ сигналов были найдены эвристическим методом. Класс КАМ сигналов включает в себя сигналы с M -ичной фазовой манипуляцией, которые образуют круговую сеть с равномерным распределением точек по окружности.

$$y_i(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + 2\pi i / M), \quad i = 1, \dots, M. \quad (5)$$

Значительно сузить полосу частот позволяют сигналы длительности LT (где $L = 1, 2, 3, \dots$) с межсимвольной интерференцией, называемые также сигналами с частичным откликом (СЧО) – в противоположность сигналам с полным откликом.

Сигналы с межсимвольной интерференцией (МСИ) обладают высокой скоростью спада уровня внеполосных излучений и более узкой полосой частот по причине более длинного в L раз амплитудного импульса. Эти сигналы представлены в форме:

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} A(t-kT) d_r^{(k)} \cos \omega_0 t, \quad \text{причем функция } A(t) \text{ имеет длительность } LT. \text{ Комплексная}$$

$$y_c(t) = \sum_{k=0}^{N-1} A(t-kT) d_r^{(k)}$$

оглабающая этой последовательности:

Помимо хороших спектральных характеристик, такие сигналы просты в формировании, имеют то же значение пик-фактора, что сигналы с полным откликом. Недостатки сигналов с МСИ: сложные алгоритмы обработки, при которых, однако, можно получить помехоустойчивость, близкую к потенциальной.

В системах связи, в основном, применяют КАМ-сигналы с дискретными значениями амплитуды и фазы. Однако для улучшения спектральных характеристик возможно и применение сглаживания амплитудных и фазовых импульсов.

Большим преимуществом КАМ сигналов является высокие удельные скорости передачи благодаря большому объему алфавита (находят применение сигналы КАМ-256, КАМ-1024 и др.). Однако, большое значение пик-фактора – более 10 позволяет применять КАМ только в телекоммуникационных системах с высокой линейностью тракта. Обмен мощности сигналов на полосу частот при использовании КАМ сигналов производится с меньшими энергетическими затратами, чем при использовании многопозиционной ФМ.

Таким образом недостатком спектрально-эффективных сигналов, сформированных на основе амплитудно-фазового метода, является значительная величина пик-фактора излучаемых колебаний. Сигналы с квадратурной амплитудной манипуляцией (КАМ сигналы) не обеспечивают высокую скорость спада уровня внеполосных излучений и высокую концентрацию энергии внутри занимаемой полосы частот. В этой связи интерес представляет поиск квадратурных сигналов, сформированных на основе спектрально-эффективных сигналов.

В диссертации решена задача построения спектрально-эффективных сигналов с заданной скоростью спада спектра вне занимаемой полосы при высокой концентрации энергии внутри занимаемой полосы частот. В общем случае необходимо выбрать такие временные функции $\varphi_k(t)$, чтобы с помощью выражений $\sum_{k=1}^N c_k \varphi_k(t)$ можно было обеспечить

заданную скорость спада спектра вне занимаемой полосы. Линейные комбинации функций $\varphi_k(t)$ должны приближать синтезируемый спектр сигнала к требуемому с наибольшей возможной по теории скоростью, т.е. обладать свойством аппроксимационной универсальности. Это накладывает определенные требования к выбору класса функций.

Решение данной задачи может быть получено на основе теории R -отображений, описывающей построение локальных функций класса C^∞ , обладающих одновременно свойствами многочленов и сплайнов. Такие функции получили название атомарных (функции Кравченко-Рвачева).

Скорость спада уровня внеполосных излучений для сигналов, построенных на основе полиномов γ -ой степени конечной длительности будет убывать пропорционально $C/\omega^{\gamma+1}$,

если все производные огибающей сигнала вплоть до производной $(\gamma-1)$ -го порядка не имеют скачков, а γ – ая производная всюду конечна. В свою очередь сплайны степени γ – это функции, являющиеся «кусочными» многочленами степени γ , причем в узлах сопряжения до $(\gamma-1)$ – ой производной.

Атомарные функции являются финитными и представляют собой решение дифференциального уравнения вида:

$$y^{(n)}(t) + a_1 y^{(n-1)}(t) + \dots + a_{n-1} y'(t) + a_n y(t) = \sum_{k=1}^N C_k y(at - b_k) \quad (7)$$

Решением данного уравнения является функция Кравченко-Рвачева

$$up(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{iut} \prod_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(u2^{-k})}{u2^{-k}} du \quad (8)$$

При численном решении выражения (8) необходимо определить число n членов произведения, которое обеспечивает заданное среднеквадратичное отклонение полученной функции $a(t)$ от истинного значения, полученного путем точного решения задачи. На практике целесообразно использовать метод определения числа n , заключающийся в том, что среднеквадратическое отклонение определяется между двумя вычисленными функциями $a(t)$, имеющими соседние номера n и $n+1$: $\varepsilon(m) = |a_m(t) - a_{m-1}(t)|^2$.

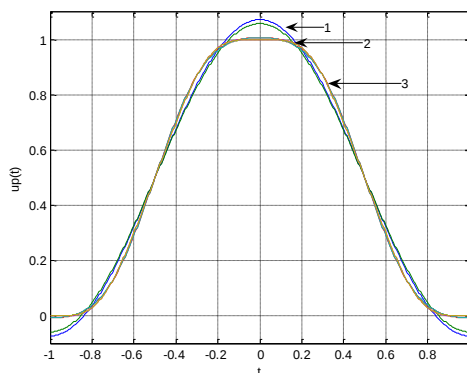


Рисунок 1 – Вид функции $up(t)$ при численном решении при $n=2$ (кривая 1), $n=3$ (кривая 2) и при $n=4,5,6,8$ (кривая 3)

Выбор допустимого значения среднеквадратического отклонения формы функций $up(t)$ определяется, в основном, допустимым отклонением формы энергетического спектра случайной последовательности синтезируемых сигналов. При выборе ограниченного числа n членов произведения для построения оптимальных сигналов происходит увеличение уровня внеполосных излучений. В этой связи определение допустимого числа n целесообразно проводить, начиная с задания допустимого увеличения уровня энергетического спектра вне занимаемой полосы частот. В этом заключается суть предлагаемого численного метода решения задачи нахождения формы огибающей и оценке точности ее решения.

Результаты вычисления показывают, что для $n \geq 6$ уровень ослабления боковых лепестков составляет порядка 50 дБ. Начиная с $n=10$, точность вычисления по сравнению с теоретическими результатами имеет погрешность 10^{-30} .

Глава 2. Проведен анализ принципов построения устройств формирования и приема сигналов. В работе рассмотрено противоречие между эффективным использованием частотного ресурса системы передачи и увеличением концентрации энергии спектра случайных последовательностей сигналов в заданной полосе частот. Увеличение концентрации энергии возможно путем применения спектрально-эффективных сигналов с межсимвольной интерференцией.

Основной задачей спектрально-эффективных методов формирования сигналов является максимизация эффективности использования полосы частот. Добиться этого позволяют дискретные методы, имеющие определенные преимущества перед аналоговыми: сравнительную простоту формирования сигналов со сложными законами изменения амплитуды и фазы; возможность перестройки форм генерируемых сигналов; стабильность параметров и т. д.

Разработано устройство формирования спектрально-эффективных сигналов, обеспечивающего увеличение объемов передаваемой информации в отведенной полосе частот и увеличение быстродействия при формировании спектрально-эффективных сигналов, а также повышение степени защиты передаваемой информации (см. рис. 2, 3).

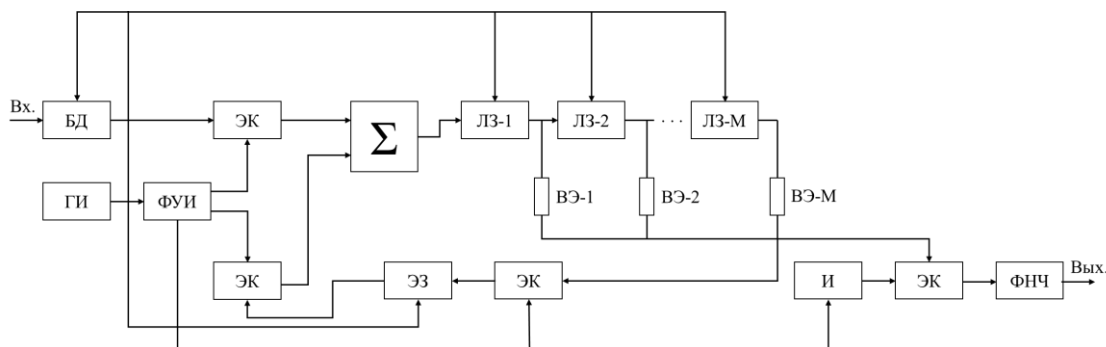


Рисунок 2 – Устройство формирования спектрально-эффективных сигналов

Задачей, решаемой при разработке устройства является увеличение объемов передаваемой информации в отведенной полосе частот. Устройство содержит блок дискретизации, электронные ключи, сумматор, многоотводную линию задержки, генератор тактовых импульсов, формирователь управляющих импульсов, взвешивающие элементы, элемент задержки, инвертор и фильтр нижних частот [см. 8, список патентов].

Временная диаграмма работы представлена на рис. 3.

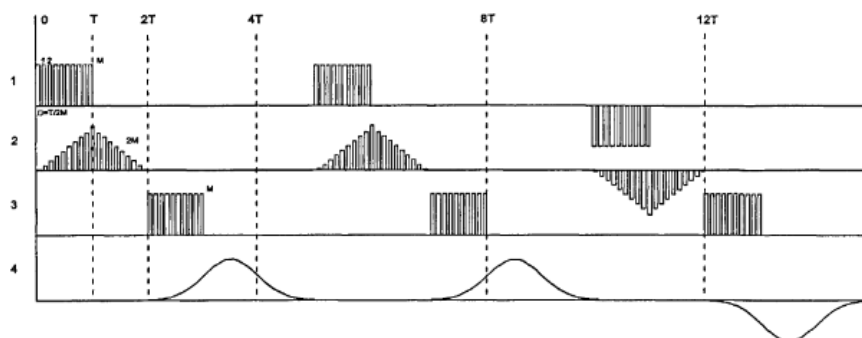


Рисунок 3 – Временная диаграмма работы устройства

Информация передается путем смены полярности видеоимпульсов длительностью T . Входная информационная последовательность символов, состоящая из прямоугольных видеоимпульсов различной полярности, поступает на первый вход блока дискретизации (диаграмма 1). На второй вход блока дискретизации поступают тактовые импульсы длительностью τ , имеющие период следования T_{II} . На выходе блока дискретизации формируется последовательность импульсов длительностью τ , амплитуда каждого из которых равна амплитуде соответствующего видеоимпульса на входе устройства формирования сигналов. Эта последовательность поступает на вход дискретно-аналогового нерекурсивного фильтра. С помощью взвешивающих элементов формируется импульсный отклик дискретно-аналогового нерекурсивного фильтра. На выходе взвешивающих элементов формируется сигнал треугольной формы, совпадающий с видом реакции фильтра на входное воздействие в виде прямоугольного видеоимпульса (диаграмма 2). Этот

сигнал по линии обратной связи последовательно поступает на вход многоотводной линии задержки. Управление работой многоотводной линией задержки осуществляется от генератора тактовых импульсов. В этом случае импульсный отклик дискретно-аналогового нерекурсивного фильтра будет иметь вид, изображенный на диаграмме 3. На выходе этого фильтра формируется сигнал, по форме совпадающий со сверткой видеоимпульса треугольной формы длительности $2T$ и импульсного отклика фильтра длительности T . Длительность сигнала на выходе взвешивающих элементов равна $3T$. Через четвертый электронный ключ и фильтр нижних частот сигнал поступает на выход устройства формирования сигналов (диаграмма 4). Фильтр нижних частот осуществляет сглаживание ступенчатой формы свертки согласованного дискретно-аналогового фильтра в напряжение непрерывной формы. Таким образом, на выходе устройства сформированы сигналы, имеющие увеличенную длительность и скругление формы огибающей. Увеличение длительности приводит к сужению занимаемой полосы частот, а скругление формы огибающей колебания приводит к увеличению скорости спада внеполосных излучений. За счет этого появляется возможность увеличения числа парциальных каналов в многоканальной системе передачи информации с частотным разделением каналов и, как следствие, увеличение объемов передаваемой информации в отведенной полосе частот.

Разработанное цифровое устройство формирования спектрально-эффективных сигналов (рис.4) содержит аналого-цифровой преобразователь, управляющий вход которого соединен с выходом блока синхронизации, первый мультиплексор, параллельный регистр, сумматор и первый блок управления, цифро-аналоговый преобразователь, два мультиплексора, два последовательно-параллельных многоразрядных регистра, второй и третий блоки управления, блок управления обратной связью, фильтр нижних частот. Задачей, решаемой при построении данного устройства, является увеличение быстродействия при формировании спектрально-эффективных сигналов, а также повышение степени защиты передаваемой информации [см. 9, список патентов].

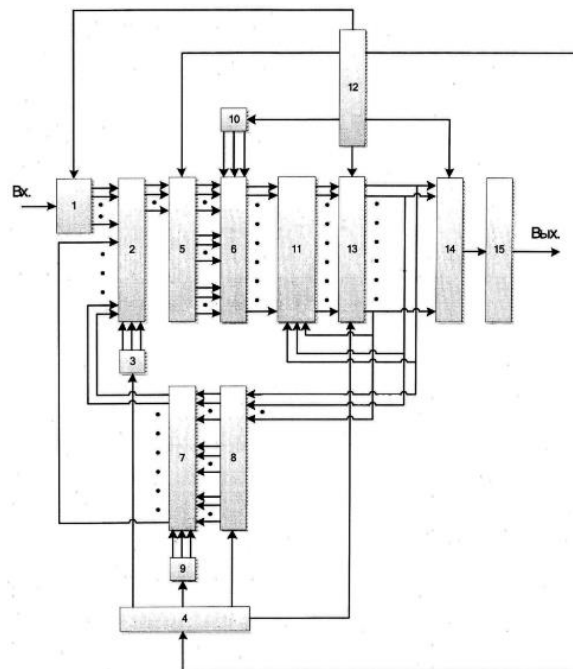


Рисунок 4 – Цифровое устройство формирования спектрально-эффективных сигналов

В основу работы устройства положен цифровой согласованный фильтр. Введение обратной связи позволяет формировать произвольный импульсный отклик и многократно повторять операцию свертки входного сигнала и импульсного отклика цифрового согласованного фильтра. Это в совокупности приводит к сглаживанию формы входного

сигнала и, как следствие, во-первых, к увеличению скорости спада внеполосных излучений и, во-вторых, к уменьшению полосы занимаемых частот. Увеличение скорости спада происходит из-за округления формы сигналов, а уменьшение полосы частот - из-за увеличения длительности сигналов.

Такое изменение формы сигналов может быть необходимым для повышения степени защиты информации от несанкционированного радиоперехвата сообщений. Передаваемые сигналы должны обладать возможностью изменения формы огибающей последовательности с определенной периодичностью автоматически, в процессе работы устройств передачи-приема информации. Процедура работы фильтра может быть выполнена без использования программируемого запоминающего устройства и запоминающего устройства. Это позволило увеличить быстродействие согласованного фильтра и всего устройства в целом.

Увеличение степени защиты информации от несанкционированного приема достигается путем динамического изменения формы сигналов в процессе передачи информации, которое обеспечивается с помощью изменения числа операций свертки входного сигнала и импульсного отклика цифрового согласованного фильтра. Эта процедура происходит в цепи обратной связи устройства. В этом случае в процессе передачи последовательности сигналов их форма будет изменяться. Считая, что закон изменения формы сигналов известен только приемной стороне, при несанкционированном приеме будет невозможно достоверно принимать информацию. Это особенно важно в многоканальных беспроводных системах передачи информации.

Повышение помехоустойчивости приема спектрально-эффективных сигналов обеспечивается, разработанными супергетеродинными приемниками путем:

- повышения чувствительности и помехоустойчивости приемника путем обеспечения приема полезной информации, содержащейся в одной боковой полосе, и сужения полосы пропускания приемника,
- обеспечения приема полезной информации на частотах основного и зеркального каналов приема,
- расширения функциональных возможностей путем обеспечения приема полезной информации, содержащейся в сигналах двух поляризаций [1-3, 4-10 список патентов].

Разработана мультисенсорная радиосистема передачи данных, которая может быть использована для получения, обработки, хранения телеметрической информации и выработки управляющих решений в условиях воздействия импульсных помех и узкополосных помех сети. Использование размещенных на пункте управления устройства хранения информационной базы телеметрической информации и технологических данных, устройства хранения информационной базы результатов обработки и анализа телеметрической информации и устройства хранения информационной базы принятия решения по данным обработки и анализа телеметрической информации обеспечивает возможность использования ранее накопленного опыта принятия управляющих решений, результате чего повышаются потребительские свойства [4, список патентов].

Таким образом для многоканальных систем с частотным уплотнением каналов целесообразным является применение спектрально-эффективных сигналов, имеющих максимальную скорость спада уровня внеполосных излучений при сохранении высокой достоверности приема информации. Это позволит уменьшить значения защитных интервалов между каналами и снизить уровни межканальных помех. Эффективное использование частотного ресурса системы передачи связано с увеличением концентрации энергии спектра случайных последовательностей сигналов в заданной полосе частот. Увеличение концентрации энергии возможно путем применения спектрально-эффективных сигналов с межсимвольной интерференцией [1-3, список свидетельств программ].

Разработана программа расчета энергетического потенциала радиолинии «земля-борт», позволяющая обеспечить устойчивую радиосвязь мультисенсорной системы передачи данных [3, список свидетельств программ].

Разработанные схемы радиоприемных устройств позволяют обеспечить требуемую помехоустойчивость приема сообщений.

Глава 3. Настоящее время характеризуется стремительно ускоряющимся развитием информационных технологий. Очевидно, что разработка эффективных алгоритмов - основа успешного применения новых технологий. Сложность алгоритма и точность результатов являются ключевыми показателями качества. Эти показатели часто сильно зависят от используемых математических инструментов.

Существует множество различных требований, которые могут быть предъявлены к системам функций, используемых при обработке сигналов и цифровых изображений. Однако наиболее важными являются – порядок гладкости, компактность носителя функции (множество $\text{supp } f(x) = \overline{\{x : f(x) \neq 0\}}$ называется носителем функции $f(x)$) и обладает хорошими свойствами аппроксимации. Первое важно для случая обработки цветных изображений. Кроме того, если использовать систему функций с локальным носителем, то можно уменьшить сложность численного алгоритма и требования к памяти. Наконец, точность представления данных и корректность результатов в основном зависят от свойств аппроксимации. Из этого следует, что сочетание вышеперечисленных характеристик необходимо для создания эффективных алгоритмов обработки больших массивов данных.

В диссертации построена система обобщенных вейвлетов, обладающая этими свойствами, позволяющая синтезировать аналоговые и цифровые сигналы, а также проводить обработку изображений с использованием механизма контроля потерь качества.

Вейвлеты могут быть построены различными способами. Один из методов – применение решений разностных уравнений (7). Существует базис пространств

$$\text{UP}_n = \left\{ f(x) : f(x) = \sum_k c_k \text{up}\left(x - \frac{k}{2^n}\right) \right\}, \quad (15)$$

который состоит из сдвигов с локальным носителем атомарных функций

$$\text{Fup}_n(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[itx] \left(\frac{\sin(t2^{-n-1})}{t2^{-n-1}} \right)^n F\left(\frac{t}{2^n}\right) dt, \quad (16)$$

где $F(t)$ – преобразование Фурье для $\text{up}(x)$.

В работе построены энергетические спектры аналоговых сигналов (8) и (16) без межсимвольной интерференции (рис.5) и сигналы с межсимвольной интерференцией (рис.6).

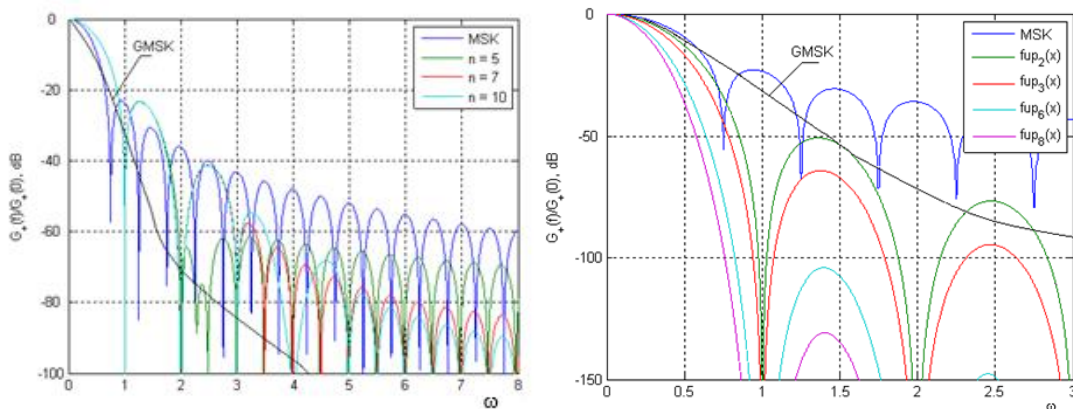


Рисунок 5 – Энергетические спектры случайных последовательностей сигналов с огибающей $a(t) = \text{up}(t)$ длительностью $t \in [0, T]$ а); Энергетические спектры случайных последовательностей сигналов с различными формами огибающей $a(t) = \text{fup}_N(t)$ длительностью $t \in [0, T]$ б).

Введение межсимвольной интерференции наряду со снижением пик-фактора колебаний дает небольшое улучшение скорости спада уровня внеполосных излучений. Например, для функции $\text{fup}_3(t)$ при отстройке $3/2T$ уровень первого бокового лепестка равен 70 дБ, что на 10 дБ меньше, чем в случае отсутствия интерференции.

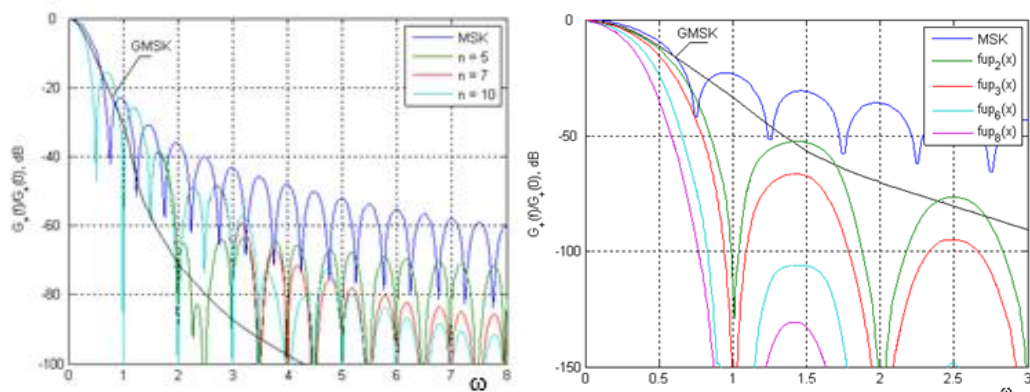


Рисунок 6 – Энергетические спектры случайных последовательностей сигналов с огибающей $a(t) = \text{up}(t)$ длительностью $t \in [0, T]$ с МСИ а); $a(t) = \text{fup}_N(t)$ длительностью $t \in [0, T]$ с МСИ б).

На рис. 7, 8 представлены энергетические спектры цифровых сигналов на основе атомарных функций Кравченко-Рвачева разной длительности, как с интерференцией (рис.8), так и без нее (рис.7).

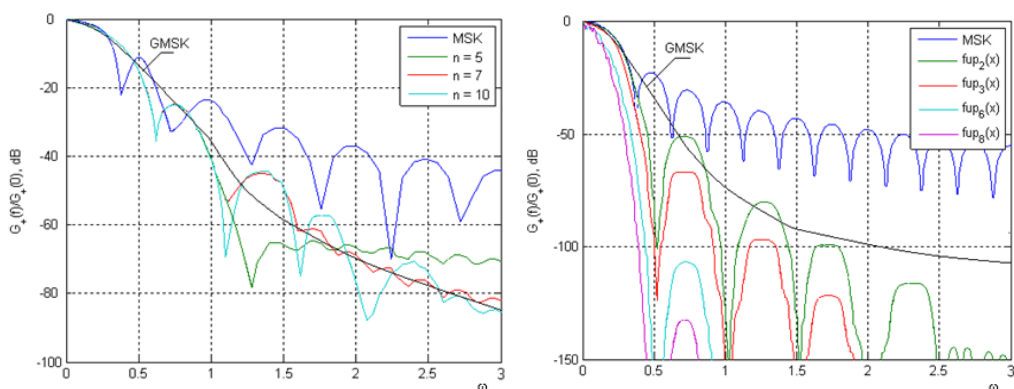


Рисунок 7 – Энергетический спектр случайной последовательности квадратурных компонент сигналов при форме $a(t) = \text{up}(t)$ длительностью $t \in [-T, T]$ а); при форме $a(t) = \text{fup}_N(t)$ длительностью $t \in [-T, T]$ для $N = 2, 3, 6$ и 8.

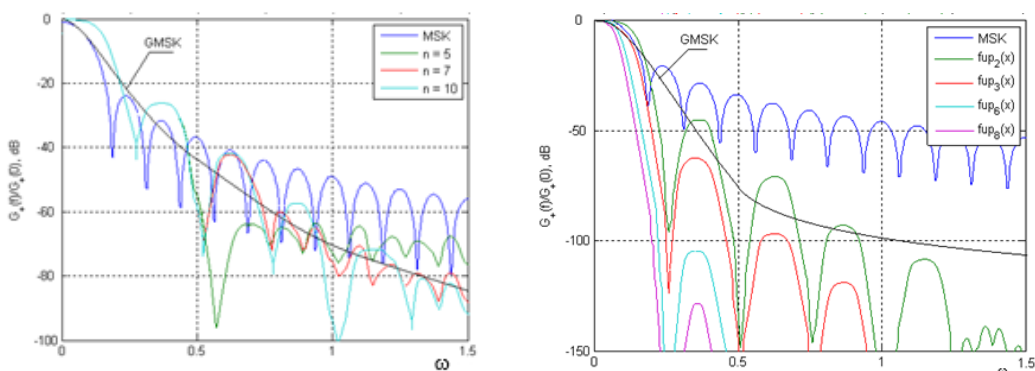


Рисунок 8 – Энергетический спектр случайной последовательности квадратурных компонент сигналов при форме $a(t) = \text{up}(t)$ длительностью $t \in [-2T, 2T]$ для $n = 5, 7$ и 10 при

наличии МСИ а); при форме $a(t) = \text{fup}_N(t)$ длительностью $t \in [-2T, 2T]$ для $N = 2, 3, 6$ и 8 при наличии МСИ б).

Пространства сдвигов функций (15), (16) асимптотически экстремальны для аппроксимации некоторых классов гладких функций. Таким образом, обобщенные Фур-функции обладают основными преимуществами атомарных функций $\text{ur}(x)$, $\text{Fup}_n(x)$. Более того, выбирая материнскую функцию (рис. 9), мы можем получить удобный инструмент анализа сигналов и изображений с требуемыми свойствами.

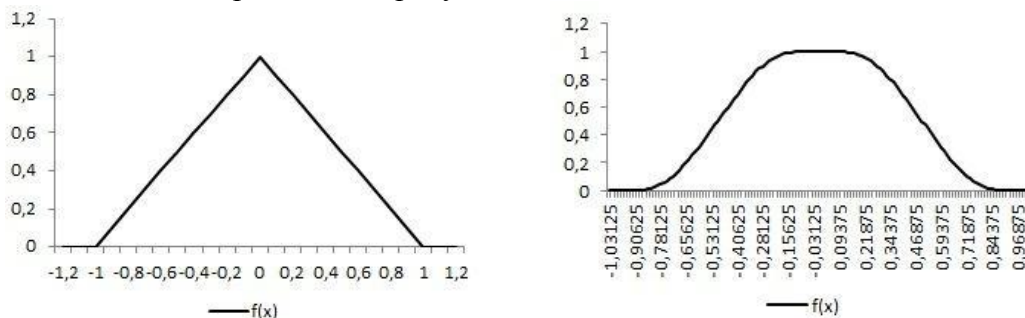


Рисунок 9 – Примеры материнской функции $f(x)$

В работе построена методика формирования и обработки сигналов в пространстве обобщенных атомарных вейвлетов $\{w_k(x)\}$ на основе функций $\{v_k(x)\}_{k=0}^{\infty}$. Для этого рассмотрена функция

$$w_k(x) = \sum_{j=1}^5 c_{k,j} v_{k-1}\left(x - \frac{2^k j}{N}\right) \quad (17)$$

такая, что $w(x)$ ортогональна пространству L_k . Таким образом, коэффициенты $\{c_j\}_{j=1}^5$ удовлетворяют системе линейных алгебраических уравнений

$$A \cdot c = 0, \quad (18)$$

где $A = (a_{ij})_{i=0, \dots, 3, j=1, \dots, 5}$, $a_{ij} = \int_{-\infty}^{\infty} v_k\left(x - \frac{2^{k+1}i}{N}\right) v_{k-1}\left(x - \frac{2^k i}{N}\right) dx$; $c^T = (c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4 \ c_5)$.

Общее решение системы (18) представляет собой выражение:

$$w_k(x) = -b_{k-1} v_{k-1}\left(x - \frac{2^k}{N}\right) + (a_{k-1} + 2b_{k-1}) v_{k-1}\left(x - \frac{2^k \cdot 2}{N}\right) - 2(a_{k-1} + b_{k-1}) v_{k-1}\left(x - \frac{2^k \cdot 3}{N}\right) + (a_{k-1} + 2b_{k-1}) v_{k-1}\left(x - \frac{2^k \cdot 4}{N}\right) - b_{k-1} v_{k-1}\left(x - \frac{2^k \cdot 5}{N}\right), \quad (19)$$

которое является обобщенным атомарным вейвлетом.

В терминах поперечника А.Н. Колмогорова, пространства линейных комбинаций обобщенных Фур-функций обладают лучшими аппроксимационными свойствами, по сравнению с тригонометрическими полиномами. Таким образом, выбирая такие параметры, как N , t и материнскую функцию $f(x)$, мы можем построить обобщенные атомарные вейвлеты с требуемыми свойствами.

Предположим, что некоторые данные представлены функцией $d(x)$. Обозначим через $p(x)$ ортогональную проекцию этой функции на линейное пространство L_0 и $r(x) = d(x) - p(x)$. В этой системе обозначений $f(x) = p(x) + r(x)$:

$$p(x) = \sum_{k=1}^n \sum_{j \in I_k(d)} \omega_{kj} w_k\left(x - \frac{2^{k+1}j}{N}\right) + \sum_{j \in J(d)} v_j v_n\left(x - \frac{2^{k+1}j}{N}\right) \quad (20)$$

где $I_k(d)$ и $J(d)$ являются подмножествами целых чисел. При этом $p(x)$ является обобщенным атомарным вейвлет-разложением функции $d(x)$. Такое разложение будем использовать для обработки изображений.

Пусть $p_k(x) = \sum_{j \in I_k(d)} \omega_{kj} w_k \left(x - \frac{2^{k+1}j}{N} \right)$ для $k=1, 2, \dots, n$ и $q(x) = \sum_{j \in J(d)} v_j v_n \left(x - \frac{2^{k+1}j}{N} \right)$. Тогда $p(x) = p_1(x) + \dots + p_n(x) + q(x)$. Каждая функция $p_k(x)$ соответствует определенным частотам, а $q(x)$ описывает главное значение функции данных $d(x)$.

Функция $r(x)$ – это член с остатком, который представляет собой ошибку аппроксимации функции $d(x)$ ее обобщенным атомарным вейвлет-разложением. Отсюда следует, что такая ошибка зависит от аппроксимационных свойств пространства L_0 и материнской функции.

Верхняя оценка наилучшего приближения $\max_{i \in \mathbb{R}} |x_i - y_i| \leq \frac{\varepsilon_{n+1} N}{2^{n+1}}$ может быть использована в общем случае для обеспечения точности результатов обработки сигналов и изображений.

На рис. 10, 11 показаны результаты аппроксимации функции данных $d(x)$ обобщенным вейвлет-преобразованием.

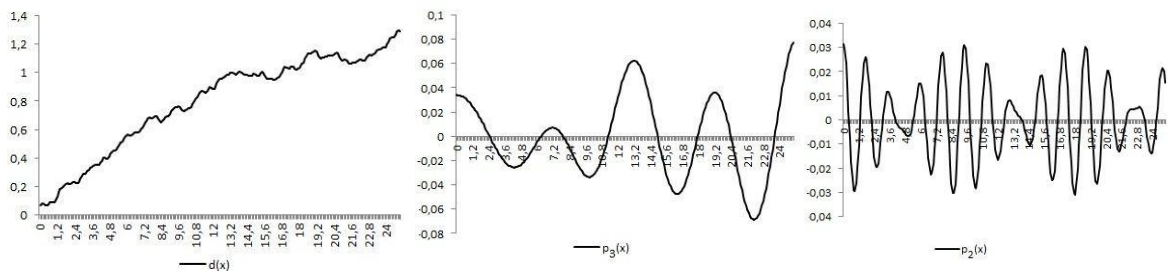


Рисунок 10 – График функции данных $d(x)$, функции $p_3(x)$, соответствующий низкочастотным частотам и $p_2(x)$ соответствующий частотам среднего уровня

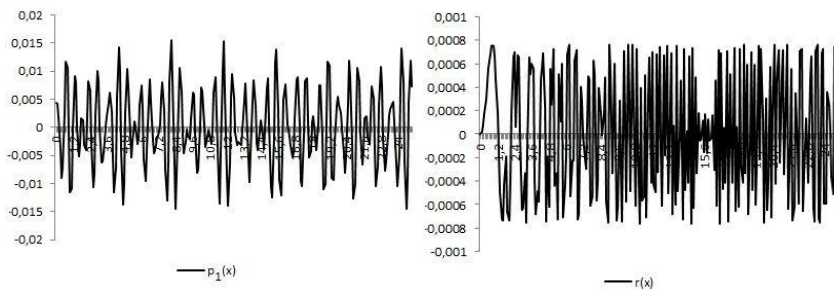


Рисунок 11 – График $p_1(x)$, соответствующий частотам высокого уровня, остаточного члена $r(x)$, который описывает ошибку аппроксимации функции данных $d(x)$ ее обобщенным атомарным вейвлет-разложением.

Методика оценки механизма качества изображения основана на полученных верхних оценках коэффициентов обобщенных атомарных вейвлет-разложений. Применение методики, основанной на вычислении поперечника А.Н. Колмогорова, позволяет получить аналитические оценки для управления потерями качества, возникающими при использовании алгоритма дискретного атомарного сжатия цифровых изображений.

Глава 4. Рассмотрено применение обобщенных атомарных вейвлетов для обработки цифровых изображений с управляемым качеством оценки потерь. Эффективность алгоритма сжатия данных с потерей качества зависит от особенностей применяемых математических инструментов.

Известно, что пространства линейных комбинаций функций Кравченко-Рвачева асимптотически экстремальны для аппроксимации периодически дифференцируемых функций в норме пространства C . Эти пространства экстремальны для аппроксимации периодических дифференцируемых функций в L_2 -норме. С точки зрения теории аппроксимации это означает, что атомарные функции Кравченко-Рвачева являются таким же совершенным математическим инструментом, как тригонометрические полиномы.

Одним из главных недостатков тригонометрических функций является некомпактность их носителя. Поэтому системы функций с компактным носителем широко используются в различных приложениях, в частности, в обработке и сжатии цифровых изображений. Идея применения функций Кравченко-Рвачева для сжатия изображений с потерями основана на их свойствах. В диссертационной работе рассмотрено применение дискретного атомарного преобразования, которое основано на атомарной функции (8), для сжатия полноцветных цифровых изображений с потерями.

Рассмотрим некоторое полноцветное 24-битное растровое изображение, представленное RGB-матрицей. Рассмотрим процесс его сжатия с помощью дискретного атомарного преобразования (ДАП). На первом этапе этого алгоритма используется преобразование из цветового пространства RGB в цветовое пространство YCrCb. После этого шага мы получим матрицу Y компонентов яркости и две матрицы Cr и Cb цветоразностных компонентов. На шаге 2 мы применяем ДАП-процедуру, основанную на

пространстве $\text{wp}_{s,n} = \left\{ \varphi : \varphi(x) = \sum_k \text{wp}_s \left(x - \frac{k}{(2s)^n} \right) \right\}$ к каждой из этих матриц. Мы получаем три

матрицы $\Omega_Y, \Omega_{Cr}, \Omega_{Cb}$ ДАП-коэффициентов. После этого элементы этих матриц квантуются и округляются до целых чисел. Человеческий глаз более чувствителен к потерям качества в яркости, чем в цветности. Следовательно, большие коэффициенты квантования могут быть использованы для элементов матриц Ω_{Cr} и Ω_{Cb} . Наконец, квантованные коэффициенты кодируются с помощью алгоритмов сжатия без потерь. Для этой цели подходят кодирование по длине строки и статистические методы сжатия данных. Для получения декодированного изображения мы выполняем обратные действия.

Этот алгоритм является дискретным атомарным сжатием (ДАС) цифровых изображений. Предполагается, что сочетание высокого качества и высокой степени сжатия достигается благодаря удобным свойствам ДАП. ДАС - это алгоритм сжатия с потерями. Основные потери качества происходят на этапе квантования. Варьируя коэффициенты квантования, можно получить результаты разного размера и качества. В работе проанализирована эффективность сжатия с потерями.

Основным показателем эффективности алгоритма сжатия данных является коэффициент сжатия $K_{CR} = \frac{\text{размер исходного изображения}}{\text{размер сжатого изображения}}$. Очевидно, что большее значение

K_{CR} означает большую экономию памяти.

Для алгоритмов сжатия с потерями еще одним важным показателем является мера потери качества. Существует множество числовых критериев для оценки потери качества, но ни один из них не является надежным. Человеческий глаз - лучший критерий. Собственно, в этом и заключается одна из проблем цифровой обработки изображений.

В данной работе использованы следующие критерии:

1. Равномерная метрика (U-метрика), основанная на использовании понятия поперечника А.Н. Колмогорова

$$d(X, Y) = \max_{i,j} |x_{ij} - y_{ij}|. \quad (21)$$

Высокая зависимость от локальных изменений является ключевой особенностью этой меры.

2. Среднеквадратичная метрика (RMS-метрика)

$$d(X, Y) = \sqrt{\frac{1}{nm} \sum_{i,j=1}^{n,m} (x_{ij} - y_{ij})^2}. \quad (22)$$

Эта мера характеризует усредненные изменения всех пикселей. Низкая зависимость от локальных изменений и высокая зависимость от глобальных изменений – ключевые особенности этой меры.

Отметим, что более высокое значение U-метрики и RMS-метрики означает худшее качество результата.

3. Отношение пикового сигнала к шуму (PSNR-метрика)

$$d(X, Y) = 10 \ln \frac{(255)^2 nm}{\sum_{i,j=1}^{n,m} (x_{ij} - y_{ij})^2}. \quad (23)$$

Он отличается от RMS только другой шкалой. Более высокое значение этой меры означает лучшее качество результата. В (21) - (23) X и Y – это матрицы изображений до и после обработки.

Для случая матриц RGB мы используем

$$d(X, Y) = \max_{i,j} \{|r_x[i][j] - r_y[i][j]|, |g_x[i][j] - g_y[i][j]|, |b_x[i][j] - b_y[i][j]|\} \quad (24)$$

$$d(X, Y) = \sqrt{\frac{S}{3nm}} \quad (25)$$

и

$$d(X, Y) = 10 \ln \frac{(255)^2 \cdot 3nm}{S}, \quad (26)$$

где

$$S = \sum_{i,j=1}^{n,m} \left((r_x[i][j] - r_y[i][j])^2 + (g_x[i][j] - g_y[i][j])^2 + (b_x[i][j] - b_y[i][j])^2 \right),$$

вместо (21) - (23) соответственно.

Алгоритм сжатия обычно основывается на том, насколько эффективным и подходящим является этот метод. Для случая сжатия одного изображения естественным является поиск оптимальных настроек компрессора. Оптимальность означает наименьший размер при заданном уровне качества или наилучшее качество при заданном предельном размере. Процедура поиска оптимальных настроек может быть довольно сложной.

В случае сжатия большого количества изображений поиск оптимальных параметров для каждого из них может оказаться слишком дорогим. Компромиссным решением этой проблемы является выбор такого режима работы компрессора, который является подходящим для группы тестовых изображений. В этом случае сравнение эффективности различных алгоритмов сжатия сводится к сравнению результатов их применения с некоторыми фиксированными настройками. В таблице 1 представлены результаты сжатия классических тестовых изображений.

Из таблицы 1 следует, что ЦАП "Оптимальный" экономит больше памяти, чем "JPEG 100" (фактически, размер ДАС-файла меньше размера соответствующего JPEG-файла в среднем на 30,59 процента); "JPEG 100" дает большую локальную потерю качества, чем ЦАП "Оптимальный"; ЦАП "Оптимальный" и "JPEG 100" имеют почти одинаковые усредненные потери качества.

Базовые вейвлет функции характеризуются такими основными свойствами как ортогональность, симметрия и компактность носителя. Эти свойства играют определенную роль при выборе базовой вейвлет функции для анализа сигнала. Так, ортогональность вейвлет функций обеспечивает эффективное разложение сигнала в неперекрывающихся полосах частот и высокую вычислительную эффективность при реализации дискретного вейвлет преобразования.

Таблица 1 – Результаты сжатия классических тестовых изображений с помощью ДАП "Оптимальный" и "JPEG 100"

№	исходное изображение		ДАП "Оптимальный"					"JPEG100"				
	Имя	Размер (kB)	Размер (kB)	CR	потеря качества			Размер (kB)	CR	потеря качества		
					U	RMS	PSNR			U	RMS	PSNR
1	baboon	769	331	2,324	27	5,315	33,621	334	2,302	73	8,75	29,291
2	Barbara	1216	282	4,312	23	3,065	38,402	375	3,243	36	2,694	39,522
3	boats	1330	229	5,808	16	2,313	40,848	344	3,866	31	1,952	42,32
4	cablecar	721	163	4,423	25	2,831	39,093	199	3,623	57	3,48	37,298
5	cornfield	721	193	3,736	24	3,1	38,302	221	3,262	55	3,878	36,358
6	f16	769	151	5,093	21	2,671	39,596	206	3,733	93	4,123	35,827
7	flowers	531	172	3,087	26	3,568	37,082	188	2,825	90	5,087	34,002

Симметричность придает вейвлет функциям свойства линейного фазового фильтра, что является важным при осуществлении операций фильтрации сигналов, так как ее отсутствие может привести к искажению фазы. Компактность носителя обеспечивает отличие от нуля значений вейвлет функции на конечном интервале, что позволяет эффективно представлять сигналы, имеющие локализованные особенности.

Однако, эти основные свойства предоставляют лишь математическое описание базовых вейвлет функций, которое не позволяет получить явных рекомендаций по их практическому применению для анализа и обработки определенных типов сигналов. Учитывая это, целесообразным является формирование определенной библиотеки базовых функций, оптимальный выбор которых будет определяться по некоторому критерию для определенных типов сигналов. Поэтому, с целью поиска оптимальных вейвлет функций, в технике обработки сигналов были разработаны подходы, в основе которых лежат определенные критерии.

Значительную роль при анализе и обработке сигналов на основе вейвлет преобразования имеет спектральное распределение энергии вейвлет коэффициентов. Количественной мерой такого распределения энергии является энтропия Шеннона:

$$En = - \sum_m p_m \cdot \log p_m \quad (27)$$

Энтропия вейвлет коэффициентов является мерой упорядоченности/неупорядоченности сигнала, что позволяет получить полезную информацию об основном динамическом процессе, связанном с сигналом. Блок-схема алгоритма расчета значений для данного критерия представлена на рис. 11 а.

Вейвлет преобразование определяет сходство между анализируемым сигналом и масштабированной версией базовой вейвлет функции. Для определения степени сходства обоих сигналов используется коэффициент взаимной корреляции как критерий выбора базовой вейвлет функции

$$K_{COR} = \frac{COV_{S_\psi}}{\sigma_S \sigma_\psi} \quad (28)$$

где K_{COR} – коэффициент корреляции между анализируемым сигналом и базовой вейвлет функцией; COV_{S_ψ} – взаимная ковариация последовательностей; σ_S и σ_ψ – стандартные отклонения последовательностей.

Блок-схема алгоритма расчета значений по критерию оценки коэффициента корреляции для каждой вейвлет функции представлена на рис.11, б.

Общая энтропия двух дискретных источников информации, а именно сигнала и его вейвлет коэффициентов, $H(C|S)$, позволяет определить общее информационное содержание этих последовательностей:

$$H(S, C) = - \sum_{s \in S} \sum_{c \in C} p(s, c) \cdot \ln p(s, c) \quad (29)$$

где $p(s, c)$ – общая вероятность распределения сигнала и его вейвлет коэффициентов.

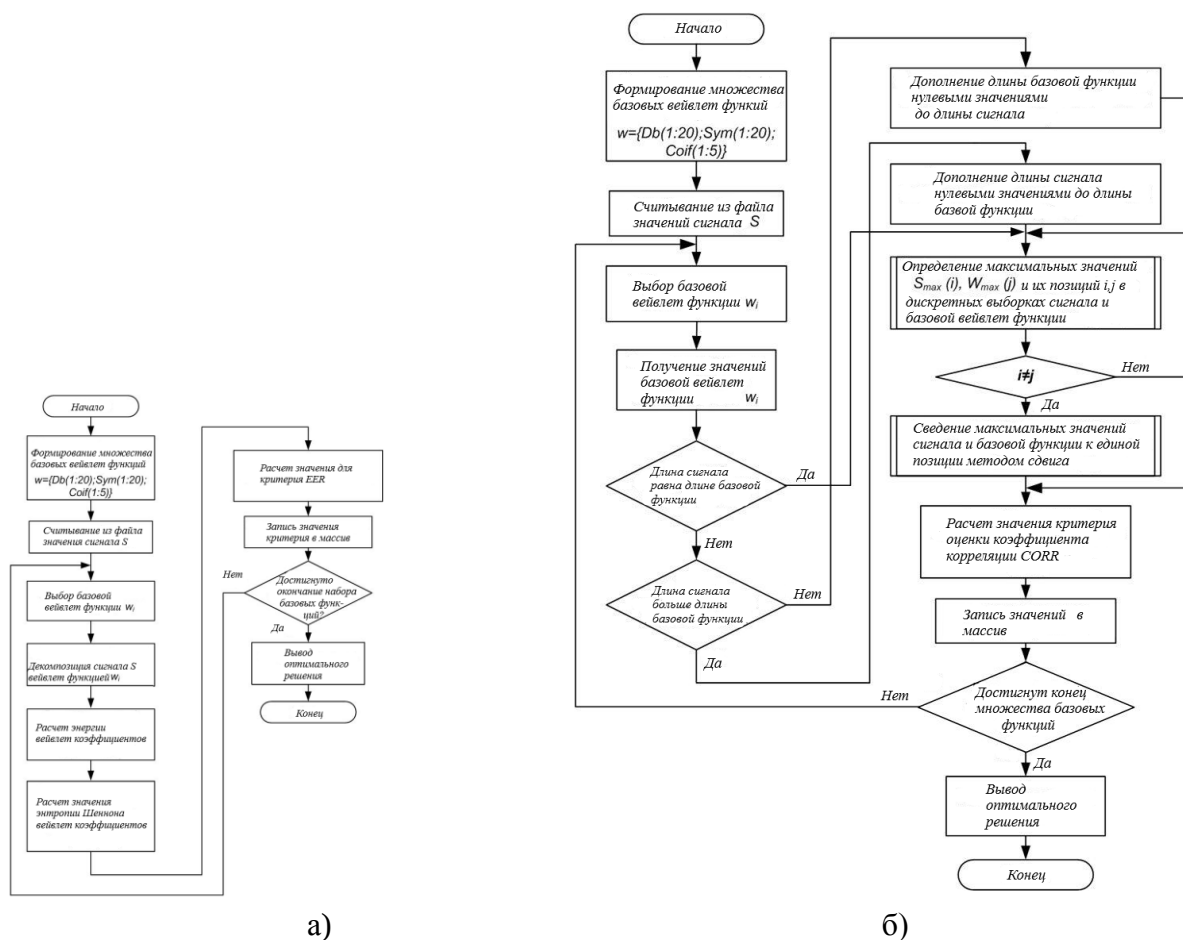


Рисунок 11 – Блок-схема алгоритма расчета значений для критерия отношения энергии к мощности Шеннона а); по критерию оценки коэффициента корреляции б).

Взаимная информация $I(s, c)$ определяется как среднее количество информации, которую содержат вейвлет коэффициенты о сигнале:

$$I(S, C) = - \sum_{s \in S} \sum_{c \in C} p(s, c) \ln \frac{p(s, c)}{p(s) p(c)} \quad (30)$$

где $p(s, c)$ – общая вероятность распределения сигнала и его вейвлет коэффициентов, $p(s)$ и $p(c)$ – вероятности распределения сигнала и вейвлет коэффициентов соответственно.

Еще одной характеристикой в теории информации является относительная энтропия или дивергенция Кульбака-Лейблера, которая является мерой расстояния между двумя распределениями вероятностей, определенными в одном и том же алфавите. Дивергенция Кульбака – Лейблера является мерой того, насколько одно распределение вероятностей отличается от второго – эталонного распределения вероятностей.

В противоположность взаимной информации, которая является мерой удаленности двух переменных в пределах одного распределения, относительная энтропия определяет расстояние между распределениями.

$$D(S \parallel C) = \sum_{i \in S, C} p(S_i) \ln \frac{p(S_i)}{p(C_i)} \quad (31)$$

В случае, когда необходимо установить сходство распределений, то относительная энтропия позволяет определить такое сходство с достаточно большой точностью. Если $p(s) = p(c)$, то $D(S \parallel C) = 0$.

В работе рассмотрен универсальный индекс качества в качестве оценки эффективности обработанного сигнала, а именно оценивание сигнала по яркости, контрастности и структурным искажениям:

$$Q = \frac{4\bar{S}\bar{\tilde{S}}\sigma_{\tilde{S}\tilde{S}}}{(\bar{S}^2 + \bar{\tilde{S}}^2)(\sigma_S^2 + \sigma_{\tilde{S}}^2)} \quad (32)$$

где S - выходной сигнал; $\tilde{S}$ - реконструированный сигнал; $\bar{S}$ - среднее значение выходного сигнала; $\bar{\tilde{S}}$ - среднее значение реконструированного сигнала; σ_S - дисперсия исходного сигнала; $\sigma_{\tilde{S}}$ - дисперсия реконструированного сигнала; $\sigma_{\tilde{S}\tilde{S}}$ - коэффициент взаимной корреляции между исходным сигналом и обработанным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В диссертации предложена методика численного решения задачи нахождения форм спектрально-эффективных сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией, в том числе и сигналов с межсимвольной интерференцией, при использовании атомарных функций и при условии вычисления минимального числа членов ряда, при котором обеспечивается требуемая точность построения огибающей сигналов.

Разработаны методы формирования и приема спектрально-эффективных сигналов. Приведено имитационное моделирование методов формирования и алгоритмов приема полученных новых спектрально-эффективных сигналов, имеющих сложные законы изменения амплитуды колебания.

Рассмотрена замена дискретных преобразований, которые базируются на тригонометрических функциях, на соответствующие преобразования, которые строятся с помощью атомарных функций и обобщённых Фур-функций. С этой целью введено дискретное атомарное преобразование. Основным результатом является теоретическое обоснование эффективности обобщенных атомарных функций и обобщённых Фур-функций в обработке данных и сжатии информации.

Получили дальнейшее развитие методы оценки эффективности выбора материнских функций по критерию соотношения энергии вейвлет коэффициентов и энтропии распределения энергии Шеннона, который отличается от известных использованием соотношения нормы энергии коэффициентов аппроксимации к энтропии детальных коэффициентов; по критерию оценки коэффициента взаимной корреляции, который в отличие от существующего использует взаимную корреляцию между анализируемым сигналом и вейвлет коэффициентами; по информационному критерию, который отличается от известных использованием соотношения взаимной информации к относительной энтропии анализируемого сигнала, что позволило сосредоточить энергию сигнала в небольшом количестве значимых коэффициентов, обеспечить необходимую точность аппроксимации и наиболее полное представление сигналов во временно-частотной области. Установлено, что использование метода выбора базовой вейвлет функции на основе информационного критерия позволяет повысить точность реконструкции сигнала на 15-20% по сравнению с использованием методов на основе энергетического и корреляционного критериев.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, включённых в перечень ВАК:

1. Крячко М.А., Крячко А.Ф., Глазнев М.А., Лосев В.К. Оценка показателей качества функционирования автоматизированной системы сбора информации // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 10. С. 205-209.
2. Крячко М.А., Крячко А.Ф., Антонов К.В., Левин Я.Я. Метод повышения спектральной эффективности телекоммуникационных систем на основе аппроксимации огибающей сигналов атомарными функциями // Радиотехника. 2017. № 5. С. 27-31.
3. Крячко М.А., Крячко А.Ф., Дворников С.В. Анализ распределения амплитудных искажений поля на раскрые антенны при краевых эффектах // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2020. № 4. С. 63-68.
4. Крячко М.А., Крячко А.Ф., Марков Е.В., Аюков Б.А., Дворников С.В. Анализ спектральной эффективности сигналов многоканальных РТС // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2021. № 1. С. 99-107.
5. Крячко М.А. Предложения по повышению спектральной эффективности сигналов систем подвижной радиосвязи // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2022. № 2. С. 71-78.
6. Крячко М.А., Крячко А.Ф., Дворников С.В. Анализ возможности синтеза спектрально-эффективных сигналов на основе атомарных функций // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2022. № 1. С. 94-98.
7. Крячко М.А. Обобщенные атомарные вейвлеты в задачах обработки изображений // Информация и космос. 2024. № 2(4). – с.19-24.
8. Крячко М.А. Моделирование спектрально-эффективных сигналов на основе атомарных функций при воздействии помех // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2024. № 4, с. 3-14.
9. Крячко М.А., Медзигов А.В., Морозов И.Е. Оценка влияния искажений цифровой модели объекта на результат моделирования изображения радара с синтезированной апертурой // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2024. Т.22, № 4, с.35-44. DOI: 10.18127/j20700814-202404-04.
10. Крячко М.А., Крячко А.Ф., Медзигов А.В. Алгоритмы обработки данных, формируемых оптическим и радиолокационным оборудованием космических аппаратов спутниковых систем дистанционного зондирования земли // Успехи современной радиоэлектроники. 2024, т.78, № 8, с. 44-55. DOI: 10.18127/j20700784-202408-08.

Статьи, опубликованные в других изданиях и материалах конференций:

1. Крячко М.А., Макаров С.Б., Смирнов С.Н. Применение спектрально-эффективных сигналов на основе атомарных функций в задачах электромагнитной совместимости РЭС // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2008. № 2 (55). С. 52-56.
2. М. А. Крячко, С. Б. Макаров. Спектрально-эффективные сигналы на основе финитных сплайнов. // 9-й Международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. Сб. трудов. СПб., ЛЭТИ, 2011, 184-187.
3. Kryachko M.A., Kryachko A.F., Makarov S.B., Malyugin V.I., Silnikov M.V., Li Y. Generation and reception of spectral efficient signals based on finite splines // Lecture Notes in Computer Science. 2014. T. 8638 LNCS. Springer. P. 481-487.
4. Kryachko M.A., Kryachko A.F., Antonov K.V., Levin Y.Y., Tyurin I.E. Investigation of questions of non-harmonic signal scattering on impedance structures // Lecture Notes in Computer Science. 2016. T. 9870 LNCS. Springer. P. 595-603.
5. Крячко М.А., Крячко А.Ф., Бестугин А.Р. Методы повышения спектральной эффективности телекоммуникационных систем на основе аппроксимации огибающей

сигналов атомарными функциями // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. 2014. Т. 57. № 11 (629). С. 38-50.

Переведено и издано: Kryachko M.A., Kryachko A.F., Bestugin A.R. Methods of raising telecommunication system effectiveness by using atomic function envelope approximation // Radioelectronics and Communications Systems. 2014. Т. 57. № 11. С. 506-515.

6. Kryachko M.A., Kryachko A.F., Antonov K.V., Levin Y.Y., Losev V.K. The especially scattering of ultra-wideband pulse wedge-shaped field // Bulletin of the UNESCO department "Distance education in engineering" of the SUAI. S-Pb, 2016. P. 7-11.

7. Крячко М.А. Выбор оптимальных материнских функций на основе максимальной эффективности результатов обработки сигналов // XXVII Международная научная конференция. Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. Сб. статей. ч. 2. 2024. – СПб. : Изд-во ГУАП. С. 81-85.

8. Крячко М.А. Метод нечеткой многокритериальной оптимизации выбора базовых вейвлет-функций обработки изображений // XXVII Международная научная конференция. Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. Сб. статей. ч. 2. 2024. – СПб. : Изд-во ГУАП. С. 85-90.

Патенты на изобретения и полезные модели.

1. Крячко М.А., Смирнов Д.Ф., Макаров С.Б., Крячко А.Ф., Минаев Д.В. Супергетеродинный приемник. RU 2379835 C1, 20.01.2010. Заявка № 2008116067/09 от 23.04.2008.

2. Крячко М.А., Смирнов Д.Ф., Макаров С.Б., Крячко А.Ф., Минаев Д.В. Супергетеродинный приемник. RU 2379836 C1, 20.01.2010. Заявка № 2008116066/09 от 23.04.2008.

3. Крячко М.А., Смирнов Д.Ф., Макаров С.Б., Крячко А.Ф., Минаев Д.В. Супергетеродинный приемник. RU 2379837 C1, 20.01.2010. Заявка № 2008116109/09 от 23.04.2008.

4. Крячко М.А., Крячко А.Ф., Макаров С.Б., Макаров А.Б., Волвенко С.В., Сирота С.В. Мультисенсорная радиосистема передачи данных (полезная модель). RU 83886 U1, 20.06.2009. Заявка № 2008123581/22 от 02.06.2008.

5. Крячко М.А., Смирнов Д.Ф., Крячко А.Ф., Минаев Д.В. Устройство выделения периодических импульсов. RU 2317639 C1, 20.02.2008. Заявка № 2006144497/09 от 13.12.2006.

6. Крячко М.А., Смирнов Д.Ф., Крячко А.Ф., Минаев В.Б., Минаев Д.В. Селектор импульсной последовательности. RU 2317640 C1, 20.02.2008. Заявка № 2006144514/09 от 13.12.2006.

7. Крячко М.А., Смирнов Д.Ф., Макаров С.Б., Крячко А.Ф., Минаев В.Б., Минаев Д.В., Тищенко Г.А. Селектор импульсов. RU 2325756 C1, 27.05.2008. Заявка № 2006146733/09 от 26.12.2006.

8. Крячко М.А., Крячко А.Ф., Макаров С.Б. Устройство формирования спектрально-эффективных сигналов. RU 2468525 C1, 27.11.2012. Заявка № 2011140924/08 от 07.10.2011.

9. Крячко М.А., Крячко А.Ф., Макаров С.Б. Цифровое устройство формирования спектрально-эффективных сигналов. RU 2498515 C1, 10.11.2013. Заявка № 2012111935/07 от 27.03.2012.

10. Крячко М.А., Антохина Ю.А., Крячко А.Ф., Дворников С.В., Гордиенко А.Н., Дворников С.С., Оводенко А.А. Способ формирования фазоманипулированных сигналов посредством последовательной конкатенации радиоимпульсов. RU 2731881 C1, 08.09.2020. Заявка № 2020106603 от 11.02.2020.

11. Крячко М.А., Дворников С.С., Крячко А.Ф., Погорелов А.А., Дворников С.В. Устройство формирования спектрально-эффективных сигналов. RU 227 329 U1, 16.07.2024, Бюл. № 20, Заявка: 2024107487 от 22.03.2024.

12. Крячко М.А., Дворников С.С., Крячко А.Ф., Погорелов А.А., Дворников С.В., Лаута О.Л. Устройство приема и обработки сигналов с неортогональным частотным разделением каналов. RU 229 638 U1, 17.10.2024 Бюл. № 29, Заявка: 2024116500, 17.06.2024.

Свидетельства о регистрации программ.

1. Крячко М.А., Крячко А.Ф., Невейкин М.Е., Ковалев А.С. Программа автоматизированного сбора экспериментальных данных и расчета диаграмм направленности широкополосных зондов с визуализацией данных. Свид. о регистрации программы для ЭВМ RU 2015611979, 10.02.2015. Заявка № 2014661545 от 14.11.2014.
2. Крячко М.А., Крячко А.Ф., Невейкин М.Е. Программа синтеза измерительного зонда системы "антенна-объект носитель" на основе сферического сканирования ближнего поля и верификации результатов синтеза. Свид. о регистрации программы для ЭВМ RU 2015613007, 27.02.2015. Заявка № 2014664179 от 29.12.2014.
3. Крячко М.А., Крячко А.Ф., Невейкин М.Е., Левин Я.Я. Программа расчета энергетического потенциала радиолинии «земля-борт» при полигонных испытаниях. Свид. о регистрации программы для ЭВМ RU 2021668157, 10.11.2021. Заявка № 2021667673 от 10.11.2021.
4. Крячко М.А., Крячко А.Ф., Медзигов А.В., Морозов И.Е. Формирование файла метаданных спутниковых систем дистанционного зондирования земли. Свид. о регистрации программы для ЭВМ RU 2025618953, 11.04.2025. Заявка № 2025618065 от 11.04.2025.

Отчеты о НИР

1. Разработка и исследование методов и алгоритмов формирования на основе собственных функций субполосных ядер оптимальных канальных сигналов для систем передачи информации с частотным уплотнением: отчет о НИР (промежуточ.) / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ); рук. С. Б. Макаров; Шифр 2011-1.4-514-020-002. – СПб., 2012. – 72 с.
2. Разработка единого виртуального электронного паспорта КРН «Союз-2» по гос. контракту № 9318187309531010128000872/01-14 от 21.04.2014 в рамках ОКР «Русь»: СЧ ОКР / АО «Научно-исследовательский и опытно-экспериментальный центр интеллектуальных технологий «ПЕТРОКОМЕТА»; рук. М.Ю. Охтилев. – СПб., 2014.
3. Разработка и исследование методов обработки сигналов и изображений на основе обобщенных вейлетов на основе атомарных функций: отчет о НИР / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП); рук. Я. Я. Левин. – ГУАП-Цивилизация., 2022. – 96 с.
4. Рассеяние электромагнитных волн воздушно-космическими объектами. Грант 15-07-00205А Российского фонда фундаментальных исследований. 2017, СПб.: ГУАП, 257 с.
5. Разработка акустооптических устройств модуляции и дефлекции квазидифракционных световых пучков в видимом и ближнем ИК диапазоне на основе новых перспективных кристаллов. № Госрегистрации 124041100054-2 / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП); рук. Шакин О.В., 2024. – 269 с.
6. Разработка предложений по применению на объектах уголовно-исполнительной системы Российской Федерации беспилотных воздушных судов и аппаратов / Федеральное казенное учреждение «НИИТ ФСИН России»; рук. Зыбин Д.Г. – Тверь; шифр «Применение-БВС-25». – 2024, 391 с.