

ГУАП ОД	Документ зарегистрирован
	«28» 11 2025г.
	Вх. № 81-257/25

Экз № 1УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ФГУП «ГосНИИПП»

кандидат технических наук

С.А. Егоров
10 ноября 2025

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Крячко Михаила Александровича «Методика формирования сигналов и обработки изображений на основе функций Кравченко-Рвачева и обобщенных атомарных вейвлетов в телекоммуникационных системах», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15. «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» (отрасль наук – технические)

Актуальность темы диссертации. Актуальным направлением развития современных телекоммуникационных и компьютерных систем является анализ, обработка, хранение и передача информации, представленной с помощью различных типов сигналов. Однако для анализа, синтеза и обработки сигналов, частота которых изменяется во времени, обычный спектр является преимущественно малоинформативным. Учитывая это, широкое распространение получили методы время-частотного представления сигналов, самые распространенные из которых используют вейвлет преобразование.

Алгоритмы дискретного вейвлет преобразования нашли широкое применение при анализе тонкой структуры сигналов и изображений в компьютеризированных системах диагностирования и контроля параметров процессов и сред, для компрессии и очистки от шума в специализированных компьютерных системах, что особенно актуально в таких областях науки и техники как телекоммуникации, радиотехника, энергетика, связь, геофизика, медицина и др.

Эффективность представления сигналов в маловолновой области, их анализ и обработка существенно зависят от выбора базовых 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. На сегодняшний день процедура выбора базовых (материнских) вейвлет функций недостаточно исследована и в большинстве случаев происходит необоснованно. В подавляющем большинстве, при выборе материнской функции, учитываются такие характеристики, как размер носителя, количество нулевых моментов, а также их гладкость.

Указанные свойства предоставляют лишь математическое описание базовых вейвлет функций, которое не позволяет получить явных рекомендаций по их практическому применению для анализа, синтеза и обработки различных типов сигналов. Поэтому, с целью поиска оптимальных вейвлет функций и построения обобщенных атомарных вейвлетов в современной технике обработки сигналов используются подходы, в основе которых лежат энергетические, корреляционные и информационные критерии.

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. Именно данной теме посвящена диссертационная работа Крячко Михаила Александровича.

Структура и содержание работы. Диссертационная работа объемом 183 страницы состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. По материалам диссертации опубликовано 34 работы и 6 НИР, из них 10 статей, в том числе 3 статьи без соавторов – в изданиях из списка ВАК Минобрнауки России, 8 работ опубликовано в сборниках трудов международных и всероссийских конференциях (2 доклада без соавторов), получено 12 патентов на изобретение и 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Список цитируемой литературы содержит 118 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы и её практическая значимость, сформулированы цели и задачи исследования, проведен анализ и обозначены основные научно-технические проблемы, требующие решения при разработке методов синтеза спектрально-эффективных сигналов и обработки космической телеметрической информации, изображений, в том числе радиоголограмм спутниковых систем дистанционного зондирования земли.

В первой главе представлен обзор методов синтеза спектрально-эффективных сигналов, основанный на применении атомарных функций Кравченко-Рвачева. 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. В главе 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. 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.

Во второй главе рассматриваются принципы построения устройств формирования и приема разработанных спектрально-эффективных сигналов, построенных на основе атомарных функций Кравченко-Рвачева. Рассмотрено противоречие между эффективным использованием частотного ресурса системы передачи и увеличением концентрации энергии спектра случайных последовательностей сигналов в заданной полосе частот.

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.

Приведены аналоговые и цифровые устройства формирования спектрально-эффективных сигналов, обеспечивающие увеличение объемов передаваемой информации в отведенной полосе частот и увеличение быстродействия формирования сигналов. 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.

Разработана программа расчета энергетического потенциала радиолинии «земля-борт», позволяющая обеспечить устойчивую радиосвязь мультисенсорной системы передачи. Разработанные схемы радиоприемных устройств позволяют обеспечить требуемую помехоустойчивость приема сообщений. Представленные в данной главе устройства защищены патентами на изобретение и свидетельствами на государственную регистрацию программ.

В третьей главе представлены результаты анализа требований, предъявляемых в процессе построения алгоритмов обработки информации с учетом показателей качества, которые 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. 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 главе построена система обобщенных вейвлетов, обладающая этими свойствами, позволяющая синтезировать аналоговые и цифровые сигналы, а также проводить обработку изображений с использованием механизма контроля потерь качества. Методика оценки механизма качества обработки 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.

Четвертая глава посвящена применению 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. Пространства линейных комбинаций функций Кравченко-Рвачева асимптотически экстремальны для аппроксимации периодически дифференцируемых функций. 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 главе рассмотрено применение дискретного атомарного

преобразования, которое основано на атомарной функции, для сжатия полноцветных цифровых изображений с потерями.

Для алгоритмов сжатия с потерями важным показателем является мера потери качества. Автором рассмотрены:

- равномерная метрика (U-метрика), основанная на использовании понятия поперечника А.Н. Колмогорова;
- среднеквадратичная метрика (RMS-метрика). Эта мера характеризует усредненные изменения всех пикселей. Низкая зависимость от локальных изменений и высокая зависимость от глобальных изменений – ключевые особенности этой меры.
- отношение пикового сигнала к шуму (PSNR-метрика).

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.

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: энтропия Шеннона, коэффициент взаимной корреляции как критерий выбора базовой вейвлет функции, относительная энтропия или дивергенция Кульбака-Лейблера. В главе рассмотрен универсальный индекс качества в качестве оценки эффективности обработанного сигнала, а именно оценивание сигнала по яркости, контрастности и структурным искажениям. Такая оценка особенно пригодна при обработке маломощных сигналов и сигналов с высоким уровнем шумов. Автором рассмотрены методы оценки эффективности

видеокодеков, основанные на анализе закодированных последовательностей на основе RD-кривых (Rate-Distortion). Отражены результаты разработки и верификации аппаратно-программного комплекса, а также приведен анализ полученных результатов работы.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные при работе над диссертацией.

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности. Тема и содержание диссертации соответствуют областям исследования специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций в части пунктов 2, 3, 15 паспорта специальности и отрасли – технические науки.

Научная новизна и теоретическая значимость результатов исследований заключается в следующем:

1. 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.
2. Разработанная модель спектрально-эффективных сигналов на основе атомарных функций, в отличие от известных, обеспечивает уровень ослабления боковых лепестков не менее 50 дБ при ограниченном числе членов произведения ($n \geq 6$), которое обеспечивает заданное среднеквадратичное отклонение синтезированной функции от истинного значения, полученного путем аналитического решения задачи построения огибающей; начиная с $n = 10$, точность вычисления по сравнению с теоретическими результатами имеет погрешность 10^{-30}
3. Предложено устройство формирования спектрально-эффективных сигналов, которое обеспечивает увеличение объемов передаваемой информации, по отношению к известным на 8-12%, в отведенной полосе частот и увеличение быстродействия, по отношению к известным на 30%, при формировании спектрально-эффективных сигналов, а также повышение степени защиты передаваемой информации
4. 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.

5. 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 значимость работы заключается в расширении применимости методов синтеза спектрально-эффективных сигналов на основе атомарных функций Кравченко-Рвачева и проводить обработку изображений на основе применения обобщенных атомарных вейвлетов с использованием механизма контроля потерь качества.

Практическая значимость. Разработанные математические методы и алгоритмы синтеза позволяет осуществлять количественную оценку эффективности их использования при разработке спектрально-эффективных сигналов на основе атомарных функций Кравченко-Рвачева и обработки изображений на основе обобщенных атомарных вейвлетов.

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в том, что они явились технической основой 12 патентов на изобретение и полезные модели, в которых предложены различные способы формирования помехоустойчивых сигналов на основе атомарных функций и устройства построения модемов приемных устройств телекоммуникационных систем.

Результаты диссертационной работы целесообразно использовать в проектных и научно-исследовательских организациях при создании систем обработки космической телеметрической информации, систем обработки изображений и радиоголограмм спутниковых систем дистанционного зондирования Земли.

Достоверность полученных результатов подтверждена корректным использованием математического аппарата. Результаты математического моделирования, полученные в ходе исследования, подтверждаются их

сопоставлением с существующими теоретическими положениями и ранее полученными результатами, описанными в литературе.

Обоснованность научных положений подтверждается апробацией результатов исследований, изложенных в ряде статей, среди которых 10 относятся к публикациям, входящим в перечень ВАК. Кроме того, выводы, полученные автором, докладывались на ряде отечественных и международных конференциях.

Личный вклад соискателя заключается в разработке методики синтеза спектрально-эффективных сигналов на основе атомарных функций Кравченко-Рвачева, математической модели обработки радиоголограмм с применением обобщенных атомарных вейвлетов с учетом критериев качества, основанных на использовании понятия поперечника А.Н. Колмогорова, а также по критерию соотношения энергии вейвлет коэффициентов и энтропии распределения энергии Шеннона; по критерию оценки коэффициента взаимной корреляции и по информационному критерию.

Замечания по содержанию и оформлению работы:

1. Автор формулирует свои научные положения, выносимые на защиту, как результат, имеющий применение к любым радиосигналам телекоммуникационных систем. Однако в материалах диссертации рассмотрены конкретные радиосигналы. В существующих системах радиосвязи перечень применяемых радиосигналов (видов модуляции) гораздо шире.
2. Работа изобилует глубоким теоретическим анализом методов построения атомарных функций и обобщенных атомарных вейвлетов, однако недостаточно рассмотрены вопросы оценки качества кодеков на основе предложенных атомарных функций с компактным носителем.
3. Работе рассмотрены вопросы дискретного атомарного преобразования при обработке цифровых изображений с потерями, но технические аспекты реализации подобных преобразований выполнены недостаточно полно.

Данные замечания носят дискуссионный характер и не снижают общей значимости диссертационной работы.

Заключение

Автореферат в полной мере отражает основное содержание диссертационной работы. Полученные результаты соответствуют заявленной цели, а решаемые задачи последовательно способствуют ее достижению. Представленные результаты достоверны и обоснованы, обладают практической

и теоретической значимостью, опубликованы в открытой печати и доложены на российских и международных конференциях.

Диссертационная работа соискателя содержит решение научной задачи, имеющей существенное значение для развития телекоммуникационных систем.

Диссертация Крячко Михаила Александровича «Методика формирования сигналов и обработки изображений на основе функций Кравченко-Рвачева и обобщенных атомарных вейвлетов в телекоммуникационных системах» отвечает всем квалификационным требованиям, п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям». Исходя из вышеизложенного, Крячко Михаил Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15. «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» (отрасль наук – технические).

Отзыв ведущей организации заслушан и утвержден на заседании секции № «Д» научно-технического совета ФГУП «ГосНИИПП» (протокол № 61 от 10 ноября 2025 г.).

Начальник 2 центра
кандидат технических наук
старший научный сотрудник



А.П. Чихонадских

Начальник 21 лаборатории
кандидат технических наук



Е.В. Морозов

Научный сотрудник 211 сектора



А.В. Жуков