

*На правах рукописи*

**Мешков Иван Константинович**

**ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ  
ДЛЯ МАЛЫХ СПУТНИКОВ  
НА ОСНОВЕ МУЛЬТИМАСШТАБНЫХ МЕТОДОВ  
РАЗЛОЖЕНИЯ СИГНАЛОВ**

**Специальность 05.12.13 –  
Системы, сети и устройства телекоммуникаций**

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Уфа – 2010**

Работа выполнена на кафедре телекоммуникационных систем  
ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Научный руководитель            д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ТС  
**Султанов Альберт Ханович**

Официальные оппоненты        д-р техн. наук, проф.,  
**Мишин Дмитрий Викторович**  
проректор по заочному  
обучению и качеству Поволжского  
государственного университета  
телекоммуникаций и информатики

д-р техн. наук, с.н.с.,  
**Коровин Валерий Михайлович**  
главный геофизик ОАО «Башнефтегеофизика»

Ведущая организация            Инженерно-технологический центр «СКАНЭКС»,  
г. Москва

Защита диссертации состоится 29 октября 2010 г. в 10 часов  
на заседании диссертационного совета Д-212.288.07 при Уфимском  
государственном авиационном техническом университете по адресу: 450000,  
г. Уфа, ул. К. Маркса, 12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского  
государственного авиационного технического университета.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” сентября 2010 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д-р техн. наук, проф.

С. С. Валеев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Для повышения пропускной способности и эффективного использования полосы пропускания частот телекоммуникационных систем (ТС) необходимо совершенствовать методы и алгоритмы обработки сигналов за счет уменьшения избыточности исходных передаваемых данных, что является перспективным направлением развития ТС. Одним из таких направлений является сжатие данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), передаваемых по спутниковому радиоканалу малых космических аппаратов (КА). Большой интерес к созданию КА, как адекватной замене больших космических аппаратов, проявляет большое количество стран, университетов, коммерческих предприятий и других организаций для решения научных, образовательных и коммерческих задач. Трудности создания систем связи заключается в том, что миниатюрность КА (вес микроспутника до 50 кг) не позволяет установить на нем мощные приемо-передающие устройства и крупногабаритные маневренные антенные системы с большой полосой пропускания. Малая энергетика КА не предполагает возможности передавать мощные сигналы, а малый объем памяти не позволяет хранить большие объемы информации.

Необходимость сжатия на борту КА видеоданных, получаемых в задачах дистанционного зондирования Земли, обусловлена ростом генерируемых современными космическими системами ДЗЗ информационных потоков (до нескольких сотен Мбит/с). Это связано с увеличением как пространственного, так и спектрального разрешения съемочной аппаратуры при сохранении широкой полосы обзора, сравнительно невысокой пропускной способности радиоканалов и ограниченности частотного диапазона при передаче данных на наземные приемные станции. В большинстве современных систем ДЗЗ используется непрерывный режим непосредственной передачи или хранение видеоданных на бортовых записывающих носителях, но как правило это спутники весом несколько тонн, однако применение сжатия на борту существенно повышает эффективность использования полосы пропускания. Специфика бортовой реализации микроспутниковых систем накладывает ограничения на вычислительную сложность применяемых алгоритмов, что приводит к необходимости создания новых эффективных систем сжатия и передачи данных ДЗЗ.

Большой вклад в решение проблем обработки и анализа изображений внесли работы У. К. Прэтта, Л. П. Ярославского, Р. М. Харалик, А. А. Потапов, А. Х. Султанов, В. Х. Багманов. Применительно к задачам дистанционно зондирования Земли из космоса теория и практика сжатия изображений разрабатывались и успешно применялись многими специалистами, в числе которых И. Б. Фоменко, В. А. Сойфер, В. В. Сергеев, Н. И. Глумов, М. А. Чичева, А. В. Чернов, А. А. Потапов, И. М. Книжный, А. В. Сокол, К. Е. Хрекин.

Наиболее актуальными, с точки зрения увеличения пропускной способности ТС, является методы сжатия сигналов, которые основываются на некоторых преобразованиях, целью которых является переход от исходного сигнала к системе обобщенных координат, их селекции по определенному критерию, приводящему к сокращению числа исходных данных и восстановлению сигнала с по-

мощью обратных преобразований, с сохранением аномальных статистических особенностей исходного изображения.

В работе предлагается метод передачи данных ДЗЗ, повышающий надежность спутникового канала связи, основанный на анализе мультимасштабной информативности уровней вейвлет-разложения изображения. Мультимасштабная информативность – энтропийная оценка информационного вклада разных масштабных компонент, возникающих при мультимасштабном разложении данных ДЗЗ, что позволяет организовать передачу данных таким образом, что во временной последовательности процесса передачи тематической информации в первую очередь передается наиболее значимая часть, которая уточняется на последующих этапах передачи.

**Объект исследования.** Цифровые спутниковые телекоммуникационные системы и сети передачи данных ДЗЗ.

**Предмет исследования.** Мультимасштабные методы передачи и сжатия данных ДЗЗ.

**Цель работы.** Разработка методов передачи и сжатия данных ДЗЗ, позволяющих увеличить пропускную способность спутникового радиоканала малых космических аппаратов, на основе мультимасштабных методов разложения сигнала.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие задачи:

1. Исследование зависимости показателя фрактального самоподобия Херста от пространственного разрешения данных ДЗЗ для определения порогов селекции коэффициентов вейвлет-преобразования исходного спутникового сигнала на основе анализа структурных функций.

2. Разработка метода мультимасштабного сжатия данных ДЗЗ на основе фрактальных самоподобных свойств космических изображений, использования квазинепрерывных рекурсивных разверток типа Пеано–Гильберта и вейвлет-преобразований исходного сигнала для передачи по спутниковому радиоканалу малых КА.

3. Разработка информационно-эффективного метода передачи данных ДЗЗ с помощью вейвлет-коэффициентов разложения сигнала по масштабным уровням на основе энтропийного критерия.

4. Разработка алгоритмического и программного обеспечения бортового сжатия и передачи данных ДЗЗ для малого КА на основе мультимасштабных методов.

**Методы исследований.** В работе использованы основные положения теории передачи сигналов, теории фрактальных множеств, вейвлет-преобразований, теории разверток, фильтрации сигналов, случайных процессов, применены методы математического моделирования, в том числе компьютерного.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Метод определения уровней селекции вейвлет-коэффициентов квазинепрерывных разверток космических изображений на основе использования показателя фрактального самоподобия Херста и статистических корреляционных связей различных масштабных уровней вейвлет-преобразования.

2. Метод мультимасштабного сжатия данных ДЗЗ на основе фрактальных самоподобных свойств космических изображений, использования квазине-прерывных рекурсивных разверток типа Пеано–Гильберта и вейвлет-преобразований исходного сигнала.

3. Метод информационно-эффективной передачи вейвлет-коэффициентов мультимасштабных уровней разложения на основе энтропийного критерия.

4. Алгоритмическое и программное обеспечение бортового сжатия и передачи данных ДЗЗ для малого КА на основе мультимасштабных методов.

#### **Научная новизна результатов:**

1. Разработан метод определения пороговых уровней селекции вейвлет-коэффициентов разложения передаваемых данных ДЗЗ, который в отличие от известных методов, основан на самоподобном поведении дисперсии мультимасштабного разложения разверток изображений, определяемого показателем Херста для редукции статистической избыточности.

2. Разработан метод мультимасштабного сжатия космических изображений с учетом фрактальных свойств данных ДЗЗ, с использованием квазине-прерывных рекурсивных разверток типа Пеано–Гильберта и вейвлет-преобразований, который позволяет увеличить пропускную способность спутникового канала передачи данных ДЗЗ малого КА, который в отличие от известных методов, позволяет сохранить в сигнале аномальные статистические признаки исходного изображения, на основе оценки по минимаксному критерию Колмогорова.

3. Разработан информационно-эффективный метод передачи вейвлет-коэффициентов мультимасштабных уровней разложения данных ДЗЗ на основе энтропийного критерия и выработаны рекомендации по передаче сигналов, который в отличие от известных методов, позволяет организовать передачу данных таким образом, что во временной последовательности процесса передачи тематической информации в первую очередь передается ее наиболее значимая часть, которая уточняется на последующих этапах передачи.

4. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение бортового сжатия данных ДЗЗ на основе квазинепрерывных разверток, фрактальных свойств и вейвлет-преобразований.

#### **Обоснованность и достоверность результатов диссертации**

Обоснованность результатов, полученных в диссертационной работе, базируется на использовании апробированных научных положений и методов исследования, согласованности результатов с известными теоретическими положениями. Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается результатами проведенных численных и измерительных экспериментов на инженерном аналоге микроспутника «УГАТУСАТ».

#### **Практическая значимость результатов**

Практическая значимость полученных результатов заключается в повышении пропускной способности спутникового радиоканала, а также возможности сужения полосы передаваемого сигнала. Как показало моделирование, разработанные методы и алгоритмы, позволяют увеличить пропускную способность ка-

нала до 20–30% и уменьшить число передаваемых отсчетов вейвлет-разложения сигнала в 3–5 раз, а также в разработке метода передачи вейвлет-коэффициентов мультимасштабных уровней разложения на основе энтропийного критерия.

Основные результаты диссертационной работы внедрены в ЗАО «ПОЛЕТ-ИНТЕР» в виде алгоритма бортового сжатия данных дистанционного зондирования Земли на микроспутниковых системах и в учебном процессе в Уфимском государственном авиационном техническом университете при проведении практических и лабораторных занятий по дисциплине «Радиотехнические основы проектирование межспутниковых инфокоммуникаций».

#### **Апробация работы**

Основные результаты работы обсуждались на V–VII Международных научно-технических конференциях «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций» Уфа, Самара, 2004-2006; на XIII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC–2007), Воронеж, 2007; на 3 Всероссийской зимней школе–семинаре аспирантов и молодых ученых, Уфа, 2008; а также на семинарах кафедры «Телекоммуникационных систем».

**Публикации.** Результаты диссертационной работы отражены в 12 публикациях, в 2 научных статьях в периодических изданиях из списка ВАК, в 9 материалах международных и российских конференциях и 1 свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и библиографического списка и изложена на 179 страницах машинописного текста. Библиографический список включает 71 наименования литературы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель работы и решаемые в ней задачи, научная новизна и практическая ценность выносимых на защиту результатов.

**В первой главе** представлен анализ современного состояния спутниковых систем передачи информации на основе малых космических аппаратов. Показано, что главными приоритетными техническими задачами, которые необходимо решить в первую очередь, являются задачи передачи тематической информации, обеспечения постоянной связи и управления движением микроспутника. Особенности малых КА является их миниатюризация технических составляющих: малая энергетика приводит к малой мощности и слабому сигналу, невозможность установки на борту больших антенн приводит к уменьшению полосы пропускания и ограничению передаваемых данных, а ограничение в массогабаритных параметрах приводит к невозможности хранить большие объемы информации (мах 1 Гбайт) и ограничению вычислительных ресурсов.

Организация радиосвязи в спутниковых системах наталкивается на ряд проблем связанных с:

1. Ограниченностью частотного диапазона, отведенного для радиоканала;

2. Необходимостью передачи большого объема информации, особенно от спутников ДЗЗ.

В этой связи существует проблема передачи по фиксированной ограниченной полосе спектра наибольшего количества информации, как правило, цифровые данные от камер наблюдения поверхности Земли высокого разрешения, от телеметрических датчиков и систем центрального бортового процессора. Проведенный анализ показал, что для повышения пропускной способности спутникового канала передачи данных ДЗЗ необходимо создать эффективную систему передачи, основанную на мультимасштабных методах сжатия спутниковых снимков и применения информационно-эффективных методов передачи.

Выполнен анализ основных методов сжатия изображений. Кратко рассмотрены принципы реализации методов сжатия изображений с потерями и без потери информации. Избыточность данных является центральным основанием для цифрового сжатия. Известно, что изображения наряду с большой информационной емкостью обладают и большой информационной избыточностью. Поэтому одна из основных проблем обработки заключается в извлечении из исходных изображений лишь необходимой информации, т.е. в ее сжатии путем устранения избыточности.

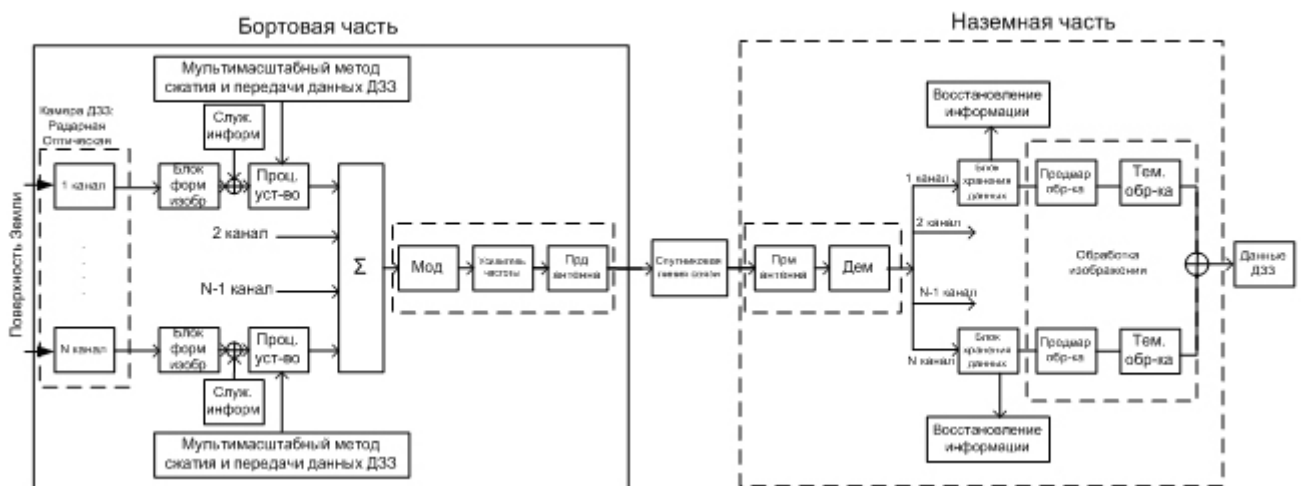


Рисунок 1 – Радиоканал передачи и приема данных ДЗЗ с блоком мультимасштабного сжатия и передачи данных ДЗЗ.

Рассмотрены технические параметры бортовой и наземной аппаратуры приема и передачи данных ДЗЗ. Для расчета пропускной способности спутникового канала в зависимости от параметров камеры съемки (рис. 1), рассмотрим выражение:

$$C = \frac{V \cdot \text{Pics} \cdot m \cdot k}{R}, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость бега подспутниковой точки для низкоорбитальных спутников на орбите 700–900 км,  $\text{Pics}$  – длина в пикселях ПЗС линейки,  $m$  – количество спектральных каналов камеры ДЗЗ,  $k$  – разрядность АЦП,  $R$  – разрешающая способность камеры ДЗЗ.

Использование мультимасштабного метода сжатия данных ДЗЗ к созданию эффективной системы передачи, позволяет сокращать число исходных данных от камеры дистанционного зондирования Земли в 3–5 раз, увеличить достоверность передачи цифровых данных, за счет большого энергетического выигрыша  $E_b / N_0$ , что может привести к использованию кодов для помехоустойчивого кодирования, сужению полосы пропускания для сохранения частотного ресурса, увеличению пропускной способности канала передачи тематической информации и телеметрических данных, а также увеличить дальность связи, уменьшить размеры антенн, уменьшить число переприемов данных. Если же увеличивать разрешающую способность камеры или полосу обзора, то это приведет к увеличению передаваемой информации.

Во второй главе предлагается для разработки метода передачи данных ДЗЗ использовать мультимасштабные методы, основанные на принципе последовательного уточнения или наоборот огрубления информации о чем-либо при переходе от крупного масштаба к мелкому или наоборот. Многомасштабный анализ дает возможность определить структурную организацию объекта исследования на уровне взаимосвязи частей и целого в процессе последовательного уточнения по мере продвижения вдоль "оси масштабов".

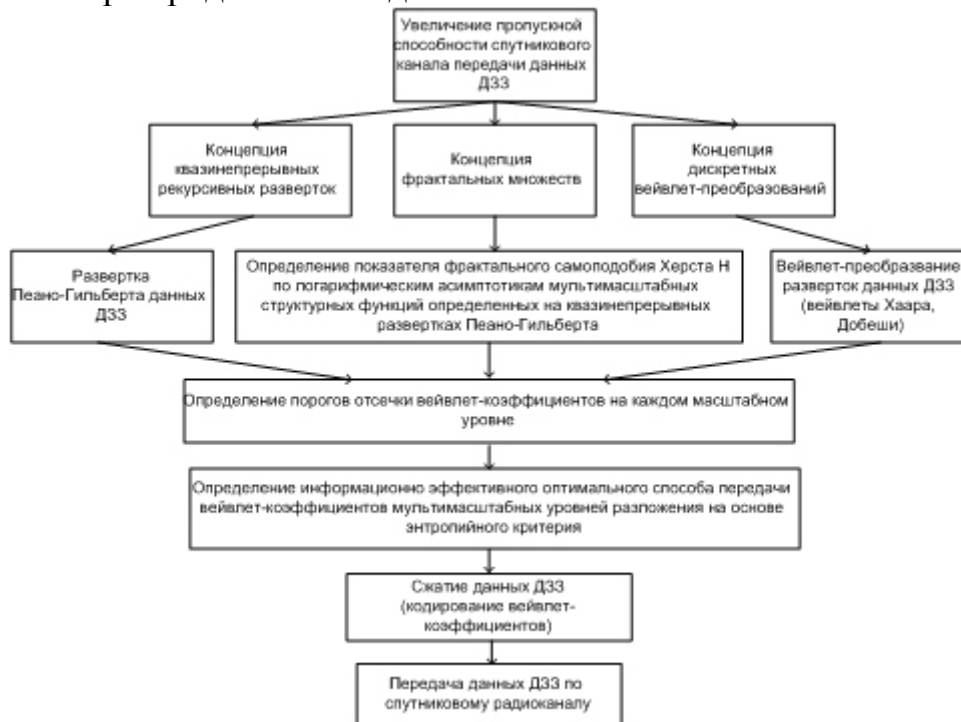


Рисунок 2 – Структура мультимасштабного метода сжатия и передачи данных ДЗЗ для увеличения пропускной способности спутникового канала

Разрабатываемый мультимасштабный метод, с методологической точки зрения, представляет собой интеграцию трех мультимасштабных концепций: концепции рекурсивных разверток многомерных пространств, концепции фрактальных множеств (фракталов), концепции дискретного вейвлет-анализа (рис. 2). Каждая из перечисленных концепций в разрабатываемой технологии играет вполне определенную функциональную роль.



При построении рекурсивных разверток данных ДЗЗ используется масштабное самоподобие, которое в данном конкретном случае заключается в итерационном применении одного и того же принципа построения на разных пространственных масштабах. К разверткам предъявляются два важных требования – сохранение взаимной топологической близости элементов исходного и развернутого пространств, свойство квазинепрерывности и сохранение корреляционных связей между элементами в том и другом пространствах. Указанным свойствам удовлетворяют квазинепрерывные развертки (рис. 3).

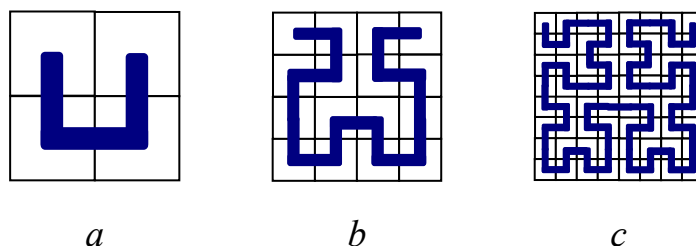


Рисунок 3 – Квазинепрерывная рекурсивная развертка типа Пеано-Гильберта разных масштабов  $m$ :  $a - m=1$ ,  $b - m=2$ ,  $c - m=3$ .

Основной характеристикой, определяющей масштабно-самоподобную структуру и статистику поведения данных ДЗЗ, является показатель фрактального самоподобия Херста  $H$ . Именно этот параметр может быть положен в основу бортовой компрессии данных космических систем наблюдения как случайных фрактальных процессов.

Фрактальные свойства данных ДЗЗ в зависимости от ситуации можно определять, как множество точек, заданных в двумерном пространстве, в этом случае рассматривается какая-либо развертка изображения (одномерный сигнал), который представляет собой множество точек на плоскости. В ряде исследований было установлено, что космические изображения, как и многие объекты, генетическое происхождение которых обусловлено разномасштабными процессами релаксации, имеют случайную фрактальную структуру. Самоподобие случайных структур связано со статистической однородностью их строения на различных пространственных масштабах. Под масштабом в первую очередь понимается пространственная (или временная) периодичность, с которой осуществляется зондирование какого-либо объекта или множества.

Рассмотрены развертки строк данных ДЗЗ различного пространственного разрешения различных спутниковых систем наблюдения (рис. 4), общий вид кривых, не изменяется, несмотря на то, что масштаб (периодичность) выборки изменился на три порядка. Развертка изображения, в данном случае строка, представляет собой структурный объект, который в математическом смысле можно трактовать как некоторое множество или случайный процесс, обладающий свойством масштабного самоподобия.

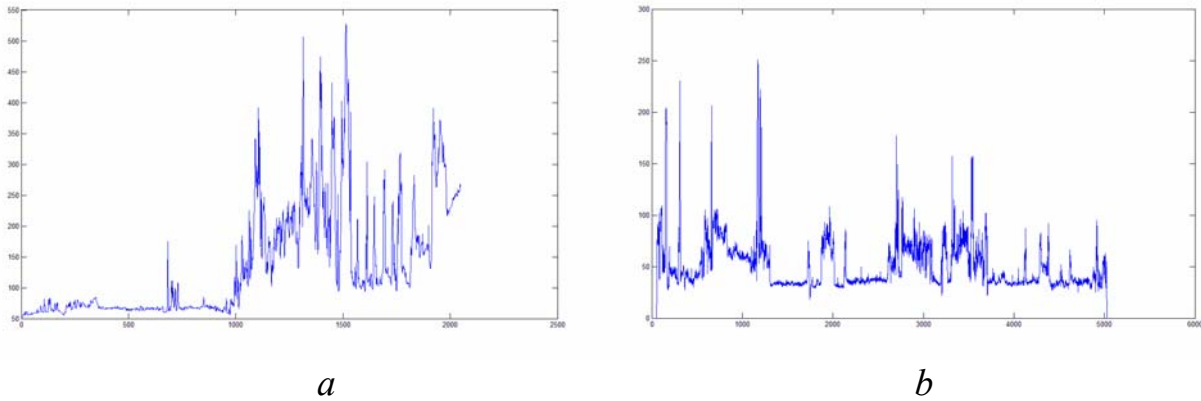


Рисунок 4 – Развертки космических изображений как структурные объекты с фрактальными свойствами: а – NOAA-19 (пространственное разрешение 1100 м), б – QuickBird (пространственное разрешение 2 м).

Рассмотрены методы определения показателя Херста. Основные недостатки приведенных методов определения показателя Херста состоят в высоких требованиях к вычислительным ресурсам, что в условиях применения их на борту микроспутника делает нежелательным, ввиду ограничения как временных, так и вычислительных ресурсов, это привело к разработке метода основанного на анализе мультимасштабных структурных функций, определенных на квазинепрерывных рекурсивных развертках типа Пеано–Гильберта.

Для определения показателя самоподобия использовались логарифмические асимптотики мультимасштабных структурных функций (2), определяемых в дискретном случае соотношением

$$S(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (f_{(i+k)}^m - f_{(i)}^m)^2 \quad (2)$$

где  $M=2^{2m}$ ,  $2^m \times 2^m$  – размер изображения,  $k$  – аргумент дискретной структурной функции;  $f_i^m$  – пиксели изображения масштаба  $m$ , полученные рекуррентно из изображения масштаба  $m+1$  на основе свертки по образующему элементу развертки Гильберта, показанному на рис. 5.

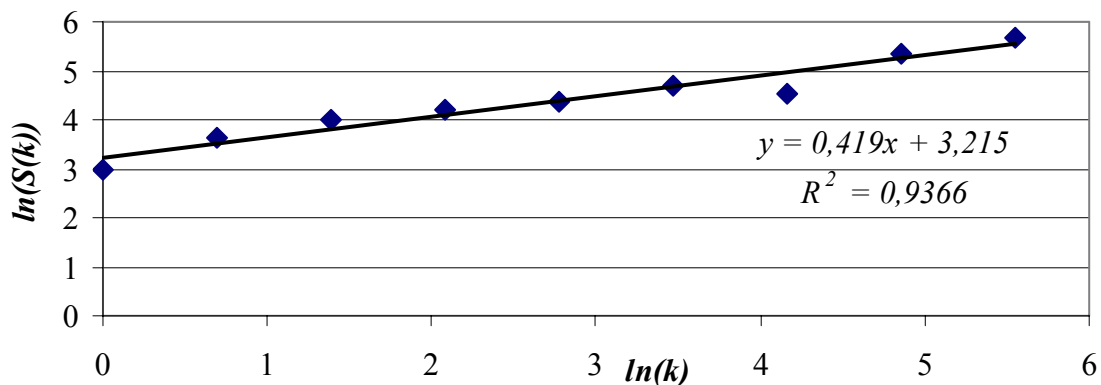


Рисунок 5 – Логарифмические асимптотики мультимасштабной структурной функции:  $y=0.419x+3.215$  – линия регрессии ( $y=\ln(S(k))$ ,  $x=k$ );  $R^2$  – величина достоверности аппроксимации (квадрат коэффициента смешанной корреляции).

Линейный характер асимптотики позволяет по углу наклона определить показатель фрактального самоподобия Херста.

Для анализа вычислительных экспериментов по исследованию фрактального статистического самоподобия данных спутникового наблюдения поверхности Земли использовались данные различного пространственного разрешения в диапазоне 2–1100 м в области спектра 0,5–12 мкм. Вычислительные эксперименты по определению фрактальных характеристик показывают, что спутниковые изображения и их квазинепрерывные развертки являются фрактальными многообразиями. Показатель фрактального самоподобия Херста спутниковых изображений различных типов ландшафтов лежит в пределах 0,4–0,75. Показатель Херста различных спектральных каналов в области от видимого до теплового инфракрасного излучения отличается не более чем на 5%.

**В третьей главе** приведены теоретические основы вейвлет-преобразования сигналов. Вейвлет-преобразование — это разложение сигнала по системе функций, которые являются сдвинутыми и масштабированными (сжатыми или растянутыми) копиями одной функции — порождающего вейвлета. Рассмотрены основные положения концепции мультимасштабного (кратко-разрешающего) анализа сигналов на основе дискретных вейвлет-преобразований для сжатия изображений.

Мультимасштабное разложение квазинепрерывной рекурсивной развертки на некотором информативном уровне  $J$ :

$$f(x) = \sum_k a_{j,k} \varphi_{j,k}(x) + \sum_J \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(x), \quad (3)$$

где,  $k$  — номер коэффициента на уровне разложения  $j$ ,  $a_{j,k}$  — низкочастотный коэффициент аппроксимации  $j$ -го уровня ( $cAj$ ), определяют «фон» изображения,  $d_{j,k}$  — высокочастотные детализирующие коэффициенты ( $cDj$ ), определяют «аномальные» выбросы,  $\psi_{j,k}(x) = \sqrt{2^j} \varphi(2^j x - n)$  — порождающий вейвлет,  $\varphi_{j,k}(x)$  — масштабирующая функция.

$$d_{j,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi_{j,k}(x) dx, \quad a_{j,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \varphi_{j,k}(x) dx, \quad (4)$$

Разрабатывается метод определения оптимальных порогов фильтрации вейвлет-коэффициентов разложения и выбор типа вейвлет-преобразования развертки изображения для сжатия данных ДЗЗ.

Традиционным методом выбора пороговых значений является равенство сохраненной энергии сигнала (выраженной в процентах) и числа нулевых вейвлет-коэффициентов. Однако данный метод учитывает только одну характеристику качества сигнала — его энергетику.

Для выбора оптимальных порогов отсечки воспользуемся свойством масштабной инвариантности вейвлет-коэффициентов. В основу сжатия снимков положена статистическая взаимосвязь дисперсий различных масштабных уровней разложения, связанной с показателем фрактального самоподобия Херста.

$$\langle d_{j,k}^2 \rangle = \frac{\langle d_{0,k}^2 \rangle}{2^{j(2H+1)}}. \quad (5)$$

Равенство (5) следует понимать в статистическом смысле: любые статистические моменты случайной величины  $d_{j,k}$  на масштабном уровне  $j$  масштабно-самоподобны и выражаются через соответствующие моменты на некотором исходном масштабном уровне  $j=0$ , где  $\langle \rangle$  – знак усреднения по статистическому ансамблю, показывающее, что при переходе на более детальные уровни, то есть с увеличением  $j$ , флуктуации вейвлет-коэффициентов уменьшаются. Самоподобное поведения дисперсии межуровневого масштабного разложения квазинепрерывные разверток спутниковых изображений было положено в основу метода сжатия данных ДЗЗ.

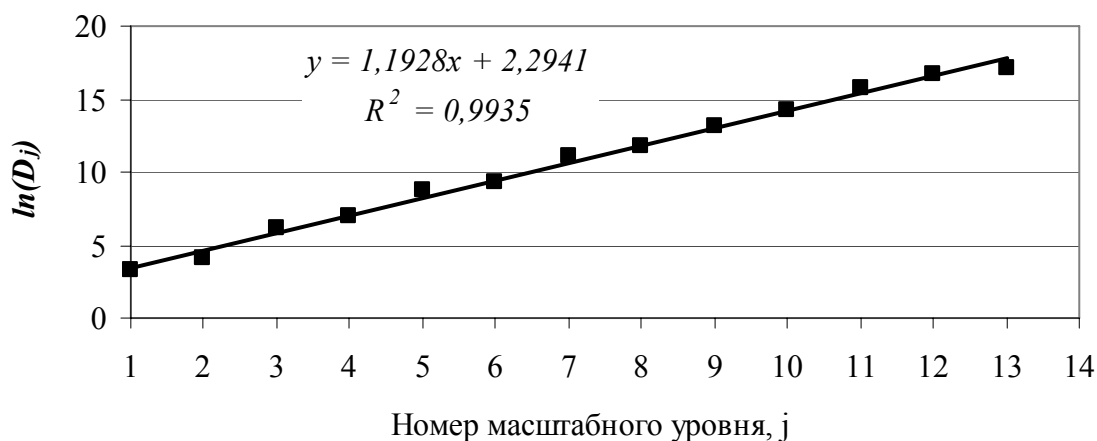


Рисунок 6 – Дисперсии масштабных уровней вейвлет-коэффициентов тестового спутникового снимка:  $y=1.1928x+2.2941$  - линия регрессии ( $y=\ln(D_j)$ ,  $x=j$ );  $R^2$  – величина достоверности аппроксимации (квадрат коэффициента смешанной корреляции).

С ростом масштабного уровня вейвлет-разложения дисперсия, а следовательно, и общий информативный вклад в структуру сигнала уменьшается по степенному закону, показатель которого определяется показателем фрактального самоподобия Херста, который может быть положен в основу сжатия данных ДЗЗ.

Далее решается задача определения пороговых уровней отсечки вейвлет-коэффициентов. Введем в пространстве вейвлет-коэффициентов параметр обнаружения  $q_{j,k}$ , характеризующий отношение сигнал/шум в пространстве вейвлет-коэффициентов (6). Для отношения сигнал/шум на масштабном уровне  $j$  получим

$$q_{j,k} = \frac{|d_{j,k}|}{\langle d_{j,k}^2 \rangle^{1/2}} \quad (6)$$

В качестве статистических условий обнаружения используем критерий Неймана–Пирсона, в соответствии с которым требуется минимизировать вероятность пропуска сигнала  $p_{\text{пс}}$  при заданной вероятности ложной тревоги  $p_{\text{лт}}$ . При использовании критерия, обнаружение сигнала будет состоять в пороговой селекции вейвлет-коэффициентов, в соответствии с правилом

$$d_{j,k} = Th[d_{j,k}] = \begin{cases} 0, & q_{j,k} < q_n \\ d_{j,k}, & q_{j,k} \geq q_n \end{cases}, \quad (7)$$

где величина порога  $q_n$ , определяется критерием Неймана-Пирсона, для заданной вероятности ложных тревог и пропуска сигнала. С заданной вероятностью ложной тревоги и пропуска сигнала все, что ниже порога является шумом.

Традиционным количественным критерием качества сжатия является энергетический критерий, связанный с оценкой восстановления сигнала по минимуму среднеквадратической ошибки. При решении ряда конкретных задач обработки данных спутниковых систем наблюдения, в частности, связанных с обнаружением редких аномальных сигналов данный критерий не является адекватной мерой качества сжатия, так как аномальные сигналы дают малый вклад в общую энергию анализируемого изображения. В этой связи колмогоровский критерий аппроксимации сигналов по минимуму максимального отклонения является более эффективным. В общем случае при оценке качества сжатия необходимо учитывать как энергетику сигнала, так и минимаксное отклонение.

Проведено исследование влияния различных типов вейвлет-преобразований на сжатие данных ДЗЗ (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительные характеристики различных вейвлетов

| Тип вейвлета    | $H$    | $C$    | $k_c$ | $E_{rec}, \%$ | $\varepsilon_{max}$ | $\sigma_{rec}$ |
|-----------------|--------|--------|-------|---------------|---------------------|----------------|
| Вейвлеты Хаара  | 0,5485 | 0,9656 | 4,34  | 99,3881       | 34                  | 7,2435         |
| Вейвлеты Добеши | 0,5144 | 0,9096 | 14,28 | 98,6303       | 55                  | 11,5761        |
| Койфлеты        | 0,5284 | 0,8803 | 20    | 98,3063       | 68                  | 13,2193        |
| Симплеты        | 0,5234 | 0,8697 | 20    | 97,9017       | 63                  | 13,7552        |
| Вейвлеты Мейера | 0,4399 | 0,9729 | 9,09  | 99,6118       | 31                  | 6,4462         |

Из полученных практических данных (рис. 7) были сделаны выводы, что наилучшее качество восстановленного изображения демонстрируют вейвлеты Хаара и Мейера, т. к. они имеют минимальное значение  $\varepsilon_{max}$  и  $\sigma_{er}$ . Однако коэффициент сжатия спутникового изображения для данных типов меньше, чем для вейвлетов Добеши, симплетов и койфлетов, которые, однако, обеспечивают меньшую точность декомпрессии. Поэтому в зависимости от требований к качеству изображения (высокая четкость или сохранение только аномальных сигналов), для компрессии выбирается определенный тип базисных функций. При этом следует учитывать сложность реализации того или иного вейвлет-разложения на цифровых сигнальных процессорах (DSP).

Была проведена серия экспериментов по сжатию над спутниковыми данными различных систем дистанционного зондирования Земли, пространственное разрешение  $r_{spat}$  которых варьировалось от 1100 м (серия NOAA) до 1 м (спутники EROS-A/B) вейвлет-преобразованием Хаара (табл. 2)

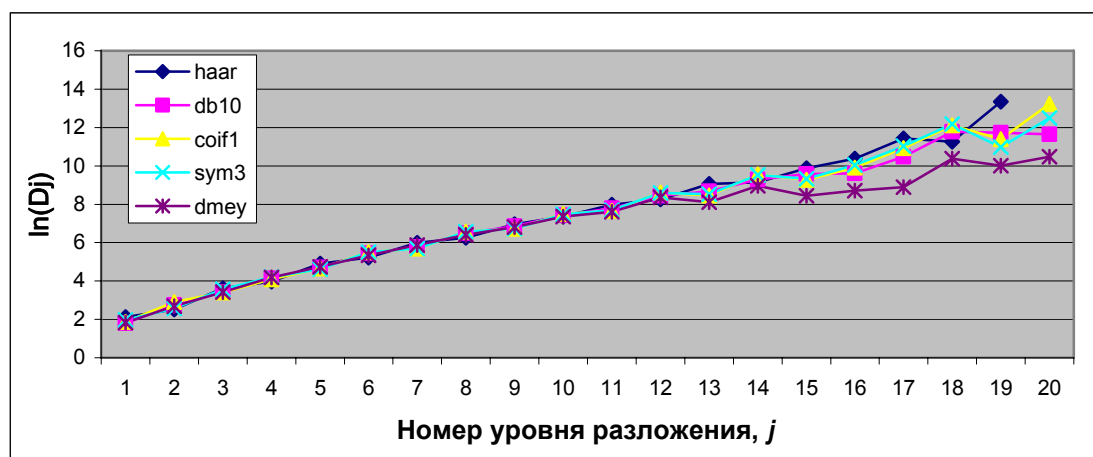


Рисунок 7 – Дисперсии масштабных уровней вейвлет-коэффициентов различных типов вейвлетов.

Таблица 2. Сравнительные характеристики сжатия изображений

| Спутник   | $r_{spat}$ | $k_c$ | $\varepsilon_{max}$ | C        | $E_{rec}$ , % | PSNR, дБ |
|-----------|------------|-------|---------------------|----------|---------------|----------|
| NOAA      | 1100       | 5     | 45                  | 0,982992 | 99,52044      | 30,94    |
| EOS-TERRA | 500        | 4,76  | 118                 | 0,946417 | 97,76529      | 22,27    |
| EOS-TERRA | 250        | 3,57  | 93                  | 0,967987 | 99,14313      | 24,29    |
| SPOT-4    | 20         | 5,26  | 52                  | 0,887902 | 99,14065      | 28,77    |
| SPOT-4    | 10         | 3,03  | 34                  | 0,961546 | 99,62553      | 33,51    |
| EROS-A/B  | 1          | 4,16  | 31                  | 0,973233 | 99,8183       | 34,15    |

Оценены зависимости пиковых отношений сигнал/шум и максимальных ошибок от коэффициента сжатия для распространенных методов сжатия. Исследования показали, что метод мультимасштабного сжатия (МС) предпочтительнее метода JPEG и JPEG2000 при передачи данных ДЗЗ. Однако исследования, проведенные на различных космических изображениях, показали, что метод мультимасштабного сжатия выигрывает только при малых и средних коэффициентах сжатия ( $K_c < 10$ ). PSNR далеко не лучшим образом отражает реальное качество восстановленного изображения, поскольку дает усредненное значение погрешностей и не учитывает локальные особенности поля яркости (аномальные явления). При работе с данными ДЗЗ, в ряде важных приложений, связанных с обнаружением аномалий, более корректным является применение критерия максимальной ошибки. Результаты исследований (рис. 8) продемонстрировали преимущество по этому критерию мультимасштабного сжатия, так как при восстановлении, максимальная ошибка имела наименьший рост и редко вносила сильные изменения, в отличие от других методов сжатия, при которых видны максимальные искажения и даже потери мелких деталей на восстановленном изображении.

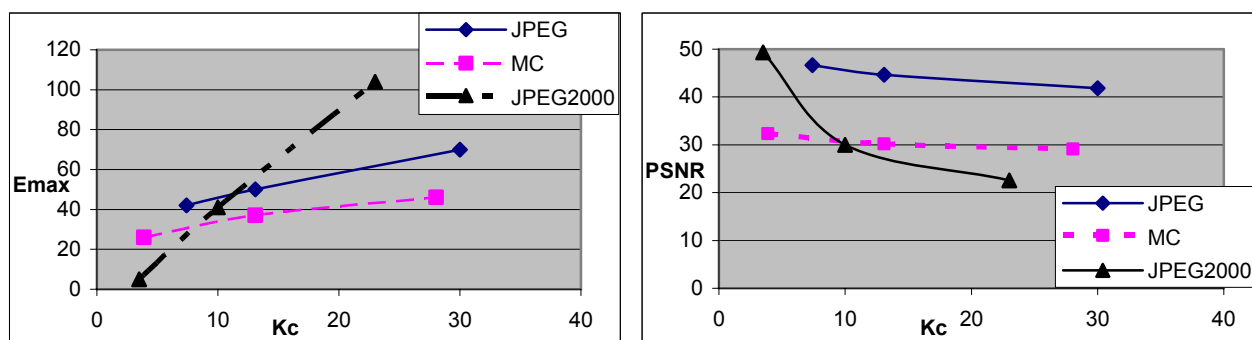


Рисунок 8 – Зависимости максимальных ошибок и пиковых отношений сигнал/шум от степени сжатия для тестового спутникового снимка NOAA.

В ходе выполнения работы был разработан алгоритм мультимасштабной компрессии спутниковых изображений и проработана возможность реализации данного алгоритма на цифровом сигнальном процессоре для установки на борту микроспутника для сжатия данных ДЗЗ в целях научных экспериментов. Апробация разработанного алгоритма проходила на инженерном образце микроспутника «УГАТУСАТ» на кафедре ТС УГАТУ (рис. 9). Было разработано программное обеспечение для использования на процессоре ADSP-BF533.

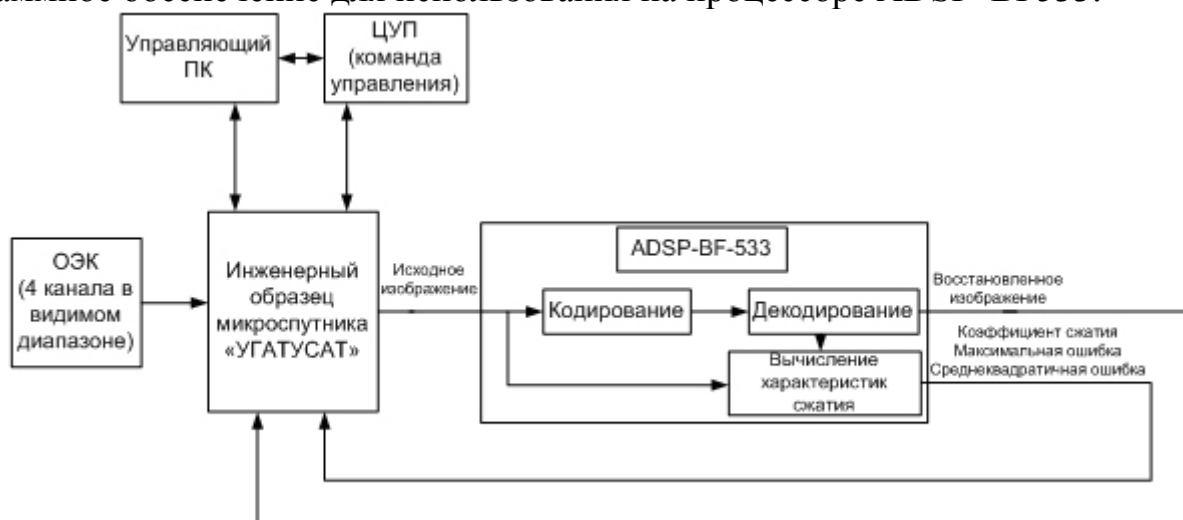


Рисунок 9 – Схема эксперимента на инженерном аналоге микроспутника «УГАТУСАТ».

В четвертой главе разработан метод передачи спутниковых изображений, в основе которого лежит использование вейвлет-преобразование квазинепрерывных разверток сигналов и использование энтропийного критерия для определения наиболее информативных уровней вейвлет-разложений.

В качестве статистического критерия оценки информативности отдельных уровней вейвлет-разложения используется энтропия уровней вейвлет-преобразования, определяемая формулой Шеннона. Для количественного определения «неопределенности» строится гистограмма уровня вейвлет-разложения.

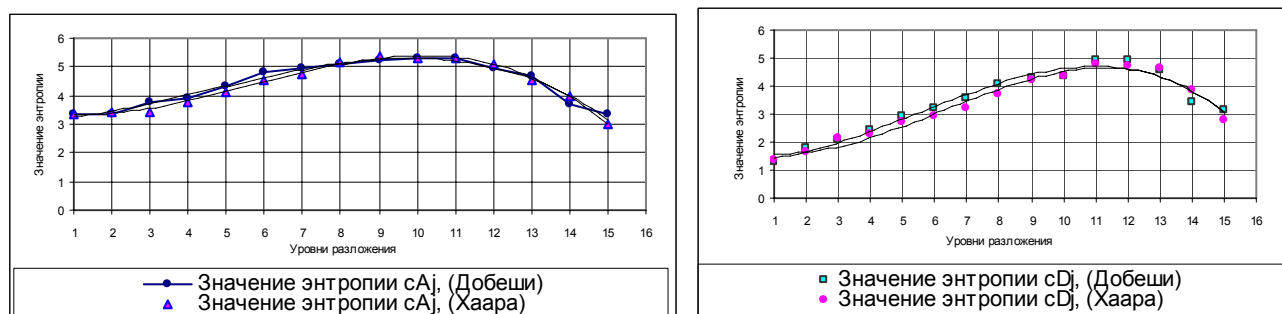


Рисунок 10 – Зависимость энтропии высокочастотных и низкочастотных вейвлет-коэффициентов от уровня разложения снимка SPOT-4 для двух видов разложения (Добеши и Хаара).

Максимальное значение энтропии определяется на промежуточном уровне и несёт в себе наибольшую информативность (рис. 10). Таким образом, главная часть изображения состоит из пиковых вейвлет-коэффициентов, которые являются основой всего изображения и несут в себе наибольшую информативность. Передача остальных коэффициентов улучшает качество принятой информации, поскольку они отвечают за детализацию изображения. Низкочастотные вейвлет-коэффициенты формируют общий «фон» изображения, высокочастотные вейвлет-коэффициенты «аномальные» выбросы. На основе полученных данных можно предложить следующие рекомендации по передачи вейвлет-коэффициентов:

$$\begin{cases} \max_j \left[ -\sum_{k=1}^n p_k(cD_j) \cdot \log_2 p_k(cD_j) \right] \\ \max_j \left[ -\sum_{k=1}^n p_k(cA_j) \cdot \log_2 p_k(cA_j) \right] \end{cases} \quad (8)$$

где  $p_k(cA_j)$ ,  $p_k(cD_j)$  – вероятности появления низкочастотных и высокочастотных коэффициентов соответственно, определяемые с помощью гистограммы,  $j$  – уровень вейвлет-разложения, таким образом, выбирается критерий или для оценки «фона» изображения, или «аномальных» выбросов.

В ходе работы были выработаны рекомендации по организации спутникового канала передачи данных ДЗЗ для малых спутников.

1. Сжатие исходных данных ДЗЗ – увеличение пропускной способности спутникового канала передачи данных ДЗЗ – добавление спектральных каналов, увеличение полосы обзора, добавление телеметрических данных в общий поток передачи.

2. Сжатие исходных данных ДЗЗ – уменьшение полосы частот спутниковых систем (МСЭ).

3. Сжатие исходных данных ДЗЗ – использование помехозащищенных кодов для увеличения отношения с/ш.

4. Организация цикла передачи информации осуществляется итерационным образом, что вначале передается псевдоизображение, соответствующее мультимасштабному уровню с максимальным значением энтропии, далее передаются все последующие уровни.



**В заключении** изложены основные научные результаты, полученные в диссертационной работе в ходе исследования.

**В приложении** представлен листинг программы сжатия данных дистанционного зондирования Земли на основе квазинепрерывных разверток, фрактальных свойств и вейвлет–преобразований, а также акты внедрения результатов диссертационной работы.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

1. Разработан метод определения пороговых уровней селекции вейвлет-коэффициентов передаваемого спутникового сигнала на основе самоподобного поведения дисперсии межуровневого масштабного разложения, определяемого показателем Херста, для редукции статистической избыточности, позволяющий сократить число вейвлет-коэффициентов на 70–90 % .

2. Разработан метод мультимасштабного сжатия космических изображений с учетом фрактальных свойств данных ДЗЗ, на основе использования квазинепрерывных рекурсивных разверток типа Пеано–Гильберта и вейвлет–преобразований, позволяющий уменьшить объем передаваемой информации в 3–5 раз и увеличить пропускную способность спутникового канала передачи данных ДЗЗ малого КА, при сохранении в сигнале аномальных статистических признаков исходного изображения, на основе оценки по минимаксному критерию Колмогорова. Метод дает возможность применить помехоустойчивые виды кодирования или уменьшить полосу передаваемого сигнала.

3. Разработан информационно–эффективный метод передачи вейвлет-коэффициентов мультимасштабных уровней разложения на основе энтропийного критерия и выработаны рекомендации по передаче сигнала, позволяющие передавать определяющую информацию об изображении в начале сеанса связи и уточнять ее с каждым последующим циклом передачи, что исключает возможность потери всего снимка.

4. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение сжатия данных ДЗЗ, реализованное на основе квазинепрерывных разверток, фрактальных свойств и вейвлет–преобразований, который был апробирован на инженерном образце микроспутника «УГАТУСАТ» и дает возможность применить его на спутниковых системах ДЗЗ.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

#### ***В рецензируемых журналах из списка ВАК***

1. Мультимасштабная компрессия спутниковых сигналов в широкополосных системах связи / Султанов А. Х., Багманов В. Х., Мешков И.К., Харитонов С.В. // Вестник УГАТУ, 2007. Т. 9, №6(24). – С. 213–216.

2. Сравнительный анализ типов вейвлет-преобразований в задаче сжатия спутниковых изображений / Султанов А.Х., Багманов В.Х., Мешков И.К., Харитонов С.В. // Инфокоммуникационные технологии, 2010. Т. 8, № 1. – С. 46–50.

***В других изданиях***

3. Использование вейвлет-анализа в задачах фильтрации / Султанов А.Х., Мешков И.К. // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: V Международная научно-техническая конференция. – Самара, ПГАТИ, 2004. С. 55-58.
4. Экспериментальное исследование масштабно-инвариантной структуры данных спутниковых систем наблюдения / Багманов В.Х., Султанов А.Х., Мешков И.К. // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: VI Международная научно-техническая конференция. – Уфа, УГАТУ, 2005. – С 44–46.
5. Способы передачи данных с низкоорбитальных микроспутников / Багманов В.Х., Султанов А.Х., Мешков И.К. // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: VII Международная научно-техническая конференция. – Самара, ПГАТИ, 2006. С. 44–46.
6. Методология мультимасштабной компрессии спутниковых изображений / Багманов В. Х., Султанов А. Х., Мешков И.К., Харитонов С.В. // Радиолокация, навигация, связь (RLNC–2007): XIII Международная научно-техническая конференция. Том I. – Воронеж, 2007. – С. 201–207.
7. Фильтрация спутниковых изображений на основе рекурсивных разверток типа Пеано–Гильберта / Мешков И.К., Харитонов С.В. // 3-я Всероссийская зимняя школа–семинар аспирантов и молодых ученых: Сб. трудов – Уфа, УГАТУ, 2008. – 4 стр.
8. Восстановление спутниковых изображений на основе фрактальных фильтров / Багманов В. Х., Султанов А. Х., Мешков И.К., Харитонов С.В.// Оптические технологии в телекоммуникациях: Доклады Международного научного общества SPIE 2008. Т. 7374, 2009, 8 стр. (опубликовано на английском языке)
9. Мультимасштабная вейвлет-обработка спутниковых изображений / Багманов В. Х., Султанов А. Х., Мешков И.К., Харитонов С.В.// Оптические технологии в телекоммуникациях: Доклады Международного научного общества SPIE 2008. Т. 7374, 2009, 8 стр. (опубликовано на английском языке)
10. Сжатие данных дистанционного зондирования Земли на основе квазинепрерывных разверток, фрактальных свойств и вейвлет-преобразований / Багманов В. Х., Султанов А. Х., Мешков И.К., Харитонов С.В. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009616843, 2009.
11. Передача данных дистанционного зондирования Земли на основе мультимасштабных методов разложения сигналов / Мешков И.К. // Проблемы геологии, геофизики, бурения и добычи нефти. Экономика и управление: Сб. статей аспирантов и молодых специалистов. Выпуск 7, – Уфа, 2010. – С. 77–82.
12. Мультимасштабный подход к системе передачи данных дистанционного зондирования Земли при организации мониторинга чрезвычайных ситуаций на основе малых спутников /Мешков И.К.// Проблемы безопасности и защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций (Безопасность – 2010): Международная научно-практическая конференция. – Уфа, УГАТУ, 2010. – С 149-153.

МЕШКОВ Иван Константинович

ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ  
ДЛЯ МАЛЫХ СПУТНИКОВ  
НА ОСНОВЕ МУЛЬТИМАСШТАБНЫХ МЕТОДОВ  
РАЗЛОЖЕНИЯ СИГНАЛОВ

Специальность 05.12.13 –  
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 24.09.2010. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Таймс.  
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр.-отг 1,0. уч.-изд. л. 0,9.  
Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет  
Центр оперативной полиграфии УГАТУ  
450000, Уфа-Центр, К.Маркса, 12