

Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 519.725;007.001.362;528.85/.87(15)

**ПЕРЦЕВ**  
Дмитрий Юрьевич

**АЛГОРИТМЫ СЖАТИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ  
КОНТЕКСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

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

по специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка  
информации»

Минск 2019

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Дудкин Александр Арсентьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией государственного научного учреждения «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси»

Официальные оппоненты: **Краснопрошин Виктор Владимирович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных систем управления факультета прикладной математики и информатики Белорусского государственного университета  
**Ключеня Виталий Васильевич**, кандидат технических наук, доцент, инженер-программист общества с ограниченной ответственностью «СЕТС китайская электротехника»

Оппонирующая организация Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие «Геоинформационные системы»

Защита состоится 16 января 2020 г. в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «\_\_» декабря 2019 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций  
кандидат технических наук, доцент



М.П. Ревотюк

## ВВЕДЕНИЕ

Современные системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют получать и обрабатывать необходимые данные с больших площадей (в том числе труднодоступных и опасных участков). При этом одним из ключевых направлений исследований в данной области является задача сжатия данных для обеспечения их эффективной передачи по каналам связи, имеющим ограниченную пропускную способность.

В настоящее время для решения многих научных и прикладных задач ДЗЗ востребована гиперспектральная съемка, которая обеспечивает получение качественно новых и ранее недоступных сведений об исследуемых объектах. Основным преимуществом применения гиперспектрального оборудования является увеличенное число спектральных каналов, которое, в свою очередь, в зависимости от спектрометра, приводит к существенному увеличению объема передаваемых данных.

Коэффициент сжатия гиперспектральных данных большинства алгоритмов, основанных на традиционных подходах, составляет от 2,0 до 3,5 и достигается путем сложных математических вычислений. Такие алгоритмы применимы при обработке данных в наземном сегменте ДЗЗ, однако в условиях летательных аппаратов (например, на спутнике) зависимость результата сжатия от имеющихся вычислительных ресурсов становится критической. Для повышения коэффициента сжатия в данных условиях учитываются особенности гиперспектральных данных. Для этой цели используется контекстное моделирование, по результатам которого данные переупорядочиваются таким образом, что энтропийное кодирование обеспечивает увеличение коэффициента сжатия. Однако известные алгоритмы, формирующие такие последовательности, ориентированы на двумерное представление данных и не учитывают трехмерность гиперспектральных снимков, а также их избыточность. Следствием этого является неэффективная работа энтропийного кодека и, как результат, уменьшение коэффициента сжатия. Кроме того, наряду с контекстным моделированием широко используются вейвлет-преобразования, которые также позволяют учесть особенности гиперспектральных данных для увеличения коэффициента сжатия при сохранении высокого качества восстановленного изображения.

Диссертационная работа посвящена разработке алгоритмов сжатия с применением контекстного моделирования последовательности бит и вейвлет-преобразований, позволяющие учитывать специфику и свойства исходных гиперспектральных данных ДЗЗ.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Связь работы с крупными научными программами и темами

Диссертационная работа проводилась в рамках задания №13-3097 «Разработать алгоритмы и инструментальные средства построения обучаемых нейросетевых классификаторов для обработки гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли» (номер ГР – 20131664, сроки исполнения – 2013-2015 годы) государственной программы научных исследований «Информатика и космос», научно-технической программы Союзного государства «Мониторинг-СГ» в качестве соисполнителя с ОАО «Пеленг» (хозяйственные договора №14-1045 «Разработать алгоритмы для сжатия/восстановления Фурье-видеоинтерферограмм» (номер ГР – 20142222, срок исполнения – 2014 год) и №15-1045 «Разработать программный комплекс для сжатия/восстановления Фурье-видеоинтерферограмм с применением параметрического предсказателя и методов, основанных на 3D-вейвлетах» (номер ГР – 20150764, срок исполнения – 2015 год), фонда фундаментальных исследований по договору №Ф18М-081 от 30 мая 2018 г. «Разработать алгоритм сжатия гиперспектральных данных с применением техники переупорядочивания бит» (номер ГР – 20181516, срок исполнения – июнь 2018 – март 2020 гг.), гранта Министерства образования от 04.07.2016 «Разработка алгоритма контекстного моделирования для задач сжатия гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли» (номер ГР – 20164388, срок исполнения – 2016 год).

### Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является увеличение коэффициента сжатия гиперспектральных данных ДЗЗ за счет контекстного моделирования последовательности бит и вейвлет-преобразований.

Для достижения цели потребовалось решить следующие задачи:

- исследование алгоритмов контекстного моделирования и возможности их применения для сжатия гиперспектральных данных ДЗЗ;
- разработка алгоритма сжатия с потерями на основе блочно-субполосного вложенного алгоритма вейвлет-преобразования;
- разработка алгоритма сжатия без потерь на основе вейвлет-преобразования, трехмерного шаблона для алгоритма контекстного моделирования последовательности бит и арифметического кодека;
- выполнение экспериментальных исследований и разработка методики сжатия гиперспектральных данных ДЗЗ.

Объектом исследования являются гиперспектральные изображения ДЗЗ.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы сжатия гиперспектральных данных ДЗЗ.

Теоретическую базу диссертационной работы составляют исследования по сжатию гиперспектральных данных, предположение о применимости алгоритмов контекстного моделирования к данным ДЗЗ.

### **Научная новизна**

1. Алгоритм сжатия с потерями гиперспектральных данных на основе вейвлет-преобразования с построением дерева значимости битовых плоскостей и удалением менее значимых, отличительными особенностями которого является уменьшение необходимого объема памяти (исключен список LIP в сравнении с алгоритмом 3D-SPIHT) и ускорение поиска значимых вейвлет-коэффициентов за счет использования пирамиды с аппроксимирующими коэффициентами.

2. Алгоритм сжатия без потерь гиперспектральных данных на основе вейвлет-преобразования и арифметического кодека, особенностью которого является применение трехмерной операции zig-zag, которая обеспечивает переупорядочивание данных, приводящее к увеличению коэффициента сжатия (коэффициент сжатия увеличивается на 7,7 % для классических гиперспектральных данных и на 5,7 % для Фурье-интерферограмм).

3. Впервые предложен алгоритм генерации Фурье-интерферограмм на основе традиционного представления гиперспектральных данных в виде трехмерного массива, отличительной особенностью которого является построение функции модуляции и применение ее к классическим гиперспектральным данным.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Алгоритм сжатия с потерями гиперспектральных данных на основе блочно-субполосного вложенного алгоритма вейвлет-преобразования с построением дерева значимости битовых плоскостей и удалением менее значимых, позволяющий достигнуть коэффициент сжатия около 6,1 для 12-битных исходных данных при значении PSNR более 45 дБ для опорных кадров и около 26,5 для последующих кадров при значении PSNR более 49 дБ.

2. Алгоритм сжатия без потерь гиперспектральных данных на основе вейвлет-преобразования и арифметического кодека с использованием трехмерного шаблона для контекстного моделирования последовательности бит, позволяющий достигнуть коэффициенты сжатия 4,1 для классического гиперспектрального куба и 2,4 для Фурье-интерферограмм.

3. Методика сжатия гиперспектральных данных, основанная на разработанных рекомендациях использования алгоритмов сжатия, отличительной особенностью которой является возможность управления коэффициентом сжатия

за счет параметрической настройки алгоритмов, применения контекстного моделирования и адаптации к типу исходных данных (классический куб или Фурье-интерферограмма). Эффективность методики подтверждена экспериментально на примерах сжатия классических данных и реальных Фурье-интерферограмм с коэффициентами сжатия 4,1 и 2,4, соответствующими уровню лучших мировых результатов, а также аналитически при искажении данных в сжатом потоке.

4. Алгоритм генерации Фурье-интерферограмм на основе традиционного представления гиперспектральных данных в виде трехмерного массива, позволяющий проводить эксперименты с более широкой тестовой выборкой с целью адаптации алгоритмов сжатия под особенности современных Фурье-спектрометров.

### **Личный вклад соискателя**

Основные результаты, приведенные в диссертации, получены автором самостоятельно. Соавторами основных публикаций являются научный руководитель доктор технических наук, профессор А. А. Дудкин, осуществляющий определение целей, постановку задач, выбор методов исследований и обсуждение полученных результатов, и Л. П. Поденок, оказывающий помощь в постановке экспериментов.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: XV International PhD Workshop OWD-2013 – Wisla, 2013 г.; Pattern Recognition and Information Processing – Minsk, 2016 и 2019 годы; Шестой и Седьмой Белорусский космический конгресс – Минск, 2014 и 2017 годы; Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (РИНТИ-2015) – Минск, 2015 г.; с Третьей по Седьмую международные научно-технические конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли» – Москва, 2015-2019 годы; 34-я ежегодная научно-техническая конференция ОАО «Агат-системы управления» – управляющая компания холдинга «Геоинформационные системы управления» – Минск, 2017 г.; 49-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов – Минск, 2013 г.; Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР – Минск, 2014 г.

### **Опубликование результатов диссертации**

Результаты диссертационной работы опубликованы в 4 статьях научно-

технических журналов и сборников, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, объемом 1,53 авторского листа, 2 статьях в рецензируемых зарубежных изданиях объемом 0,70 авторского листа, 11 статьях в сборниках материалов научных конференций объемом 1,19 авторского листа, 8 публикациях в сборниках тезисов докладов на конференциях международного и республиканского уровней объемом 0,32 авторского листа.

### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 4 глав, заключения, библиографического списка и 3 приложений.

Полный объем диссертации составляет 166 страниц. Диссертация содержит 75 рисунков на 62 страницах, 34 таблицы на 31 странице, 3 приложения на 15 страницах. Библиографический список содержит 138 наименований, включая публикации автора, на 16 страницах.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, показана необходимость применения алгоритмов контекстного моделирования и вейвлет-преобразования при сжатии гиперспектральных данных ДЗЗ.

В **первой главе** описаны разновидности гиперспектральных данных, их общая структура (трехмерный массив – гиперспектральный куб, рисунок 1) и технические характеристики сенсоров для их получения – спектрометр AVIRIS (Airborne Visual and Infra Red Imaging Spectrometer) и Фурье-интерферометр (разрабатывается ОАО «Пеленг»). При этом в случае спектрометра AVIRIS канал  $Z$  определяет спектральное разрешение, для Фурье-интерферограмм – интерферограммы, полученные в результате смещения спектрометра. В плоскости  $XY$  представлены изображения, полученные в канале  $Z$ .

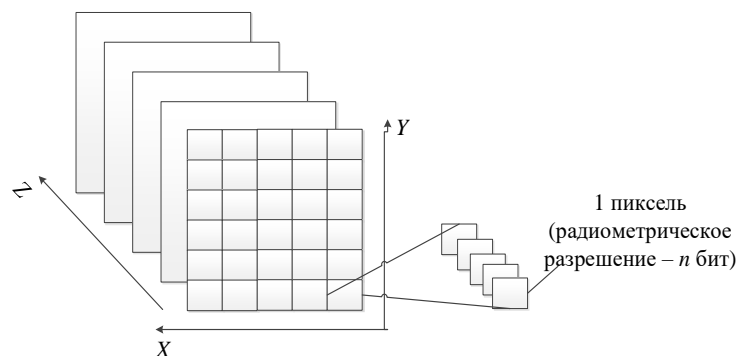


Рисунок 1. – Структура гиперспектральных данных ДЗЗ

Отличительной чертой гиперспектральных данных является высокая корреляция, независимая от способа их получения и стремящаяся к единице в спектральной и пространственной плоскостях. Спектральная корреляция  $c_{u,v}$  между изображениями в каналах  $u$  и  $v$  определяется по формуле (1), пространственная корреляция  $c_u(i, j)$  между пикселями с координатами  $(i, j)$  для канала  $u$  определяется по формуле (2):

$$c_{u,v} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \tilde{x}_{i,j,u} \cdot \tilde{x}_{i,j,v}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \tilde{x}_{i,j,u}^2 \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \tilde{x}_{i,j,v}^2}}, \quad (1)$$

$$c_u(i, j) = \frac{cov_u(i, j)}{\sqrt{cov_u(i, i) \cdot cov_u(j, j)}}, \quad (2)$$

где  $u, v$  – номера спектральных каналов,  $u \in \{1, 2, \dots, R\}$ ,  $v \in \{1, 2, \dots, R\}$ ,  $R$  – число спектральных каналов;

$M$  и  $N$  – ширина и высота изображения;

$\tilde{x}_{i,j,u} = x_{i,j,u} - \bar{x}_u$ ,  $\tilde{x}_{i,j,v} = x_{i,j,v} - \bar{x}_v$ ;

$x_{i,j,u}$  и  $x_{i,j,v}$  – значения пикселей с координатами  $(i, j)$  на изображениях каналов  $u$  и  $v$ ;

$\bar{x}_u$  и  $\bar{x}_v$  – математическое ожидание значений пикселей изображений для каналов  $u$  и  $v$ ;

$cov_u(i, j)$ ,  $cov_u(i, i)$  и  $cov_u(j, j)$  – элементы матрицы ковариации  $cov_u$  спектрального канала  $u$ .

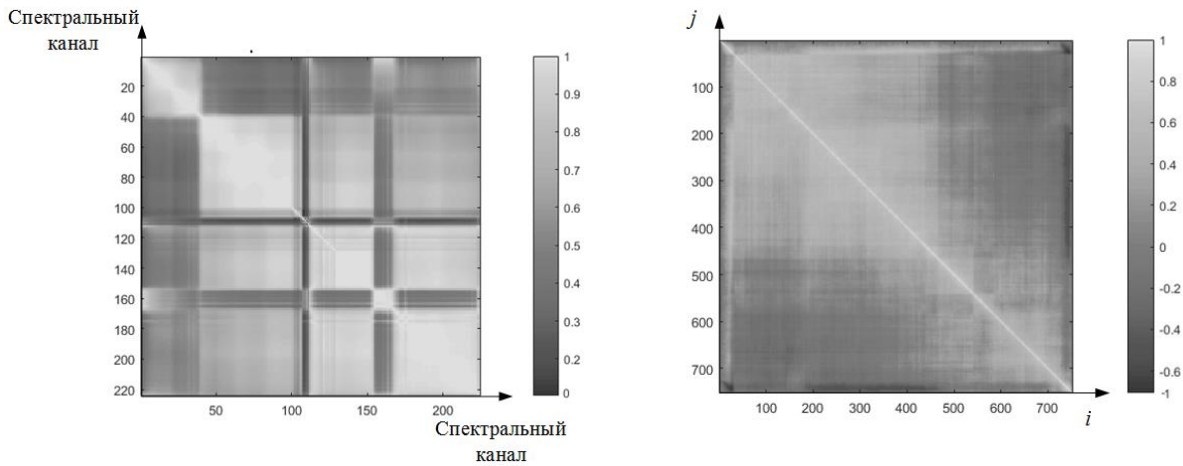
Пример матрицы корреляции данных гиперспектрального куба AVIRIS показан на рисунке 2, где изменение значений корреляции представлено полутоновым изображением (справа от изображения приведена легенда).

Анализ существующих алгоритмов сжатия на основе предсказания, поиска по таблице и вейвлет-преобразований, а также алгоритмов контекстного моделирования, применяемых в ДЗЗ, показал, что они не обеспечивают нужного качества сжатия и требуемой производительности при работе с гиперспектральными данными, полученными современными спектрометрами.

Показано, что для повышения качества сжатия разрабатываемые алгоритмы должны включать:

– декорреляцию данных, то есть уменьшение динамического диапазона входных значений;





*a* – спектральная, *б* – пространственная (для канала 43)

Рисунок 2. – Матрица корреляции для гиперспектрального куба Moffett Field

– контекстное моделирование, которое должно обеспечить предварительную подготовку и реструктуризацию битового потока для адаптации процесса сжатия к исходным данным и улучшению характеристик сжатия;

– энтропийное кодирование, осуществляющее кодирование данных на основе выбранной контекстной модели.

Во **второй** главе предложен блочно-субполосный вложенный алгоритм сжатия гиперспектральных данных на основе построения дерева значимости битовых плоскостей, общая схема которого представлена на рисунке 3.



Рисунок 3. – Общая схема работы блочно-субполосного вложенного алгоритма сжатия

Входными данными для алгоритма сжатия является поток данных, представляющий гиперспектральный куб.

Вначале выполняется настройка параметров:

- задается период  $t$  следования опорных изображений, который определяет разбиение куба по оси  $Z$  на блоки размером  $\left\lceil \frac{R}{t} \right\rceil$ ;
- задается размер фрагмента, на которые разбивается каждое изображение;
- определяется алгоритм декорреляции по оси  $Z$ ;
- определяется тип вейвлет-преобразования (Хаара, 9/7, 5/3) и его параметры;
- задается критерий, по которому прекращается сжатие (ограничение числа битовых плоскостей  $n$  от старшего к младшему либо достижение заданного значения PSNR в децибелах).

В соответствии с настройками выполняется восстановление трехмерной структуры (построение куба): выделяются опорные изображения, каждое изображение разбивается на фрагменты, равные  $2^r \times 2^r$ , где  $r$  – некоторое число. В результате формируется  $k$  блоков для сжатия (поток данных 1, 2, ...,  $k$ ), где  $k$  определяется по формуле

$$k = \left\lceil \frac{R}{t} \right\rceil \cdot \left\lceil \frac{M}{size} \right\rceil \cdot \left\lceil \frac{N}{size} \right\rceil,$$

где  $size = 2^r$  – размер стороны фрагмента, в пикселях,  $size < \min(M, N)$ ;  
 $\lceil val \rceil$  – ближайшее целое, большее или равное  $val$ .

Преимуществами предлагаемого перераспределения потока данных является:

- повышение устойчивости к ошибкам при передаче данных, так как сбой в алгоритме искажает сжатый поток, относящийся к конкретному блоку, и не влияет на остальные;
- возможность параллельной обработки всех блоков.

В качестве алгоритма декорреляции по оси  $Z$  используется вычитание опорного фрагмента из всех последующих фрагментов блока, к результату применяется дискретное вейвлет-преобразование, определенное при настройке.

Энтропийное кодирование с элементами контекстного моделирования основано на алгоритме SPIHT-3D, сущность которого заключается в кластеризации энергии и первоочередной обработке областей с большой энергией, что позволяет закодировать значимые коэффициенты в первую очередь. Блок-схема предложенного алгоритма энтропийного кодирования показана на рисунке 4. Отличительными особенностями алгоритма являются: применение пирамиды для быстрого поиска значимых вейвлет-коэффициентов относительно текущей битовой плоскости  $n$ , исключение рекурсивной обработки и списка незначимых коэффициентов (LIP – List of Insignificant Pixels) по сравнению с оригинальной версией алгоритма SPIHT-3D.

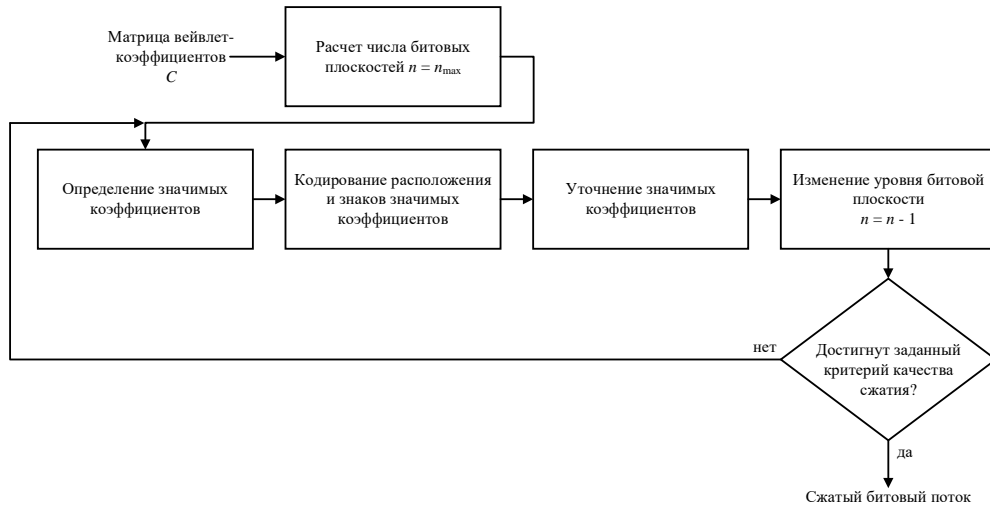


Рисунок 4. – Блок-схема энтропийного кодирования для вейвлет-коэффициентов

Пусть матрица  $C = \{c_{i,j}\}$  – матрица вейвлет-коэффициентов, на основе которой строится пирамида с корневым элементом размером  $2 \times 2$ . В основании пирамиды размещаются значения вейвлет-коэффициентов  $c_{i,j}$  (рисунок 5). Каждый последующий уровень аппроксимирует и детализирует вейвлет-коэффициенты, расположенные на предыдущих уровнях.

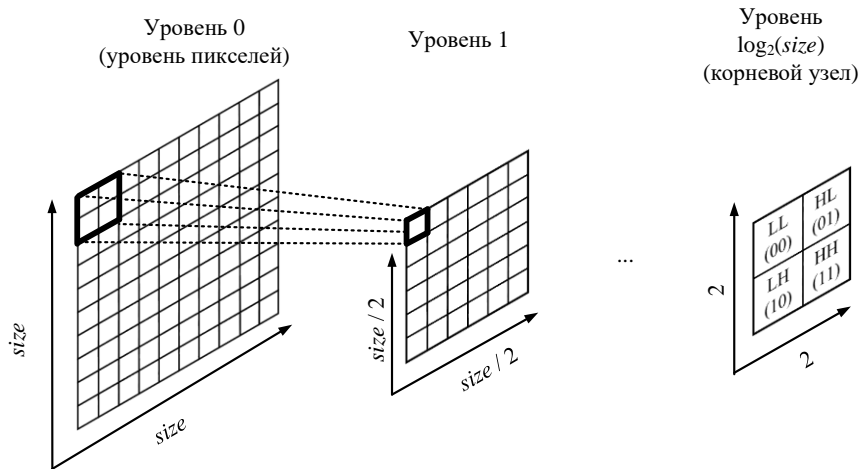


Рисунок 5. – Структура пирамиды

Некоторое множество частотных коэффициентов  $T$  называется значимым по отношению к битовой плоскости  $n$ , если выполняется условие

$$\max_{(i,j) \in T} \{|c_{i,j}|\} \geq 2^n,$$

где  $n \in \{1, 2, \dots, n_{max}\}$  – анализируемый уровень битовой плоскости;

$n_{max} = \lfloor \log_2(\max\{|c_{i,j}|\}) \rfloor$  – максимальное число бит кодового слова вейвлет-коэффициента (максимальный уровень битовой плоскости).

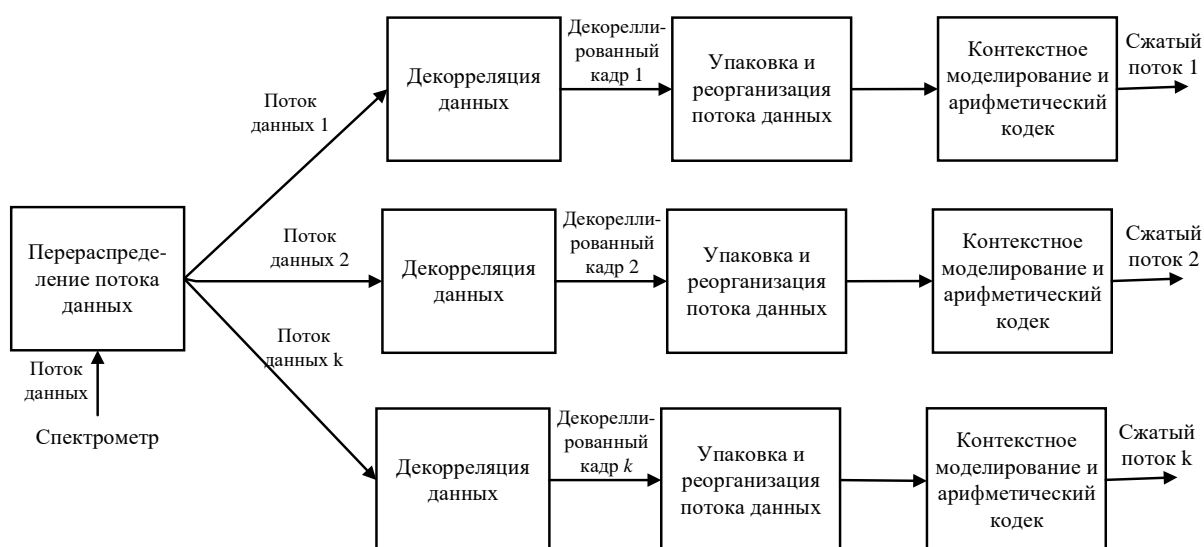
Сжатые потоки 1, 2, ...,  $k$  преобразуются в результирующий поток.

Основным преимуществом разработанного алгоритма сжатия является возможность работы как в режиме сжатия с потерями, так и в режиме сжатия без потерь за счет управления параметрами сжатия (типа вейвлет-преобразования и критерия, по которому будет прекращено сжатие).

Проведено тестирование и оценка следующих характеристик алгоритма: коэффициент сжатия, пропускная способность, затраты на хранение данных и пиковое соотношение сигнал-шум (PSNR) при восстановлении в случае сжатия с потерями. В качестве тестового набора использовались Фурье-интерферограммы (размер изображения –  $745 \times 1024$  пикселей, 256 каналов) и гиперспектральные данные традиционного формата – AVIRIS Maine (размер изображения –  $680 \times 512$  пикселей, 224 канала) и Hawaii (размер изображения –  $614 \times 512$  пикселей, 224 канала).

На основе проведенных тестов показано, что наибольший коэффициент сжатия с учетом пропускной способности и затрат на хранение данных достигается при размере фрагмента –  $128 \times 128$  пикселей, уровне вейвлет-преобразования – 4, с учетом межкадровой корреляции. При этих параметрах обеспечивается сжатие без потерь с коэффициентом сжатия около 2,1 (без учета опорных изображений) для обоих типов спектрометров, средний коэффициент сжатия с учетом опорных изображений – около 1,9 (период  $t$  между опорными изображениями – 10), при сжатии с потерями – около 6,1 для опорных изображений при значении PSNR более 45 дБ и 26,5 для последующих при значении PSNR более 49 дБ.

В третьей главе разработан алгоритм сжатия без потерь на основе вейвлет-преобразования и арифметического кодека с использованием трехмерного шаблона для контекстного моделирования последовательности бит (рисунок 6).



**Рисунок 6. – Общая схема работы алгоритма сжатия на основе контекстного моделирования**

Перераспределение потока аналогично тому, как это делается в блочно-субполосном вложенном алгоритме.

Для решения задачи декорреляции разработано оригинальное вейвлет-преобразование, псевдокод которого для одного уровня разложения представлен ниже.

---

### Алгоритм вейвлет-разложения

---

**Вход:** Полутоновое изображение *Image*, для которого ширина *Width* и высота *Height*.

**Выход:** Матрица вейвлет-коэффициентов *Result* для изображения *Image*.

```

1: middle ← Width / 2 // середина изображения по ширине
2: for h ← 1 ... Height do // перебор по высоте
3: | for w ← 1 ... middle do // перебор по ширине
4: | | tmpw,h ← Imagew*2+1,h - Imagew*2,h
5: | | tmpw+middle,h ← Imagew*2+1,h
6: middle ← Height / 2 // середина изображения по высоте
7: for h ← 1 ... middle do // перебор по высоте
8: | for w ← 1 ... Width do // перебор по ширине
9: | | Resultw,h ← tmpw,h*2+1 - tmpw,h*2
10: | | Resultw,h+middle ← tmpw,h*2+1

```

---

Если число уровней вейвлет-разложения больше 1, описанный алгоритм повторяется для нижней правой четверти изображения. Отличительными особенностями алгоритма является возможность полного восстановления и уменьшенное число операций в сравнении с традиционными вейвлет-преобразованиями (например, в 6 раз по сравнению с преобразование 5/3).

После декорреляции выполняется упаковка матрицы вейвлет-коэффициентов:

– если модуль значения коэффициента меньше 256, оно интерпретируется как однобайтовое;

– если модуль значения коэффициента больше или равен 256, оно маскируется кодом 0x01. Код 0x01 выбран в качестве маски, т.к. является недопустимой комбинацией после нормирования коэффициента

$$\hat{e}_i = \begin{cases} 2e_i, & e_i \geq 0, \\ 2|e_i| + 1, & e_i < 0, \end{cases}$$

где  $e_i$  – элемент  $i$  матрицы вейвлет-коэффициентов.

Для реорганизации потока разработан трехмерный шаблон переупорядочивания бит, основанный на предложенной модификации операции zig-zag в 3D пространстве. Основное отличие 3D версии заключается в том, что при изменении значений  $x$  или  $y$  в выходной поток последовательно передаются все элементы с координатами  $(x, y, z_0), (x, y, z_1), \dots, (x, y, z_{max-1})$ , где  $z_0$  и  $z_{max-1}$  – начальный и конечный спектральный каналы выбранного блока. Последовательность изменения координат  $x$  или  $y$  эквивалентна той, что применяется в 2D версии. В результате переупорядочивания формируется одномерный поток, к которому применяется арифметическое кодирование. Параметры кодирования (текущее значение вероятности, начальное значение интервала, кодируемый диапазон значений) определяются на основе контекстного моделирования, в котором выполняются следующие шаги:

**Шаг 1.** Из входного потока извлекается  $l$  бит, формирующих символ.

**Шаг 2.** Выбирается применяемая модель кодека (для этого выбран подход, в котором символ является индексом модели).

**Шаг 3.** Выполняется бинарное арифметическое кодирование в соответствии с параметрами для данной модели.

**Шаг 4.** Обновляются параметры выбранной модели.

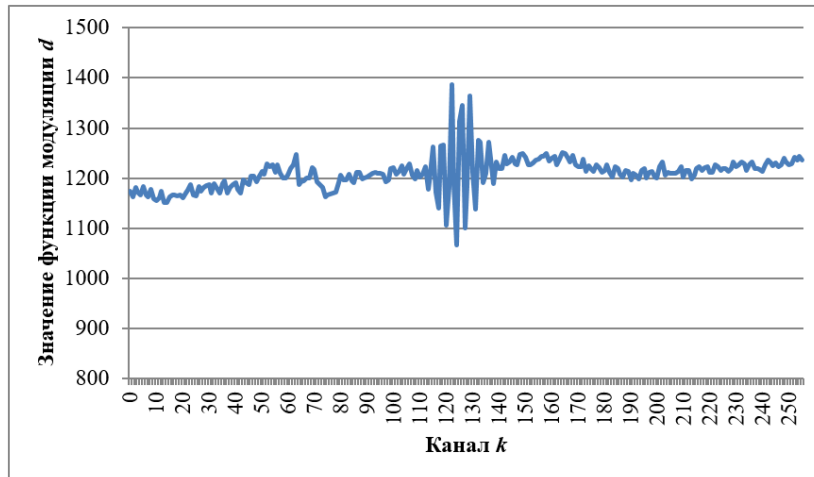
Для оценки эффективности алгоритма сжатия на основе контекстного моделирования проводились следующие тесты:

- влияние декорреляции по трем плоскостям гиперспектрального куба на коэффициент сжатия;
- влияние предварительной упаковки на коэффициент сжатия;
- влияние алгоритма контекстного моделирования и реорганизацией упакованного потока на коэффициент сжатия.

На основе проведенного тестирования определены рекомендуемые параметры для алгоритма сжатия на основе контекстного моделирования: размер фрагмента –  $128 \times 128$  пикселей, уровень вейвлет-преобразования – 5, учитывается межкадровая корреляция и выполняется упаковка данных. Достижимый коэффициент сжатия составляет 2,4 для Фурье-интерферограмм и 4,1 для классического гиперспектрального куба. Сравнение результатов с традиционными алгоритмами сжатия показывает сопоставимый коэффициент сжатия для Фурье-интерферограмм (достигает 2,4 в алгоритме LZMA) и более высокий коэффициент для данных AVIRIS (увеличение составляет около 2,8 % по сравнению с алгоритмами 7-Zip и LZMA).

Для экспериментальных исследований алгоритмов сжатия на более широкой тестовой выборке для адаптации алгоритмов сжатия под особенности современных Фурье-спектрометров разработан алгоритм синтеза Фурье-интерферограмм на основе данных, полученных в ОАО «Пеленг», суть которого состоит в модуляции исходных данных.

Для этого на каждом изображении из тестового набора выделяется участок размером  $4 \times 4$  пикселя с одними и теми же координатами. Выборка из 16 элементов усредняется и формируется вектор  $V = \langle d_k \rangle$ , где  $k$  – канал гиперспектрального изображения, для которого рассчитано среднее значение. Данный вектор формирует функцию модуляции (рисунок 7).



**Рисунок 7. – Функция модуляции**

Полученная функция используется для модуляции одного изображения из классического гиперспектрального куба

$$u_{i,j,k} = \left\lfloor \frac{v_{i,j} \cdot d_k}{d_{max}} \right\rfloor,$$

где  $u_{i,j,k}$  – значение пикселя  $(i, j)$  в канале  $k$  для модулированного куба;

$v_{i,j}$  – значение пикселя  $(i, j)$  выбранного изображения из гиперспектрального куба;

$d_k$  – значение функции модуляции для канала  $k$ ;

$d_{max}$  – максимальное значение в функции модуляции;

$\lfloor val \rfloor$  – ближайшее целое, меньшее или равное  $val$ .

Для синтеза тестовых интерферограмм выбирался спектральный канал с максимальной детализацией и широким динамическим диапазоном значений в гиперспектральном кубе AVIRIS Maine. Результаты тестирования алгоритма сжатия на основе полученных данных показывают коэффициент сжатия в идеальных условиях, составляющий около 8,9 и 6,2 в зависимости от функции модуляции. Однако следует ожидать, что при применении промышленных Фурье-спектрометров коэффициент сжатия без потерь будет находиться между 2,4 и 8,9, полученными на доступных интерферограммах и синтезированных данных соответственно.

В четвертой главе обобщены результаты экспериментальных исследований разработанных алгоритмов сжатия и определены области их предпочтительного использования, зависящие от способа получения данных и условий, при которых будет проводиться съемка. Сформулированы следующие рекомендации по применению алгоритмов.

1. Блочно-субполосный вложенный алгоритм сжатия эффективен при сжатии с потерями, в том числе управляемыми. Алгоритм ориентирован на сжатие гиперспектральных данных в традиционном формате. Не рекомендуется применять для сжатия Фурье-интерферограмм, так как искажения в интерферограмме приводят к искажениям по всему спектру при выполнении обратного Фурье-преобразования.

2. В условиях, когда велика вероятность потерь данных при передаче сигнала по радиоканалу (высокая зашумленность, интерференция волн), также эффективней обрабатывает блочно-субполосный вложенный алгоритм сжатия. При этом следует учитывать, что результаты тестирования показали, что искажение в значимых битах отражается на результирующем PSNR более существенно, таким образом, при кодировании значимых бит рекомендуется применять корректирующие коды.

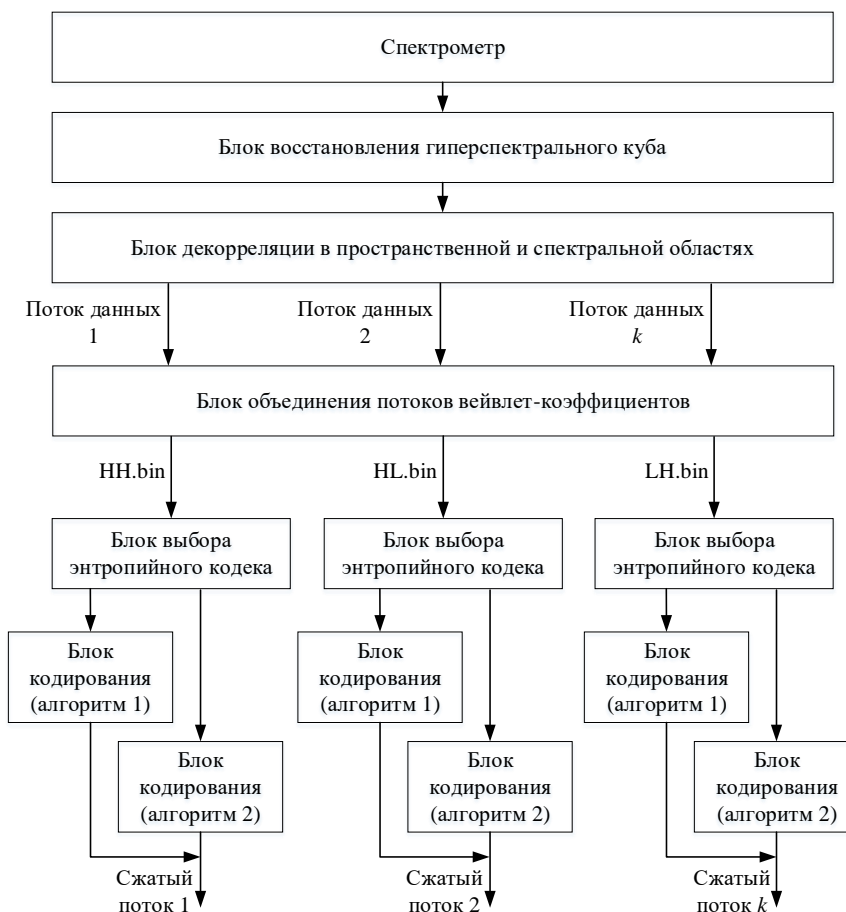
3. Рекомендуемые параметры для блочно-субполосного вложенного алгоритма сжатия: размер фрагмента –  $128 \times 128$  пикселей, уровень вейвлет-разложения – 4, учитывается межкадровая корреляция.

4. При необходимости аппаратной реализации наиболее подходящим является алгоритм сжатия на основе контекстного моделирования со следующими параметрами: размер фрагмента –  $128 \times 128$  пикселей, уровень вейвлет-разложения – 5, учитывается межкадровая корреляция и выполняется предварительная упаковка данных.

Эти рекомендации положены в основу методики сжатия, в рамках которой возможно управление коэффициентом сжатия и уменьшение вычислительной сложности за счет параметрической настройки алгоритмов, применения контекстного моделирования и адаптации к типу исходных данных (классический куб или Фурье-интерферограмма).

На основе представленной методики разработана структурная схема системы сжатия гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли (рисунок 8), реализованная на языке программирования C++ в среде разработки Microsoft Visual Studio 2017.





**Рисунок 8. – Структура системы сжатия**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработан параметрически настраиваемый алгоритм сжатия гиперспектральных данных на основе вейвлет-преобразования с построением дерева значимости битовых плоскостей и приоритетным удалением менее значимых. Проведенное тестирование алгоритма сжатия показало следующие результаты: при сжатии без потерь (без учета опорных кадров) коэффициент сжатия достигает 2,1 для обоих типов спектрометров, средний коэффициент сжатия с учетом опорных кадров (расстояние между опорными кадрами – 10 кадров) достигает 1,9, при сжатии с потерями – около 6,1 для опорных кадров при значении PSNR более 45 дБ и около 26,5 для последующих кадров при значении PSNR более 49 дБ [4, 16, 18, 19].

2. Разработан алгоритм сжатия без потерь гиперспектральных данных на основе вейвлет-преобразования и арифметического кодека с использованием трехмерного шаблона для контекстного моделирования последовательности бит. Достоинствами алгоритма являются высокий коэффициент сжатия, достигающий 4,1 и 2,4 в зависимости от типа спектрометра, возможность применения алгоритма

для разных типов спектрометров (классического гиперспектрального куба и Фурье-интерферограмм). Отсутствие операций с высокой латентностью при сжатии позволяет выполнить аппаратную реализацию алгоритма [2, 3, 5, 14].

3. Разработан алгоритм синтеза Фурье-интерферограмм на основе традиционного представления гиперспектральных данных в виде трехмерного массива, позволяющий проводить эксперименты с классическими гиперспектральными данными и адаптировать алгоритмы сжатия под особенности современных Фурье-спектрометров [6, 13, 15, 20].

4. Представлена методика сжатия гиперспектральных данных, основанная на рекомендациях использования разработанных алгоритмов сжатия, отличительной особенностью которой является возможность управления коэффициентом сжатия за счет параметрической настройки алгоритмов, применения контекстного моделирования и адаптации к типу исходных данных (классический куб или Фурье-интерферограмма); представлено обоснование возможности аппаратной реализации алгоритма сжатия без потерь гиперспектральных данных на основе вейвлет-преобразования и арифметического кодека [1, 17, 29].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Разработанный алгоритм сжатия без потерь гиперспектральных данных на основе вейвлет-преобразования и арифметического кодека может быть использован для сжатия изображений на борту летательного аппарата (спутника, самолета и т. д.) до их непосредственной отправки на Землю по радиоканалу. Параметрически настраиваемый алгоритм сжатия гиперспектральных данных на основе вейвлет-преобразования с построением дерева значимости битовых плоскостей может использоваться в условиях, когда вероятность искажения данных велика. Оба представленных алгоритма возможно адаптировать для применения к мультиспектральным снимкам.

Предложенная методика может быть использована при проектировании программно-аппаратных комплексов сжатия, характеризующихся высоким коэффициентом сжатия и низкой трудоемкостью обработки данных.

Полученные результаты могут быть использованы при подготовке студентов и магистрантов в высших учебных заведениях, проведении исследований по сжатию данных ДЗЗ.

Основные результаты диссертации внедрены в ОАО «Пеленг», ОИПИ НАН Беларуси и БГУИР. Внедрение подтверждает практическую значимость полученных результатов – увеличение коэффициента сжатия гиперспектральных данных ДЗЗ за счет контекстного моделирования последовательности бит и вейвлет-преобразований.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК

1. Перцев, Д. Ю. Модель системы сжатия гиперспектральных данных в задачах дистанционного зондирования Земли / Д. Ю. Перцев // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2015. – №5. – С. 21-23.
2. Перцев, Д. Ю. Алгоритм сжатия гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли / А. А. Дудкин, Д. Ю. Перцев // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусь. – 2017. – № 1. – С. 120-126.
3. Перцев, Д. Ю. Сжатие данных дистанционного зондирования Земли с применением контекстного моделирования / Д. Ю. Перцев, А. А. Дудкин // Вестник БрГТУ. – 2018. – №5. – С. 11-15.
4. Перцев, Д. Ю. Параметрически настраиваемый алгоритм сжатия гиперспектральных данных с применением вейвлет-разложения / Д. Ю. Перцев, А. А. Дудкин // Доклады БГУИР. – 2019. – № 1. – С. 26-31.

### Статьи в рецензируемых зарубежных изданиях

5. Перцев, Д. Ю. Алгоритм сжатия Фурье-интерферограмм / Д.Ю. Перцев, А. А. Дудкин, Л. П. Поденок // Приложение к журналу «Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ». – 2016. – С. 223-228.
6. Pertsau, D. Hyperspectral data compression framework for earth remote sensing objectives / A. A. Doudkin, L. P. Podenok, D. Y. Pertsau // Pattern Recognition and Image processing / Communications in Computer and Information Science // V. V. Krasnoproshin, S. V. Ablameyko (Eds): PRIP 2016, CCIS. – Berlin : Springer International Publishing, 2017. – P. 171-179.

### Статьи в сборниках материалов научных конференций

7. Pertsau, D. Predictive encoding techniques for lossless hyperspectral compression / D. Pertsau // XV International PhD Workshop OWD-2013 (Wisla, October 19-22, 2013). – Wisla : Silesian University of Technology, 2013. – P. 98-101.
8. Перцев, Д. Ю. Алгоритм сжатия гиперспектральных изображений на основе контекстного прогнозирования / Д. Ю. Перцев // Компьютерные системы и

сети : материалы 49-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов. (Минск, 6 – 10 мая 2013 года). – Мн. : БГУИР, 2013. – С. 41-42.

9. Перцев, Д. Ю. Алгоритм сжатия гиперспектральных изображений SPINT-3D с применением вейвлет-преобразования / Д. Ю. Перцев, С. Н. Свирский // Компьютерные системы и сети : материалы 49-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов. (Минск, 6 – 10 мая 2013 года). – Мн. : БГУИР, 2013. – С. 45.

10. Перцев, Д. Ю. Межканальная спектральная корреляция в задачах сжатия гиперспектральных изображений / Д. Ю. Перцев // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР (Минск, 18-19 марта 2014 года) : материалы конф. В 2 ч. Ч. 1. – Мн. : БГУИР, 2014. - С. 481-482.

11. Перцев, Д. Ю. Интеллектуальные информационные технологии в задачах сжатия данных дистанционного зондирования земли / А. А. Дудкин, Д. Ю. Перцев // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (19 ноября 2015 г., Минск): доклады XIV Междунар. конф. – Мн. : ОИПИ НАН Беларуси, 2015. – С. 83-86.

12. Перцев, Д. Ю. Основные подходы к сжатию гиперспектральных данных / Д. Ю. Перцев // Современные проблемы математики и вычислительной техники : сборник материалов IX Республиканской научной конференции молодых ученых и студентов (19-21 ноября 2015 г., Брест). – Бр. : БрГТУ, 2015. – С. 54-56.

13. Pertsau, D. Hyperspectral Data Compression Framework for Earth Remote Sensing Objectives / L. Podenok, D. Pertsau // PRIP'2016: Pattern Recognition and Information Processing : Proc. of the 13th Intern. Conf. (3-5 Oct. 2016, Minsk, Belarus). – Minsk : Publ. Center of BSU, 2016. – P. 182-184.

14. Перцев, Д. Ю. Алгоритм сжатия гиперспектральных данных на основе дискретного вейвлет-преобразования и предсказания / А. А. Дудкин, Д. Ю. Перцев // Седьмой Белорусский космический конгресс, 24-26 октября 2017 года: Минск : материалы конгресса : в 2 т. – т. 1. – С. 188-191.

15. Перцев, Д. Ю. Применение алгоритмов контекстного моделирования в задачах сжатия гиперспектральных данных, основанных на Фурье-интерферограммах / Д. Ю. Перцев // Молодежь в науке – 2017 : сб. материалов Междунар. конф. молодых ученых (Минск, 30 окт. – 2 нояб. 2017 г.). В 2 ч. Ч. 2. Гуманитарные, медицинские, физико-математические, физико-технические, химические науки. – Мн. : ОИПИ НАН Беларуси, 2018. – С. 179-187.

16. Перцев, Д. Ю. Блочно-субполосный вложенный алгоритм сжатия гиперспектральных данных дистанционного зондирования земли / Д. Ю. Перцев,

А. А. Дудкин // Цифровая обработка сигналов и теория кодирования : материалы научно-технического семинара, Минск, 26 апреля 2018 года. – Мн : БГУИР, 2018. – С. 78-82.

17. Pertsau, D. Compression of Earth Remote Sensing Hyperspectral Data Using Context Modeling / A. Doudkin, D. Pertsau // Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'2019): Proceedings of the 14th International Conference (May 21-23, Minsk, Republic of Belarus). – Minsk : Bestprint, 2019. – P. 139-142.

### **Тезисы докладов в сборниках материалов научных конференций**

18. Перцев, Д.Ю. Алгоритм сжатия Фурье-интерферограмм / А.А. Дудкин, Л.П. Поденок, Д.Ю. Перцев // Тезисы докладов Третьей международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли» (23 апреля 2015 г., Москва). – М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2015. – С. 125-126.

19. Перцев, Д. Ю. Алгоритм сжатия Фурье-интерферограмм на основе дискретного вейвлет-преобразования / Д.Ю. Перцев, А.А. Дудкин // Восьмая Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в промышленности» (ИТИ\*2015) : тезисы докладов (2-3 апреля 2015 года, Минск). – Мн. : ОИПИ НАН Беларуси, 2015. – С. 11-12.

20. Перцев, Д.Ю. Модель системы сжатия на основе синтеза Фурье-интерферограмм / А.А. Дудкин, Л.П. Поденок, Д.Ю. Перцев // Тезисы докладов Четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли» (19 мая 2016 г., Москва). – М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. – С. 141-143.

21. Перцев, Д. Ю. Алгоритм сжатия гиперспектральных данных на основе энтропийного кодирования / А. А. Дудкин, Д. Ю. Перцев // Тезисы докладов Пятой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли» (25 мая 2017 г., Москва). – М. : АО Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – С. 76-78.

22. Перцев, Д. Ю. Алгоритм сжатия гиперспектральных данных / Д.Ю. Перцев, А.А. Дудкин, Л.П. Поденок // Сборник тезисов 34-й ежегодной научно-технической конференции ОАО «Агат-системы управления» – управляющая компания холдинга «Геоинформационные системы управления» (2-3 мая 2017 г., Минск). – Мн. : ОАО «Агат», 2017. – С. 48-49.

23. Перцев, Д. Ю. Исследование алгоритмов контекстного моделирования в задачах сжатия гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли / А. А. Дудкин, Д. Ю. Перцев // Тезисы докладов Шестой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли» (24 мая 2018 г., Москва). – М. : АО Корпорация «ВНИИЭМ», 2018. – С. 80-81.

24. Перцев, Д. Ю. Подход к сжатию гиперспектральных данных / А. А. Дудкин, Д. Ю. Перцев // Тезисы докладов Седьмой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли» (13 мая 2019 г., Москва). – М. : АО Корпорация «ВНИИЭМ», 2019. – С. 88-90.

25. Перцев, Д. Ю. Система сжатия гиперспектральных данных / Д. Ю. Перцев // Десятая Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в промышленности» (ITI\*2019) : тезисы докладов (23-24 мая 2019 года, Минск). – Мн. : ОИПИ НАН Беларуси, 2019. – С. 165-166.



**РЭЗЮМЭ**

Перцаў Дзмітрый Юр'евіч

**Алгарытмы сціску гіперспектральных даных дыстанцыйнага  
зандзіравання Зямлі на аснове кантэкстнага мадэлявання**

**Ключавыя словы:** гіперспектральны малюнак, кантэкстнае мадэляванне, параметрычная налада, алгарытм сціску, дыстанцыйнае зандаванне Зямлі.

**Мэта даследаванняў:** павелічэнне каэфіцыента сціску гіперспектральных даных ДЗЗ за кошт кантэкстнага мадэлявання паслядоўнасці біт і вэйвлет-пераўтварэнняў.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** алгарытм сціску з стратамі гіперспектральных даных на аснове блочна-субпалоснага ўкладзенага алгарытму вэйвлет-разлажэння з пабудовай дрэва значнасці бітавых плоскасцяў і выдаленнем менш значных дазваляе дасягнуць каэфіцыент сціску каля 6,1 для 12-бітных зыходных дадзеных пры значэнні PSNR больш 45 дБ для апорных кадраў, і каля 26,5 для наступных кадраў пры значэнні PSNR больш 49 дБ; алгарытм сціску без страт гіперспектральных даных на аснове вэйвлет-раскладання і арыфметычнага кодэка з выкарыстаннем кантэкстнага мадэлявання паслядоўнасці біт дазваляе дасягнуць каэфіцыент сціску 4,1 і 2,1 для класічнага гіперкуба і для Фур'е-інтэрфераграм адпаведна; упершыню прапанаваны алгарытм генерацыі Фур'е-інтэрфераграм на аснове традыцыйнага прадстаўлення гіперспектральных даных у выглядзе трохмернага масіва для эксперыментальных даследаванняў алгарытму сціску на больш шырокай тэставай выбарцы.

**Ступень выкарыстання:** вынікі дысертацыйнай працы выкарыстаны ў комплексе лабараторных работ па дысцыпліне «Лічбавая апрацоўка сігналаў і малюнкаў» спецыяльнасці 1-40 02 01 «Вылічальныя машыны, сістэмы і сеткі», у АПП НАН Беларусі для распрацоўкі алгарытму сціску гіперспектральных дадзеных, у ААТ «Пеленг» пры выкананні задання ў рамках праграмы Саюзнай дзяржавы «Маніторынг-СД».

**Вобласць ужывання:** распрацаваныя алгарытмы сціску гіперспектральных даных магчыма выкарыстоўваць для сціску здымкаў як на борце лятальнага апарата (спадарожніка, самалёта і г.д.) да іх непасрэднай адпраўкі на Зямлю па радыёканале, так і ў цэнтры прыёму даных дыстанцыйнага зандзіравання Зямлі пры іх архівацыі.

## РЕЗЮМЕ

Перцев Дмитрий Юрьевич

### **Алгоритмы сжатия гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли на основе контекстного моделирования**

**Ключевые слова:** гиперспектральное изображение, контекстное моделирование, параметрическая настройка, алгоритм сжатия, дистанционное зондирование Земли.

**Цель работы:** увеличение коэффициента сжатия гиперспектральных данных ДЗЗ за счет контекстного моделирования последовательности бит и вейвлет-преобразований.

**Полученные результаты и их новизна:** алгоритм сжатия с потерями гиперспектральных данных на основе блочно-субполосного вложенного алгоритма вейвлет-разложения с построением дерева значимости битовых плоскостей и удалением менее значимых позволяет достигнуть коэффициент сжатия около 6,1 для 12-битных исходных данных при значении PSNR более 45 дБ для опорных кадров и около 26,5 для последующих кадров при значении PSNR более 49 дБ; алгоритм сжатия без потерь гиперспектральных данных на основе вейвлет-разложения и арифметического кодека с использованием контекстного моделирования последовательности бит позволяет достигнуть коэффициент сжатия 4,1 для классического гиперспектрального куба и 2,1 для Фурье-интерферограмм; впервые предложен алгоритм генерации Фурье-интерферограмм на основе традиционного представления гиперспектральных данных в виде трехмерного массива для экспериментальных исследований алгоритма сжатия на более широкой тестовой выборке.

**Степень использования:** результаты диссертационной работы использованы в комплексе лабораторных работ по дисциплине «Цифровая обработка сигналов и изображений» 1-40 02 01 «Вычислительные машины, системы и сети», в ОИПИ НАН Беларуси для разработки алгоритма сжатия гиперспектральных данных, в ОАО «Пеленг» при выполнении задания в рамках программы Союзного государства «Мониторинг-СГ».

**Область применения:** разработанные алгоритмы сжатия гиперспектральных данных могут использоваться как для сжатия снимков на борту летательного аппарата (спутника, самолета и т. д.) до их непосредственной отправки на Землю по радиоканалу, так и центрах приема данных дистанционного зондирования Земли при их архивации.



**SUMMARY**

Dmitry Y. Pertsau

**Algorithms of hyperspectral data compression based on context modeling for Earth remote sensing**

**Keywords:** hyperspectral image, context modeling, parametric tuning, compression algorithms, Earth remote sensing.

**Aim of the work:** to increase the compression ratio of hyperspectral remote sensing data using context modeling of bits sequence and wavelet transformation.

**Obtained results and their novelty:** a compression algorithm with loss of hyperspectral data based on a block-subband nested wavelet decomposition algorithm with building a tree of significance of bit planes and removing the least significant allows to achieve a compression ratio near 6.1 times for 12-bit source data with a PSNR more than 45 dB for reference frames, and near 26.5 times for subsequent frames with a PSNR more than 49 dB; the lossless hyperspectral data compression algorithm based on wavelet decomposition and arithmetic coder using context bit sequence modeling allows to achieve a compression ratio 4.1 and 2.1 times for the classical hypercube and for Fourier interferograms, respectively; an algorithm for Fourier interferograms generation based on the traditional hyperspectral data representation in the form of a 3D array for experimental studies of the compression algorithm on a wider test sample was proposed first time.

**Use guidelines:** the results of the thesis were used in the complex of laboratory works on the discipline «Digital signal and image processing» of the specialty 1-40 02 01 «Computers, systems and networks», at UIIP NAS of Belarus for the development of a hyperspectral data compression algorithm, in OJSC «Peleng» when performing the task within the Union State program «Monitoring-SG».

**Application area:** the developed compression algorithms for hyperspectral data can be used to compress images on an aircraft board (satellite, airplane, etc.) before they are sent directly to Earth via radio and in remote sensing control centers to store it.

*Научное издание*

**Перцев Дмитрий Юрьевич**

**АЛГОРИТМЫ СЖАТИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ  
КОНТЕКСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка  
информации

Подписано в печать .2019. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. . Уч. изд. л. . Тираж 60 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/238 от 24.03.2014,

№ 2/113 от 07.04.2014, № 3/615 от 07.04.2014.

ЛП № 02330/264 от 14.04.2014.

220013, Минск, П. Бровка, 6