

Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 004.932.1:528.8

**АЛЬМИЯХИ**  
**Осама Мажид Хилал**

**АДАПТИВНАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
НА ОСНОВЕ ДРЕВОВИДНЫХ СТРУКТУР**

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

по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка  
информации

Минск 2017

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

Научный руководитель **Конопелько Валерий Константинович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Липницкий Станислав Феликсович**, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник государственного научного учреждения «Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси»  
**Пальцев Александр Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, главный научный сотрудник научно-производственного общества с ограниченной ответственностью «ОКБ ТСП»

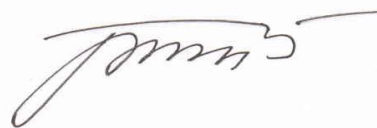
Оппонирующая организация **Белорусский национальный технический университет**

Защита состоится «14» декабря 2017 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 «08» ноября 2017 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций, кандидат технических наук, доцент



М. П. Ревотюк

## **КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ**

Сегментация является одной из наиболее сложных процедур обработки изображений, направленной на разделение пикселей на группы с учетом их пространственной корреляции. Во многих случаях важно согласование вычислительной сложности алгоритмов сегментации с доступными для обработки изображений ресурсами. При этом допускается уменьшение точности сегментации, не приводящее к существенному снижению качества последующей обработки. В таких условиях необходимо использовать адаптивные алгоритмы сегментации, реализуемые на доступной элементной базе и обеспечивающие выделение областей на изображениях с допустимой ошибкой. Особенно важна адаптация для бортовых систем видеообработки беспилотных летательных аппаратов воздушного и космического базирования, постоянное совершенствование которых приводит к быстрому росту пространственного, временного, частотного и битового разрешения изображений земной поверхности, и, следовательно, увеличению формируемых объемов видеоданных в условиях жестко ограниченных вычислительных ресурсов. Известные алгоритмы сегментации не обеспечивают адаптацию к вычислительным ресурсам. В них не предусмотрена возможность повышения скорости обработки или сокращения объема используемой оперативной памяти за счет увеличения ошибки сегментации. Таким образом, актуальной является задача разработки адаптивных алгоритмов сегментации, обеспечивающих разделение изображений на однородные области с приемлемой ошибкой сегментации в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Данная задача может быть решена за счет: а) прерывания процесса сегментации при исчерпании вычислительных ресурсов с выделением основных областей изображения, обеспечивающим приемлемую ошибку определения их границ; б) уменьшения числа обрабатываемых пикселей в результате прореживания строк и столбцов изображения и выбора шага прореживания с учетом доступных вычислительных ресурсов и приемлемой ошибки сегментации.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами, темами**

Тема диссертационной работы соответствует пункту 5.4 приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 585 от 19 апреля 2010 г. «Математические и интеллектуальные методы, информационные технологии и системы распознавания и обработки образов, сигналов, речи и мультимедийной информации», а также пункту 5

приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 190 от 12 марта 2015 г. «Информатика и космические исследования».

Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках НИР ГБ 11-2033 «Разработка и исследование методов и технологий построения мультисервисных локальных мобильных сетей» (2011–2015 гг.) и НИР ГБ 16-2033 «Исследование методов обработки и передачи видеоданных в инфокоммуникациях» (2016–2020 гг.).

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является развитие методов и разработка адаптивных алгоритмов сегментации, обеспечивающих разделение изображений на однородные области с приемлемой ошибкой сегментации в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие задачи:

- разработаны метод и алгоритмы пиксельной сегментации на основе древовидного разделения, слияния и выращивания областей, обеспечивающие выделение наиболее значимых сегментов в различных частях изображения и компактное представление результатов сегментации с приемлемой ошибкой в условиях ограниченных вычислительных ресурсов за счет вложенного кодирования областей и возможности прерывания процесса сегментации;

- разработаны алгоритмы блочной сегментации на основе древовидного разделения, слияния и выращивания областей, обеспечивающие уменьшение числа обрабатываемых пикселей с учетом ограниченных вычислительных ресурсов и приемлемой ошибки сегментации за счет прореживания строк и столбцов изображения с помощью древовидных квадросеток с изменяемым размером ячеек.

### **Научная новизна**

1. Разработан алгоритм пиксельной сегментации изображений на основе древовидного разделения и слияния областей, использующий вложенное кодирование структуры квадродерева, описывающей положения и формы сегментов, для повышения компактности ее представления с учетом приемлемой ошибки сегментации и адаптации к ограниченной емкости памяти.

2. Предложен метод пиксельной сегментации изображений на основе древовидно-волнового выращивания областей, использующий поиск одинаковых

равноудаленных пикселей в октодереве, описывающем положения и формы наиболее значимых сегментов, для обеспечения возможности прерывания процесса сегментации с учетом приемлемой ошибки и адаптации к ограниченному времени обработки.

3. Разработаны алгоритмы блочной сегментации изображений на основе древовидного разделения, слияния и древовидно-волнового выращивания областей, использующие квадросетки с изменяемым размером ячеек для сокращения числа обрабатываемых пикселей с учетом приемлемой ошибки сегментации и адаптации к ограниченным вычислительным ресурсам.

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

1. Алгоритм пиксельной сегментации изображений, основанный на древовидном разделении и слиянии областей, отличающийся вложенным кодированием структуры квадродерева, описывающего положения и формы сегментов, возможностью прерывания процесса кодирования и ограничения объема вложенного кода с учетом приемлемой ошибки сегментации для адаптации к ограниченной емкости памяти, что позволило по сравнению с алгоритмом на основе разделения и слияния областей уменьшить объем представления результатов сегментации до 4,5 раз при величине ошибки квантования до 3 бит/пиксель.

2. Метод пиксельной сегментации изображений, основанный на древовидно-волновом выращивании областей, отличающийся использованием октодерева при поиске одинаковых равноудаленных пикселей и прерыванием процесса обработки при обеспечении приемлемой ошибки сегментации для адаптации к ограниченному времени сегментации, что позволило по сравнению с методом на основе разделения и слияния областей повысить чувствительность к перепадам яркости до 11 % при снижении стабильности результатов сегментации до 3,5 раз в условиях изменения контраста изображения.

3. Алгоритмы блочной сегментации изображений, основанные на древовидном разделении, слиянии и древовидно-волновом выращивании областей, отличающиеся использованием квадросеток с изменяемым размером ячеек для сокращения числа обрабатываемых пикселей с учетом приемлемой ошибки сегментации и адаптации к ограниченным вычислительным ресурсам, что позволило при увеличении шага квадросетки до 9 пикселей уменьшить объем входных данных до 20 раз и повысить скорость сегментации до 77 раз при увеличении ошибки сегментации до 5 раз по сравнению с алгоритмами сегментации на основе разделения, слияния и выращивания областей.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Содержание диссертации отображает личный вклад автора. Он заключается в научном обосновании методов и алгоритмов сегментации для обработки изображений, постановке и проведении экспериментов по исследованию характеристик, оценке эффективности разработанных методов и алгоритмов, обработке и анализе полученных результатов, формулировке выводов.

Определение целей и задач исследований, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем д-м техн. наук В. К. Конопелько и д-м техн. наук В. Ю. Цветковым.

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

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XII, XIV Белорусско-российские научно-технические конференции «Технические средства защиты информации» (Минск, 2014, 2016); XIII, XV Международные конференции «Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации» (Минск, 2014, 2016); Международные научно-технические семинары «Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных» (Минск, 2014–2016); III Международная научно-практическая конференция «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, 2015); Second Engineering Scientific Conference (Iraq, Diyala, 2015); III Международная научно-практическая конференция «Технологии информатизации и управления» (Гродно, 2016); Al-Sadiq International conference on Multidisciplinary in IT and Communication Science and Technologies (Iraq, Baghdad, 2016); Научно-техническая конференция БНТУ «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2016); X Международная научно-техническая конференция «Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии» (Минск, 2016); III Международная научно-практическая конференция «Big Data and Advanced Analytics» (Минск, 2017).

Результаты диссертационной работы использованы при эскизном проектировании системы видеорегистрации объектов в ООО «Интеллектуальные процессоры» и лабораторном курсе по дисциплине «Обработка, кодирование и передача изображений в телевизионных системах» специальности «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» магистратуры в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

## **Опубликование результатов диссертации**

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 18 печатных работ, в том числе 6 статей в научных журналах общим объемом 2,5 авторских листа; 9 статей и 3 тезисов в сборниках и материалах конференций.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и шести приложений.

Общий объем диссертационной работы составляет 311 страниц, из них 86 страниц текста, 108 рисунков на 46 страницах, 15 таблиц на 5 страницах, список использованных библиографических источников (142 наименования на 12 страницах), список публикаций автора по теме диссертации (18 наименований на 3 страницах), 6 приложений на 144 страницах.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

Во **введении** определены основные направления исследований, обоснована актуальность темы диссертации, показана необходимость проведения исследований, связанных с разработкой методов и алгоритмов сегментации изображений в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

В **первой главе** приведены результаты анализа базовых методов сегментации изображений и их модификаций.

Показано, что базовые методы сегментации на основе пороговой обработки имеют низкую вычислительную сложность и высокое быстродействие, но не эффективны для сегментации сложных изображений, игнорируют пространственные связи между пикселями, чувствительны к шуму. Метод сегментации на основе выращивания областей обеспечивает однозначную сегментацию, занимает второе место по вычислительной сложности и быстродействию после методов пороговой сегментации, но имеет высокую вероятность ошибки сегментации изображений с плавными изменениями яркости. Методы сегментации на основе разделения и слияния областей имеют более высокую вычислительную сложность по сравнению с методами, основанными на выращивании областей и пороговой обработке, и высокую вероятность пересегментации. Методы сегментации на основе кластеризации требуют предварительного определения признаков для классификации элементов изображений и имеют высокую вероятность пересегментации. Методы сегментации на основе водораздела имеют узкую область применения, ограниченную изображениями с

небольшими вариациями уровней яркости и малыми значениями градиента, чувствительны к шуму, сегментируют с ошибками неоднородные изображения, не разделяемые четко на объекты и фон. Общим недостатком базовых методов сегментации является отсутствие возможности адаптации к ограниченным вычислительным ресурсам с учетом приемлемой ошибки сегментации.

Модификации пороговых методов ориентированы в основном на повышение точности сегментации в условиях шума, имеют низкую вычислительную сложность, но приводят к пересегментации, ограничивающей область их применения. Модификации метода выращивания областей ориентированы в основном на повышение точности и скорости сегментации, устойчивости к шуму и компактное представление результатов сегментации. Модификации методов сегментации на основе разделения и слияния областей ориентированы в основном на повышение точности сегментации, реализацию классификации и распознавания объектов. Модификации методов сегментации на основе водораздела сфокусированы в основном на повышении эффективности обработки технологических изображений и имеют узкую область применения. Общим недостатком модификаций базовых методов сегментации является увеличение вычислительной сложности и отсутствие возможности адаптации к ограниченным вычислительным ресурсам с учетом приемлемой ошибки сегментации.

На основе анализа методов эффективного кодирования нулевого дерева установлено, что адаптация методов сегментации, основанных на выращивании, разделении и слиянии областей, к ограниченным вычислительным ресурсам с учетом допустимой ошибки сегментации возможна за счет использования древовидных структур, обеспечивающих компактность представления результатов сегментации с помощью вложенного кодирования, равномерную сегментацию всего изображения с возможностью прерывания процесса обработки с формированием наиболее значимых и потерей мелких сегментов, переход от пиксельной обработки к блочной с прореживанием пикселей изображения с помощью квадратов.

Во **второй главе** описаны разработанные алгоритм и метод пиксельной сегментации изображений на основе древовидного разделения, слияния и волнового выращивания областей.

Алгоритм пиксельной сегментации изображений, основанный на древовидном разделении и слиянии областей, отличается от известного алгоритма разделения и слияния областей использованием вложенного кодирования структуры квадродерева, описывающего положения и формы сегментов, возможностью прерывания процесса кодирования и ограничением объема вложенного кода с учетом приемлемой ошибки сегментации. Алгоритм включает три этапа обработки, в процессе которых осуществляются древовидная кластеризация однородных по яркости областей пикселей и формирование множества кратномасштабных кластерных образов исходного изображения (прямая кластеризация), присвоение номеров кластеризованным однородным



областям на всех уровнях кратномасштабного представления исходного изображения и поиск избыточных границ однородных областей (прогрессивная обратная кластеризация); объединение соседних однородных по яркости кластеризованных областей (уточнение границ сегментов). Основу алгоритма составляет множество  $\{C(l)\}_{(l=\overline{0,L})}$  матриц  $C(l) = \left\| c^{(l)}(y,x) \right\|_{(y=\overline{0,Y/2^l-1}, x=\overline{0,X/2^l-1})}$  кластеризации, формируемое на основе множества  $\{A(l)\}_{(l=\overline{0,L})}$  матриц

$A(l) = \left\| a^{(l)}(y,x) \right\|_{(y=\overline{0,Y/2^l-1}, x=\overline{0,X/2^l-1})}$  аппроксимации с помощью выражений

$$\forall (j=\overline{0,1}) \forall (i=\overline{0,1}) \left( a^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = a^{(l)}(y,x) \right) \wedge \left( c^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = 0 \right) \Rightarrow \left( c^{(l)}(y,x) \leftarrow 0 \right), \quad (1)$$

$$\exists (j=\overline{0,1}) \exists (i=\overline{0,1}) \left( a^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) \neq a^{(l)}(y,x) \right) \vee \left( c^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = 1 \right) \Rightarrow \left( c^{(l)}(y,x) \leftarrow 1 \right) \quad (2)$$

при  $y = \overline{0, Y/2^l - 1}$ ,  $x = \overline{0, X/2^l - 1}$ ,  $l = \overline{1, L-1}$ ,

где  $a^{(l)}(y,x) = \frac{1}{4} \sum_{j=0}^1 \sum_{i=0}^1 a^{(l-1)}(2y+j, 2x+i)$  ( $a^{(0)}(y,x) \leftarrow p(y,x)$  при  $y = \overline{0, Y-1}$ ,

$x = \overline{0, X-1}$ );  $\leftarrow$  – операция присваивания;  $p(y,x)$  – пиксель сегментируемого изображения  $P = \left\| p(y,x) \right\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ ;  $Y = 2^{f_Y}$ ,  $X = 2^{f_X}$  – размеры сегментируемого

изображения  $P$ ;  $f_Y > 0$ ,  $f_X > 0$  – целые;  $l = \overline{0, L}$  – номер итерации (уровня) сегментации;  $L = \min(f_Y, f_X)$  – число итераций.

Алгоритм обеспечивает адаптацию к ограниченной емкости  $S_L$  памяти с учетом приемлемой ошибки  $E_L$  сегментации в результате проверки условия  $(S_A(l) < S_L) \vee (E_A(l) > E_L)$  (рисунок 1), где  $S_A(l)$  – объем памяти, занимаемый переменными алгоритма на  $l$ -й итерации (при инициализации  $S_A(l) \leftarrow 0$ );  $E_A(l)$  – ошибка сегментации на  $l$ -й итерации. Невыполнение данного условия вызывает прерывание процесса сегментации и приводит к ошибке сегментации  $E_A(l)$ . Ее точная оценка требует восстановления изображения в полном размере с использованием средней яркости сегментов и сравнения с исходным изображением. Восстановление средней яркости сегментов осуществляется с помощью матриц  $\{A(l)\}_{(l=\overline{0,L})}$  и не требует дополнительной емкости оперативной памяти. По сравнению с алгоритмом на основе разделения и слияния областей предложенный алгоритм позволяет уменьшить объем представления результатов сегментации до 4,5 раза при величине ошибки квантования до 3 бит/пиксель (рисунок 2).

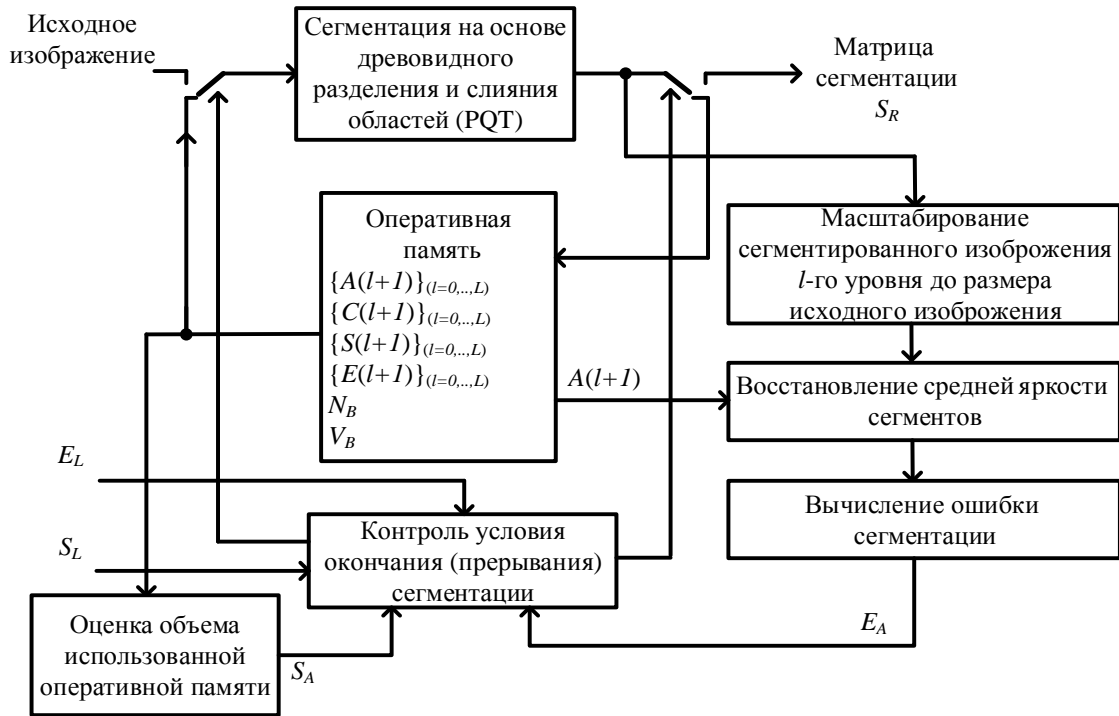


Рисунок 1. – Схема пиксельной сегментации изображений на основе древовидного разделения и слияния областей

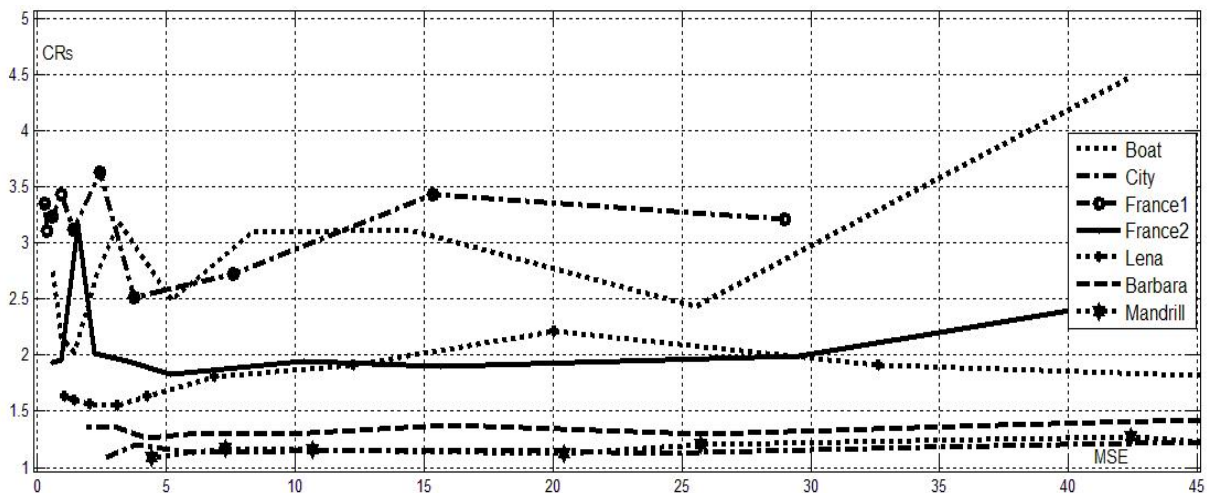


Рисунок 2. – Зависимости коэффициента сжатия сегментированных изображений от среднеквадратической ошибки квантования исходных изображений

Сущность метода пиксельной сегментации изображений на основе древовидно-волнового выращивания областей заключается в использовании октодеревя при поиске одинаковых равноудаленных пикселей и прерывании процесса обработки при обеспечении приемлемой ошибки сегментации. Это обеспечивает разделение областей с плавным перепадом яркости, которые известные методы сегментируют с ошибками, и адаптацию к ограниченному времени сегментации. Основу алгоритма древовидно-волнового выращивания областей составляет цикл перебора выращиваемых областей. С каждым циклом перебора размеры сегментов постепенно увеличиваются. Окрестный пиксель  $i(y_A, x_A)$  присоединяется к выращиваемой области, если абсолютное значение разности значений текущего выращиваемого

пикселя  $i(y_B, x_B)$  и текущего окрестного пикселя  $i(y_A, x_A)$  удовлетворяет условию  $|i(y_B, x_B) - i(y_A, x_A)| < \Delta_G$ , где  $\Delta_G$  – заданный порог.

Алгоритм обеспечивает адаптацию к ограниченному времени  $T_L$  сегментации с учетом приемлемой ошибки  $E_L$  сегментации в результате проверки условия  $(T_A < T_L) \vee (E_A > E_L)$  (рисунок 3), где  $T_A$  – время выполнения алгоритма (при инициализации алгоритма  $T_A$  обнуляется);  $E_A = YX - C_{SM}$  – ошибка сегментации;  $C_{SM}$  – число сегментированных пикселей. Невыполнение данного условия вызывает прерывание сегментации и приводит к ошибке  $E_A$ .

В случае прерывания алгоритма при ограниченном времени обработки доминирующие области оказываются равномерно сегментированы. Это позволяет при необходимости: а) интерполировать несегментированные области; б) предсказать положение границ в несегментированных областях; в) определить число, местоположение и оценить размеры объектов интереса. Установлено, что предложенный метод обеспечивает повышение чувствительности сегментации к перепадам яркости на 1,6 % по сравнению с методом на основе выращивания областей и на 11 % по сравнению с методом разделения и слияния областей. При этом предложенный метод проигрывает в стабильности площадей сегментов до 7 раз и 6 раз по сравнению с методом сегментации на основе выращивания областей и до 3 и 3,5 раза по сравнению с методом сегментации на основе разделения и слияния областей при изменении яркости и контраста изображения. На рисунке 4 приведены зависимости числа сегментов от изменения яркости и контраста изображения ДЗЗ, характеризующие устойчивость результатов сегментов.

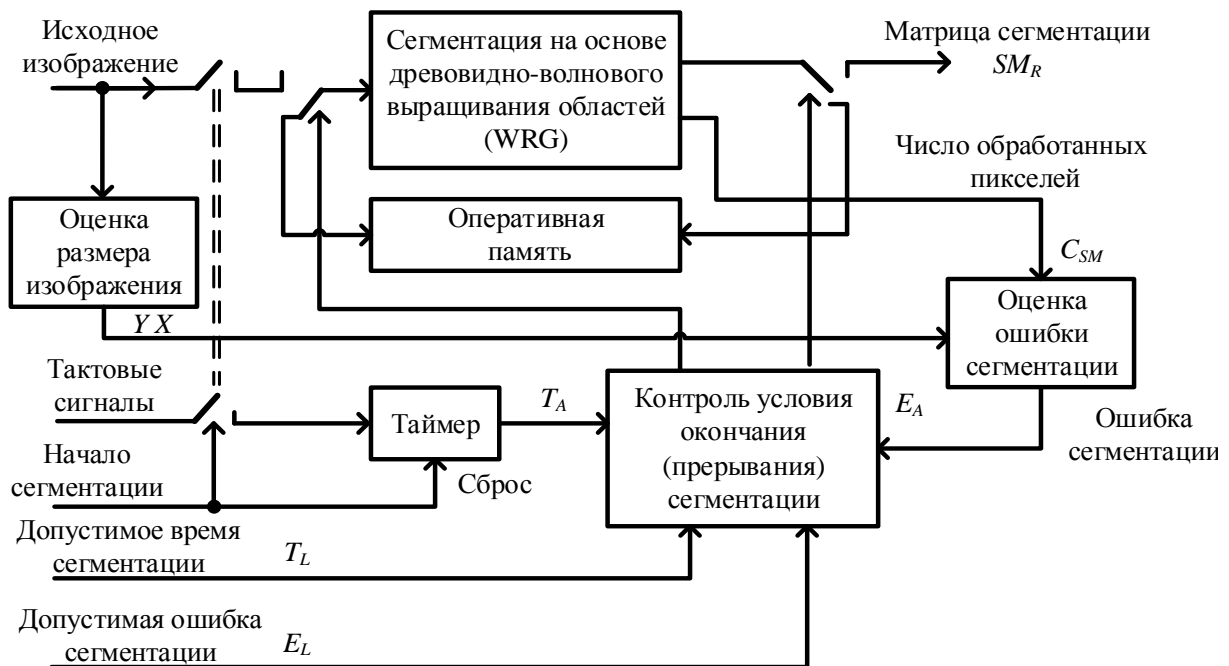
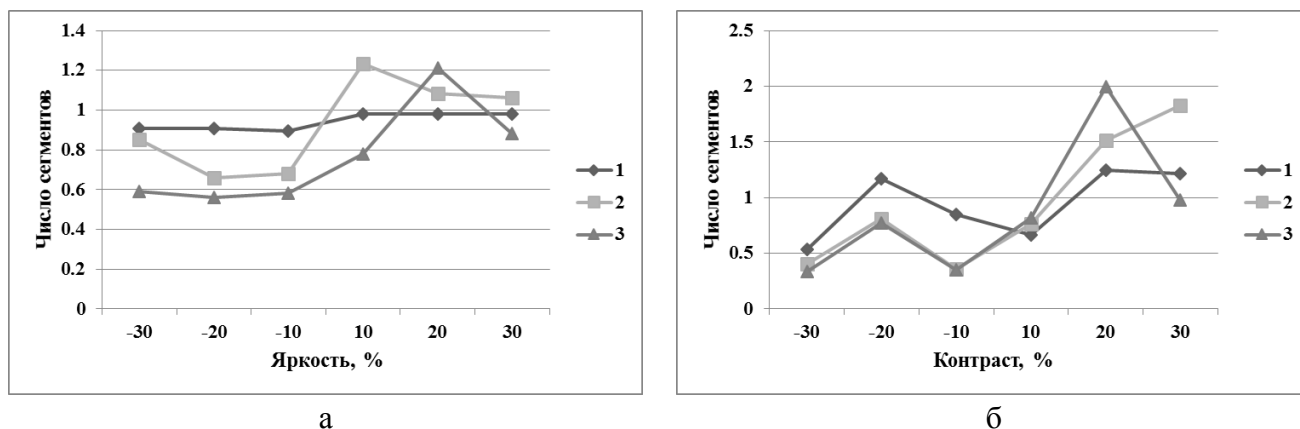


Рисунок 3. – Схема пиксельной сегментации изображений на основе древовидно-волнового выращивания областей



1 – предложенный метод; 2 – выращивания областей; 3 – разделения и слияния областей  
а – при изменении яркости; б – при изменении контраста

Рисунок 4. – Зависимости числа сегментов от изменения условий формирования изображения

Из рисунка 4 следует, что при изменении яркости и контраста изображения предложенный метод выигрывает в стабильности числа сегментов до 3,6 и 4,5 раза по сравнению с методом сегментации на основе выращивания областей и до 4,5 и 4,4 раза по сравнению с методом сегментации на основе разделения и слияния областей.

В третьей главе приведено описание разработанных алгоритмов разделения областей на основе узловых и сплошных квадросеток пикселей, алгоритмов блочной сегментации изображений на основе древовидного разделения, слияния и древовидно-волнового выращивания областей с использованием квадросеток.

Алгоритмы разделения областей на основе узловых и сплошных квадросеток обеспечивают ускорение сегментации изображений и адаптацию к вычислительным ресурсам за счет выбора шага сетки и возможности прерывания процесса сегментации (рисунок 5).

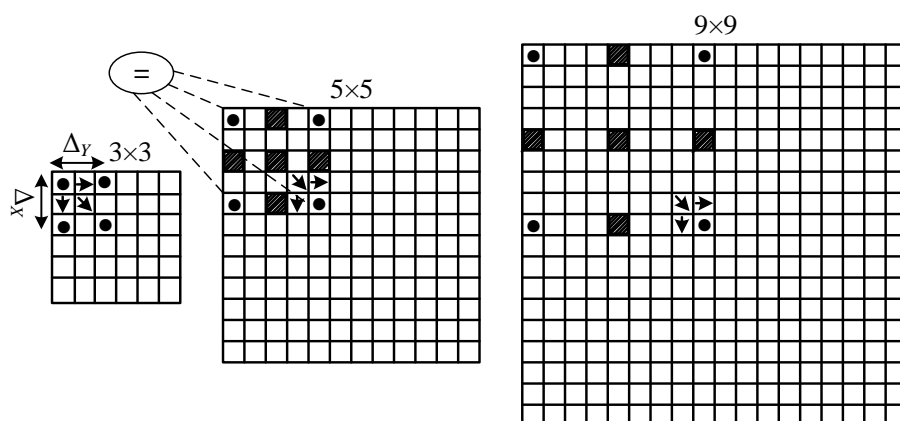


Рисунок 5. – Схема обработки элементов узловой квадросетки

В таблице 1 приведены зависимости времени сегментации для алгоритмов на основе узловой квадросетки и выращивания областей от шага сетки для тестовых изображений размером 512×512 и 1024×1024 пикселей. Как следует из данных

таблицы 1, при увеличении шага сетки от 2 до 16 алгоритм сегментации на основе узловых квадратов по сравнению с алгоритмом выращивания областей обеспечивает выигрыш в скорости сегментации от 2,7 до 4,5 раза для изображений размером  $512 \times 512$  пикселей и от 2,1 до 2,5 раза для изображения размером  $1024 \times 1024$  пикселей. При этом ошибка сегментации увеличивается в 2,6 и 3,7 раза для изображений размером  $512 \times 512$  и  $1024 \times 1024$  пикселей соответственно.

Таблица 1. – Зависимости времени сегментации от шага квадратовки

Алгоритм сегментации	Время сегментации (с) для различных шагов $\Delta$ сетки (пикселей)							
	Изображение $512 \times 512$ пикселей				Изображение $1024 \times 1024$ пикселей			
	$\Delta = 2$	$\Delta = 4$	$\Delta = 8$	$\Delta = 16$	$\Delta = 2$	$\Delta = 4$	$\Delta = 8$	$\Delta = 16$
На основе узловых квадратов	0,31	0,26	0,21	0,19	1,4	1,37	1,28	1,19
Выращивания областей	0,863				2,97			

Алгоритмы блочной сегментации изображений на основе древовидного разделения, слияния и древовидно-волнового выращивания областей отличаются использованием древовидных квадратов с изменяемым размером ячеек. Для адаптации алгоритмов к ограниченной емкости  $S_L$  оперативной памяти с учетом приемлемой ошибки  $E_L$  сегментации шаги  $\Delta_Y$  и  $\Delta_X$  квадратовки выбираются таким образом, чтобы размеры  $Y = Y_F / \Delta_Y$  и  $X = X_F / \Delta_X$  прореженного изображения обеспечили выполнение условия  $(S_N(Y, X) \leq S_L) \wedge (E_N(Y, X) \leq E_L)$  (рисунки 6, 7), где  $S_N(Y, X)$  – объем памяти, занимаемый переменными алгоритма;  $E_N(Y, X) = Y_F X_F - YX$  – ошибка сегментации;  $Y_F X_F$  – размер исходного изображения. Схема блочной сегментации изображений на основе древовидно-волнового выращивания областей аналогична схеме, приведенной на рисунке 6, но отличается структурой модуля сегментации (рисунок 7).

В алгоритме блочной сегментации изображений на основе древовидного разделения и слияния областей значение  $S_N(Y, X)$  вычисляется с помощью выражения

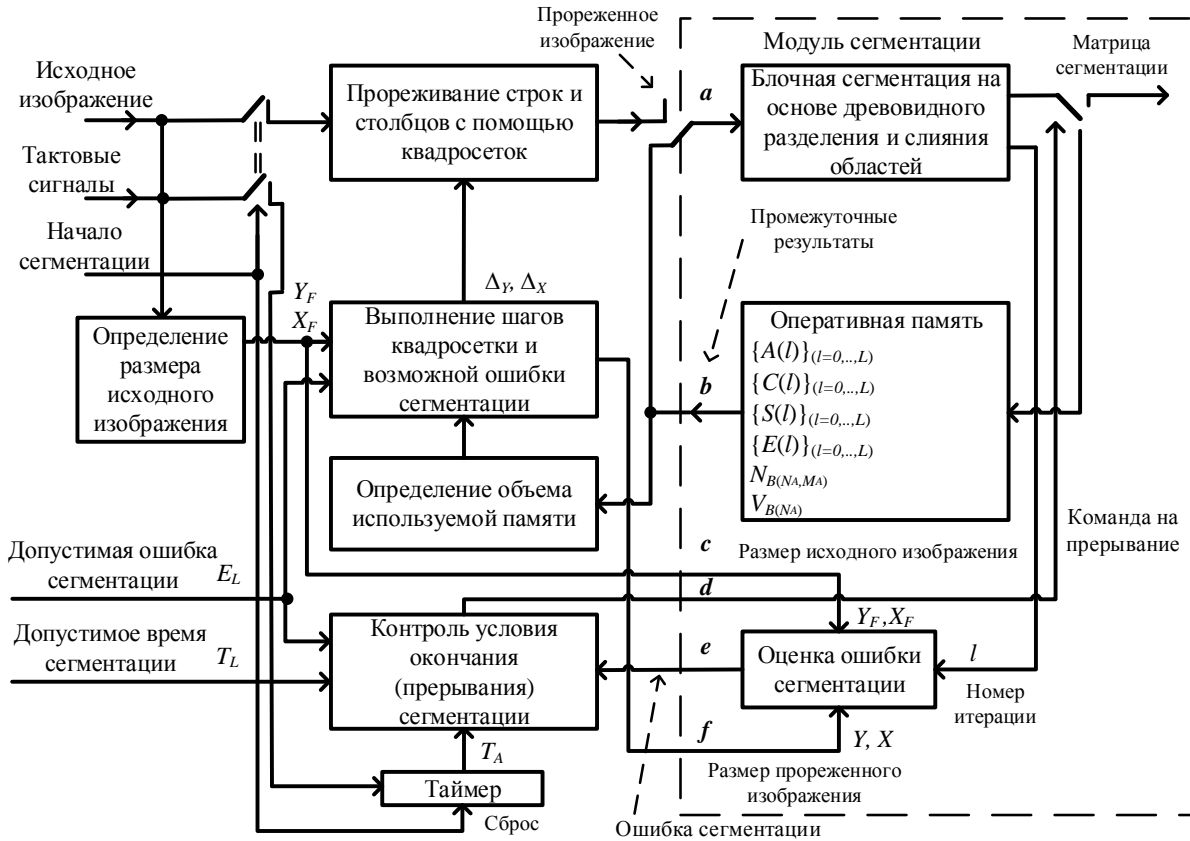
$$S_N(Y, X) = 2YX (17 + \lceil \log_2(YX) \rceil) + N_A M_A \lceil \log_2(N_A M_A) \rceil + N_A \lceil \log_2(N_A) \rceil (\text{бит}), \quad (3)$$

где  $\lceil \rceil$  – операция округления с избытком;  $N_A$  – число однородных областей;  $M_A$  – число одинаковых по яркости смежных областей.

В алгоритме блочной сегментации изображений на основе древовидно-волнового выращивания областей значение  $S_N(Y, X)$  вычисляется с помощью выражения

$$S_N(Y, X) \approx (YX + 2Z_{CM}) \lceil \log_2(YX) \rceil + Y_F X_F \left( 2 \left( 1 + \lceil \log_2(Y_F) \rceil + \lceil \log_2(X_F) \rceil \right) + K_{BM} (\log_2(Y) + \log_2(X)) \right) \text{ (бит)}, \quad (4)$$

где  $K_{BM}$  – число начальных точек роста;  $Z_{CM}$  – размер стека коллизий, используемого для обнаружения сегментов с одним уровнем яркости и разными номерами.



**Рисунок 6. – Схема блочной сегментации изображений на основе древовидного разделения и слияния областей**

Проверка условия  $(T_A < T_L) \vee (E_A > E_L)$  обеспечивает адаптацию алгоритмов к ограниченному времени  $T_L$  сегментации с учетом приемлемой ошибки  $E_L$  сегментации (рисунки 6, 7), где  $T_A$  – время выполнения алгоритма;  $E_A$  – ошибка сегментации.

В алгоритме блочной сегментации изображений на основе древовидного разделения и слияния областей значение  $E_A$  вычисляется с помощью выражения

$$E_A(l) = Y_F X_F - YX / 2^{2l}, \quad (5)$$

где  $l = \overline{0, L}$  – номер уровня сегментации;  $L$  – число уровней.

В алгоритме блочной сегментации изображений на основе древовидно-волнового выраживания областей значение  $E_A$  вычисляется с помощью выражения

$$E_A = Y_F X_F - C_{SM}, \quad (6)$$

где  $C_{SM}$  – число сегментированных пикселей.

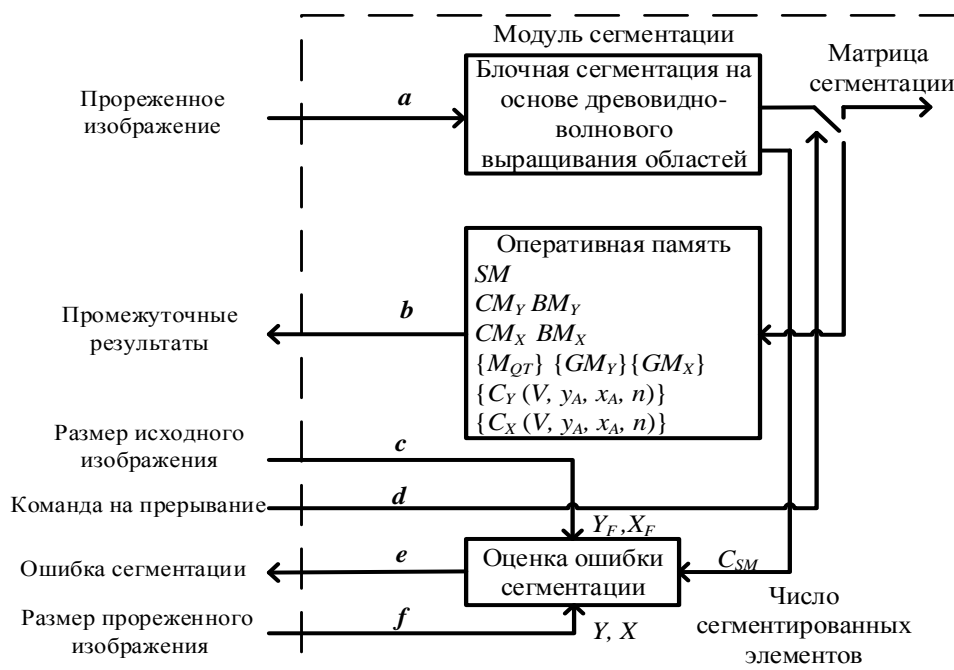


Рисунок 7. – Схема модуля сегментации для древовидно-волнового выращивания областей

В таблице 2 приведено время сегментации изображений с помощью базового алгоритма разделения и слияния областей (QT) и предложенного алгоритма древовидного разделения и слияния областей на основе узловых (PQT<sub>B+Nc</sub>) и сплошных (PQT<sub>B+Nn</sub>) квадросеток с шагом  $\Delta = \{3, 5, 9\}$ . Из таблицы 2 следует, что при увеличении шага квадросетки до 9 пикселей разработанный алгоритм позволяет повысить скорость сегментации до 77 раз. При этом ошибка сегментации увеличивается до 5 раз по сравнению с алгоритмом разделения и слияния областей.

Таблица 2. – Время сегментации тестовых изображений с помощью древовидного разделения и слияния областей, с

Тестовые изображения	Время сегментации тестовых изображений, с						QT
	PQT <sub>B+Nc</sub>			PQT <sub>B+Nn</sub>			
	$\Delta = 3$	$\Delta = 5$	$\Delta = 9$	$\Delta = 3$	$\Delta = 5$	$\Delta = 9$	
France 256×256	5	1,4	0,6	5,1	1,49	0,8	13,6
Mandrill 256×256	7,6	1,7	0,88	7,6	1,8	0,98	16,7
Lena 512×512	27,15	6,2	2,5	26,7	6,5	3,3	54,9
Barbara 512×512	16,3	6,3	2,6	15,5	6,9	3,3	66,4
Skull 512×512	12,4	5,8	2,3	13,1	6,3	3,2	46,4
Beach 512×512	16,47	7,04	2,4	15,7	7,6	3,3	185

В таблице 3 приведено время сегментации для шести тестовых изображений с

помощью базового алгоритма выращивания областей (RG) и предложенного алгоритма древовидно-волнового выращивания областей на основе узловых ( $WRG_{B+Nc}$ ) и сплошных ( $WRG_{B+Nn}$ ) квадросеток с шагом квадросетки  $\Delta = \{3, 5, 9\}$ . Из таблицы следует, что при увеличении шага квадросетки до 9 пикселей разработанный алгоритм позволяет повысить скорость сегментации до 8 раз. При этом ошибка сегментации увеличивается до 3 раз по сравнению с алгоритмом выращивания областей.

Таблица 3. – Время сегментации тестовых изображений с помощью древовидно-волнового выращивания областей, с

Тестовые изображения	Время сегментации тестовых изображений, с						RG
	$WRG_{B+Nc}$			$WRG_{B+Nn}$			
	$\Delta = 3$	$\Delta = 5$	$\Delta = 9$	$\Delta = 3$	$\Delta = 5$	$\Delta = 9$	
Lena 512×512	0,42	0,24	0,20	0,48	0,426	0,42	1,6
City 512×512	0,44	0,34	0,28	0,58	0,50	0,52	0,86
Boat 512×512	0,38	0,25	0,21	0,49	0,48	0,47	0,85
Barbara 512×512	0,42	0,3	0,22	0,55	0,46	0,46	1,15
Fields 1024×1024	1,36	1	0,8	1,73	1,8	1,84	3,1
Town 2048×2048	24,4	19,7	17,2	31	30,4	31	38,7

В четвертой главе приведены оценки эффективности разработанных адаптивных алгоритмов сегментации с учетом возможности их применения в системе обработки изображений ДЗЗ (рисунок 8) в условиях ограниченного времени обработки, объема оперативной памяти и предварительной низкочастотной фильтрации изображений.

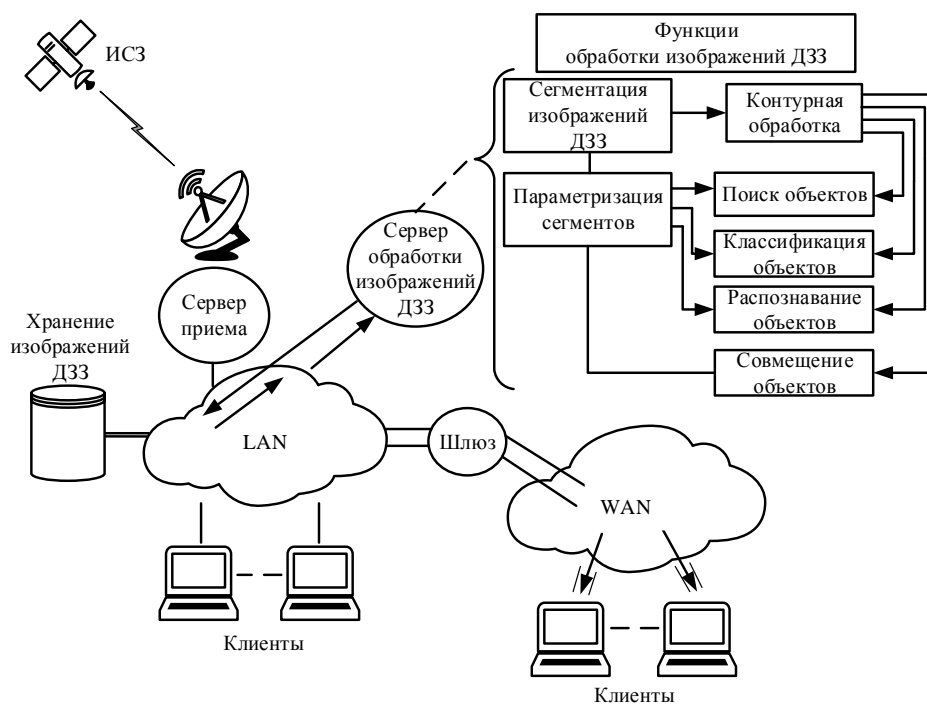


Рисунок 8. – Структура и основные функции системы обработки изображений ДЗЗ



Разработанные алгоритмы адаптируются к ограниченному времени обработки за счет примерного выделения границ: наиболее крупных сегментов (пиксельная сегментация на основе древовидного разделения и слияния областей – обеспечивает уменьшение ошибки сегментации до 104 раз при увеличении времени сегментации в 2,5 раза); всех сегментов (пиксельная сегментация на основе древовидно-волнового выращивания областей – обеспечивает уменьшение ошибки сегментации до 68 раз при увеличении времени сегментации в 2 раза); сегментов, размер которых превышает заданный порог (блочная сегментация на основе древовидного разделения и слияния областей – обеспечивает уменьшение ошибки сегментации до 16 и 18 раз для узловых и сплошных квадратов при увеличении времени сегментации в 1,5 раза). Адаптация алгоритмов к ограниченному объему оперативной памяти осуществляется за счет ограничения числа сегментов (пиксельная и блочная сегментация на основе древовидного разделения и слияния областей – обеспечивают уменьшение ошибки сегментации до 104 раз при увеличении числа сегментов в 5 раз). Адаптация к ограниченному объему оперативной памяти и времени обработки осуществляется за счет предварительной низкочастотной фильтрации и квантования пикселей изображений (блочная сегментация на основе древовидного разделения, слияния и древовидно-волнового выращивания областей – обеспечивает уменьшение удельной ошибки сегментации до 76 раз при размере ядра низкочастотного фильтра  $11 \times 11$  пикселей).

В приложениях содержатся расчетные и экспериментальные данные, акты о практическом использовании результатов диссертационной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработан алгоритм пиксельной сегментации изображений на основе древовидного разделения и слияния областей, отличающийся от известных алгоритмов вложенным кодированием структуры квадродерева, описывающего положения и формы сегментов, прерыванием процесса кодирования и ограничением объема вложенного кода с учетом приемлемой ошибки сегментации, что позволило повысить компактность представления результатов сегментации и адаптироваться к ограниченной емкости памяти. Алгоритм обеспечивает по сравнению с алгоритмом на основе разделения и слияния областей уменьшение объема представления результатов сегментации до 4,5 раза при величине ошибки квантования до 3 бит/пиксель [1, 4, 11].

2. Разработан метод пиксельной сегментации изображений на основе древовидно-волнового выращивания областей. Сущность метода заключается в использовании октодерева при поиске одинаковых равноудаленных пикселей и прерывании процесса обработки при обеспечении приемлемой ошибки сегментации, что обеспечивает разделение областей с плавным перепадом яркости, которые известные методы

сегментируют с ошибками, и адаптацию к ограниченному времени сегментации. Метод позволяет по сравнению с методом на основе разделения и слияния областей повысить чувствительность к перепадам яркости до 11 % при снижении стабильности результатов сегментации до 3,5 раза в условиях изменения контраста изображения [2, 3].

3. Разработан алгоритм блочной сегментации изображений на основе древовидного разделения и слияния областей, отличающийся использованием древовидных квадросеток с изменяемым размером ячеек для сокращения числа обрабатываемых пикселей с учетом приемлемой ошибки сегментации и адаптации к ограниченным вычислительным ресурсам. Алгоритм позволяет при увеличении шага квадросетки до 9 пикселей повысить скорость сегментации до 77 раз при увеличении ошибки сегментации до 5 раз по сравнению с алгоритмом разделения и слияния областей [6].

4. Разработан алгоритм блочной сегментации изображений на основе древовидно-волнового выращивания областей, отличающийся использованием древовидных квадросеток с изменяемым размером ячеек для сокращения числа обрабатываемых пикселей с учетом приемлемой ошибки сегментации и адаптации к ограниченным вычислительным ресурсам. Алгоритм позволяет при увеличении шага квадросетки до 9 пикселей повысить скорость сегментации до 8 раз при увеличении ошибки сегментации до 3 раз по сравнению с алгоритмом выращивания областей [5].

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

1. Адаптация разработанных алгоритмов к ограниченному времени обработки возможна за счет примерного выделения границ:

- наиболее крупных сегментов (пиксельная сегментация на основе древовидного разделения и слияния областей [1, 7, 8, 9, 11]);

- всех сегментов (пиксельная сегментация на основе древовидно-волнового выращивания областей [2, 3, 10, 12, 14, 17]);

- сегментов, размер которых превышает заданный порог (блочная сегментация на основе древовидного разделения и слияния областей [6, 13] и древовидно-волнового выращивания областей [5, 13, 15]).

2. Адаптация разработанных алгоритмов к ограниченному объему оперативной памяти возможна за счет ограничения числа сегментов (пиксельная [1, 4, 7, 8, 9, 11] и блочная [6, 13] сегментация на основе древовидного разделения и слияния областей).

3. Адаптация разработанных алгоритмов к ограниченному объему оперативной памяти и времени обработки возможна за счет предварительной низкочастотной фильтрации и квантования пикселей изображений (блочная сегментация на основе древовидного разделения и слияния областей [4, 6, 13] и древовидно-волнового выращивания областей [4, 5, 13, 15]).

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Альмияхи, О. М. Сегментация и компактное многомасштабное представление изображений на основе прогрессивной обратной кластеризации / О. М. Альмияхи, В. Ю. Цветков, Е. Г. Макейчик // Доклады БГУИР. – 2015. – № 6 (92). – С. 48–54.

2. Альмияхи, О. М. Сегментация изображений на основе волнового выращивания областей / О. М. Альмияхи, В. Ю. Цветков, В. К. Конопелько // Доклады БГУИР. – 2016. – № 3 (97). – С. 24–30.

3. Almiahi, O. Progressive image segmentation based on the wave region growing / O. Almiahi, V. Kanapelka // Al-Sadeq International Conference on Multidisciplinary in IT and Communication Science and Applications (AIC-MITCSA), IEEE, Baghdad, Iraq, 9–10 May 2016 / Baghdad, 2016. – P. 105–110.

4. Адаптивное двухпороговое квантование и сегментация изображений на основе разделения и слияния областей / О. М. Альмияхи, В. Ю. Цветков, В. К. Конопелько, О. В. Гусева // Доклады БГУИР. – 2016. – № 7 (101). – С. 183–187.

5. Альмияхи, О. М. Блочное волновое выращивание областей изображения на основе квадратов пикселей / О. М. Альмияхи, В. Ю. Цветков, В. К. Конопелько // Доклады БГУИР. – 2016. – № 8 (102). – С. 82–88.

6. Альмияхи, О. М. Блочное разделение и слияние областей изображения на основе прогрессивной кластеризации квадратов пикселей / О. М. Альмияхи, В. Ю. Цветков, С. Н. Касанин // Веснік сувязі. – 2017. – № 2 (142). – С. 45–49.

### Статьи в зарубежных изданиях, сборниках научных трудов, материалов конференций и семинаров

7. Цветков, В. Ю. Прогрессивная сегментация изображений на основе реверсивной кластеризации / В. Ю. Цветков, О. М. Альмияхи, Т. М. Аль-Джубури // Развитие информатизации и гос. системы науч.-техн. инф. (РИНТИ – 2014) : материалы науч.-техн. конф., Минск, 2014 г. / ОИПИ НАНБ. – Минск, 2014. – С. 246–251.

8. Альмияхи, О. М. Сегментация изображений на основе прямой и обратной кластеризации / О. М. Альмияхи, Х. М. Альзаки, Т. М. Аль-Джубури // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных : материалы междунар. науч.-техн. семинара, Минск, апрель – декабрь 2014 г. / БГУИР. – Минск, 2014. – С. 67–72.

9. Альмияхи, О. М. Прогрессивная кластерная сегментация изображений /

О. М. Альмияхи, В. Ю. Цветков, В. К. Конопелько // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 28–29 апреля 2015 г. / БГУ. – Минск, 2015. – С. 137–139.

10. Альмияхи, О. М. Прогрессивная сегментация полутонных изображений на основе волнового квазипараллельного выращивания областей / О. М. Альмияхи, В. К. Конопелько // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных : материалы междунар. науч.-техн. семинара, Минск, апрель – декабрь 2015 г. / БГУИР. – Минск, 2015. – С. 61–67.

11. Almiahi, O. M. Segmentation and compact multiscale representation of the images based on progressive backward clustering / O. M. Almiahi, V. YU. Tsviatkou, V. K. Konopelko // Second Engineering Scientific Conference, Diyala, 16–17 December, 2015 / College of Engineering – University of Diyala. – Diyala, 2015. – P. 546–556.

12. Almiahi, O. M. Exploration of stability for segmentation method based on wave region growing / O. M. Almiahi // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: материалы междунар. науч.-техн. семинара, Минск, апрель – декабрь 2016 г. : в 2 ч. / БГУИР. – Минск, 2016. – Ч. 1. – С. 63–69.

13. Альмияхи, О. М. Разделение областей изображений на основе квадратов / О. М. Альмияхи, В. К. Конопелько, В. Ю. Цветков // Развитие информатизации и гос. системы науч.-техн. инф. (РИНТИ – 2016) : материалы науч.-техн. конф., Минск, 2016 г. / ОИПИ НАНБ. – Минск, 2016. – С. 240–244.

14. Выбор начальных точек волнового выращивания областей по гистограмме яркости изображений / О. М. Альмияхи, М. В. Козак, М. А. Алисеенко, В. К. Конопелько // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных : материалы междунар. науч.-техн. семинара, Минск, апрель – декабрь 2016 г. : в 2 ч. / БГУИР. – Минск, 2016. – Ч. 2. – С. 61–67.

15. Козак, М. В. Оценка эффективности алгоритмов сегментации изображений дистанционного зондирования земли в условиях ограниченного времени обработки / М. В. Козак, О. М. Альмияхи, В. Ю. Цветков // Big data and advanced analytics : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 3–4 мая 2017 г. / БГУИР. – Минск, 2017. – С. 165–169.

### Тезисы докладов

16. Цветков, В. Ю. Скрытная передача данных в изображениях с использованием манипуляции размерами сегментов / В. Ю. Цветков, О. М. Альмияхи, В. К. Конопелько // Технические средства защиты информации : тез. докл. XII Бел.-рос. науч.-техн. конф., Минск, 28–29 мая 2014 г. / БГУИР. – Минск, 2014. – С. 41–42.

17. Прогрессивный алгоритм волнового выращивания областей для сегментации изображений / О. М. Альмияхи, В. К. Конопелько, К. М. О. Аль-Гертани, А. А. Р. Т. Аль-Аббуди // Наука – образованию, производству, экономике : тез. докл. 14-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 7 мая 2016 г. / БНТУ. – Минск, 2016. – С. 214.

18. Компактное представление и визуальное шифрование сегментированных изображений на основе перестановки доменных блоков / О. М. Альмияхи, В. К. Конопелько, К. М. О. Аль-Гертани, А. А. Р. Т. Аль-Аббуди // Технические средства защиты информации : тез. докл. XIV Бел.-рос. науч.-техн. конф., Минск, 25–26 мая 2016 г. / БГУИР. – Минск, 2016. – С. 46–47.



Альміяхі Асама Мажыд Хілал

### **Адаптыўная сегментацыя відарысаў на аснове дрэвападобных структур**

**Ключавыя словы:** сегментацыя відарысаў, дрэвападобныя структуры, квадрасетка, піксельная сегментацыя, блокавая сегментацыя, вырошчванне вобласцей, падзел і зліццё вобласцей.

**Мэта працы:** развіццё метадаў і распрацоўка адаптыўных алгарытмаў сегментацыі, якія забяспечваюць падзел відарысаў на аднародныя вобласці з прымальнай памылкай сегментацыі ва ўмовах абмежаваных вылічальных рэсурсаў.

**Метады даследавання і выкарыстаная апаратура:** тэорыя лічбавай апрацоўкі відарысаў, асяроддзе праграмавання Matlab.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** распрацаваны метады і алгарытмы піксельнай сегментацыі відарысаў на аснове дрэвападобнага падзелу, зліцця і вырошчвання вобласцей, якія адрозніваюцца выкарыстаннем дрэвападобнага кадзіравання становішча і формы сегментаў, што забяспечыла кампактнасць прадстаўлення вынікаў, магчымасць перарывання працэсу сегментацыі, адаптацыю да абмежаванага часу апрацоўкі і ёмістасці памяці з улікам прымальнай памылкі і дазволіла паменшыць аб'ём прадстаўлення вынікаў сегментацыі да 4,5 разоў і павялічыць адчувальнасць да перападаў яркасці да 11 %. Распрацаваны алгарытмы блокавай сегментацыі відарысаў на аснове дрэвападобнага падзелу, зліцця і вырошчвання вобласцей, якія выкарыстоўваюць квадрасеткі са змяняльным памерам ячэек, што забяспечыла скарачэнне ліку апрацоўваемых пікселяў, адаптацыю да абмежаваных вылічальных рэсурсаў з улікам прымальнай памылкі сегментацыі і дазволіла паменшыць аб'ём уваходных дадзеных да 20 разоў пры павелічэнні кроку квадрасеткі да 9 пікселяў.

**Ступень выкарыстання:** вынікі даследавання выкарыстоўваліся пры эскізным праектаванні сістэмы відэарэгістрацыі аб'ектаў у ААТ «Інтэлектуальныя працэсары» і лабараторным курсе па дысцыпліне «Апрацоўка, кадзіраванне і перадача відарысаў у тэлевізійных сістэмах» спецыяльнасці «Сістэмы, сеткі і прылады тэлекамунікацый» магістратуры ва ўстанове адукацыі «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі».

**Вобласць прымянення:** сістэмы відэаназірання, тэхнічнага зроку, лічбавага тэлебачання.

## РЕЗЮМЕ

Альмияхи Осама Мажид Хилал

### **Адаптивная сегментация изображений на основе древовидных структур**

**Ключевые слова:** сегментация изображений, древовидные структуры, квадросетки, пиксельная сегментация, блочная сегментация, выращивание областей, разделение и слияние областей.

**Цель работы:** развитие методов и разработка адаптивных алгоритмов сегментации, обеспечивающих разделение изображений на однородные области с приемлемой ошибкой сегментации в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

**Методы исследования и использованная аппаратура:** теория цифровой обработки изображений, среда программирования Matlab.

**Полученные результаты и их новизна:** разработаны метод и алгоритм пиксельной сегментации изображений на основе древовидного разделения, слияния и выращивания областей, отличающиеся использованием древовидного кодирования положения и формы сегментов, что обеспечило компактность представления результатов, возможность прерывания процесса сегментации, адаптацию к ограниченному времени обработки и емкости памяти с учетом приемлемой ошибки и позволило уменьшить объем представления результатов сегментации до 4,5 раза и повысить чувствительность к перепадам яркости до 11 %. Разработаны алгоритмы блочной сегментации изображений на основе древовидного разделения, слияния и выращивания областей, использующие квадросетки с изменяемым размером ячеек, что обеспечило сокращение числа обрабатываемых пикселей, адаптацию к ограниченными вычислительным ресурсам с учетом приемлемой ошибки сегментации и позволило уменьшить объем входных данных до 20 раз при увеличении шага квадросетки до 9 пикселей.

**Степень использования:** результаты исследования использованы при эскизном проектировании системы видеорегистрации объектов в ООО «Интеллектуальные процессоры» и лабораторном курсе по дисциплине «Обработка, кодирование и передача изображений в телевизионных системах» специальности «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» магистратуры в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

**Область применения:** системы видеонаблюдения, технического зрения, цифрового телевидения.

## SUMMARY

Almiahi Osama Majeed Hilal

### **Adaptive image segmentation on the basis of tree-like structures**

**Keywords:** image segmentation, tree-like structures, quadra-grids, pixel segmentation, block segmentation, region growing, splitting and merging of regions.

**Aim of the work:** development of methods and adaptive segmentation algorithms, that providing separation of images into homogeneous regions with an acceptable error segmentation in conditions of limited computational resources.

**Research methods and used facilities:** theory of digital image processing, programming environment Matlab.

**Obtained results and their novelty:** it was developed a method and algorithm for pixel image segmentation based on tree-like splitting, merging and region growing, differing in the use of tree-like encoding of the position and forms of the segments, which provides a compact representation of the results, the possibility of interrupting the segmentation process, adaptation to a limited processing time and memory capacity, taking into account an acceptable error and allowing to reduce the volume of the representation of segmentation results up to 4.5 times and increase sensitivity to brightness drops up to 11%. Developed algorithms for block image segmentation based on tree-like splitting, merging and region growing using quadra-grids with changing the cells size, which has resulted in a reduction in the number of processed pixels, adaptation to limited computing resources, taking into account an acceptable error of segmentation, and allowed to reduce the amount of input data up to 20 times when increasing step of quadra-grid up to 9 pixels.

**Use guidelines:** the results of the research were used in the preliminary design of the system of video registration of objects in LLC "Intellectual processors" and the laboratory course on the discipline "Processing, coding and transmission of images in television systems" in the specialty "Systems, networks and telecommunications devices" of the master's program in the educational establishment "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics".

**Application area:** systems of video surveillance, technical vision, digital television.



*Научное издание*

**Альмияхи Осама Мажид Хилал**

**АДАПТИВНАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
НА ОСНОВЕ ДРЕВОВИДНЫХ СТРУКТУР**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка  
информации

Подписано в печать 01.11.2017. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Гаймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч. изд. л. 1,5. Тираж 60 экз. Заказ 344.

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. Бровки, 6