

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 004.932.1:528.8

НГУЕН
Ань Туан

**СЕГМЕНТАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ШИРОКИМ ДИНАМИЧЕСКИМ
ДИАПАЗОНОМ МЕТОДОМ НАРАЩИВАНИЯ ОБЛАСТЕЙ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации

Минск 2021

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

Научный руководитель **Цветков Виктор Юрьевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Дудкин Александр Арсентьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией идентификации систем государственного научного учреждения «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси»

Солонар Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизации, радиолокации и приема-передающих устройств учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»

Оппонирующая организация **Белорусский государственный университет**

Защита состоится «20» января 2022 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 « 15 » декабря 2021 г.

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

 М.П. Ревотюк

ВВЕДЕНИЕ

Выделение областей (сегментация) является базовой операцией, широко используемой в обработке полутоновых изображений. Известны три модели изображений, представляющих их в виде совокупностей областей: а) внутри границ с максимальным градиентом яркости; б) с минимальной дисперсией яркости; в) с монотонным изменением яркости от локальных экстремумов (максимумов и минимумов). Для разделения на области изображений с узким динамическим диапазоном используются, как правило, модели на основе минимальной дисперсии и максимального градиента. Это обеспечивает устойчивость результатов сегментации при относительно малом отношении сигнал-шум. Модель на основе областей локальных экстремумов с монотонным изменением яркости не эффективна для сегментации изображений с узким динамическим диапазоном и низким отношением сигнал-шум, т.к. местоположение и количество выделяемых на таких изображениях локальных экстремумов нестабильно в условиях шума. Для изображений с широким динамическим диапазоном отношение сигнал шум, как правило, значительно выше. Это приводит к большей устойчивости количества и положения локальных яркостных экстремумов и позволяет эффективно применять для обработки модель изображений на основе областей локальных экстремумов с монотонным изменением яркости. Исследованию возможностей повышения точности и скорости обработки изображений с широким динамическим диапазоном за счет их представления совокупностью областей локальных экстремумов с монотонным изменением яркости посвящена данная диссертационная работа.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами

Тема диссертационной работы соответствует 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 16-2033 «Исследование методов обработки и передачи видеоданных в инфокоммуникациях» (2016–2020 гг.).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является повышение точности и скорости выделения областей локальных яркостных экстремумов для эффективной

обработки полутоновых изображений с широким динамическим диапазоном.

Для достижения поставленной цели в диссертации необходимо разработать и исследовать:

- модель полутонового изображения с широким динамическим диапазоном, позволяющую оценить статистические яркостные свойства выделяемых областей локальных экстремумов;

- алгоритмы поиска и выделения областей локальных яркостных экстремумов на основе разработанной модели, позволяющие повысить точность и скорость обработки полутоновых изображений с широким динамическим диапазоном;

- программные средства обработки полутоновых изображений с широким динамическим диапазоном, реализующие алгоритмы поиска и выделения областей локальных яркостных экстремумов.

Объектом исследования являются полутоновые изображения с широким динамическим диапазоном.

Предметом исследования являются статистические яркостные свойства областей локальных экстремумов, выделяемых на полутоновых изображениях с широким динамическим диапазоном.

Научная новизна

1. Модель полутонового изображения с широким динамическим диапазоном, учитывающая зависимости количества и размеров областей от битовой глубины пикселя и устанавливающая ограничение на монотонность изменения яркости в области, позволяющая оценить статистические яркостные особенности выделяемых областей локальных экстремумов.

2. Траекторные показатели степени монотонности изменения яркости области в двухмерном пространстве, основанные на вычислении суммы маршрутов минимальной длины с монотонным изменением яркости от каждого пикселя области до локального экстремума и определении количества пикселей области с измененным градиентом яркости, позволяющие повысить на 25 % точность оценки разделения полутоновых изображений с широким динамическим диапазоном на области локальных экстремумов с монотонным изменением яркости.

3. Встречное волновое наращивание областей локальных яркостных экстремумов, отличающееся использованием итеративной пороговой выборки пикселей с равномерным встречным изменением значения порога от глобальных минимума и максимума яркости, и градиентного условия присоединения смежных пикселей к области, позволяющее повысить точность и в 1,2 раза скорость выделения областей локальных экстремумов с монотонным изменением яркости на изображениях с широким динамическим диапазоном.

4. Селективно-сегментный поиск однопиксельных и многопиксельных локальных яркостных экстремумов, отличающийся однократной выборкой неэкстремальных пикселей в процессе обработки, позволяющий достичь высокой точности морфологического поиска при в 2,1 раза большей скорости и в 2,7 раза меньшей пространственной сложности.

5. Блочно-сегментный поиск однопиксельных и многопиксельных локальных яркостных экстремумов на изображениях с широким динамическим диапазоном, основанный на локальном и глобальном сравнении яркостей смежных и граничных пикселей однородных областей, позволяющий достичь высокой точности морфологического поиска при в 4 раза большей скорости и в 2,1 раза меньшей пространственной сложности, что в 1,9 раза лучше по скорости и в 1,3 раза хуже по пространственной сложности в сравнении с селективно-сегментным поиском.

Положения, выносимые на защиту

1. Модель полутонового изображения с широким динамическим диапазоном, основанная на учете зависимости количества и размеров областей от битовой глубины пикселя и использовании ограничения на монотонность изменения яркости в области локального экстремума, и траекторные показатели степени монотонности изменения яркости области в двухмерном пространстве, позволяющие выявить статистические яркостные свойства областей локальных экстремумов и повысить на 25 % точность оценки разделения изображений на области с монотонным изменением яркости.

2. Алгоритм встречного волнового наращивания областей локальных яркостных экстремумов, основанный на итеративной пороговой обработке и условии градиентного присоединения пикселей к области, позволяющий повысить точность и в 1,2 раза скорость разделения полутоновых изображений с широким динамическим диапазоном на области локальных экстремумов с монотонным изменением яркости.

3. Алгоритмы селективно-сегментного и блочно-сегментного поиска однопиксельных и многопиксельных локальных яркостных экстремумов, основанные на однократной выборке неэкстремальных пикселей и локально-глобальном сравнении яркостей смежных и граничных пикселей однородных областей, позволяющие достичь высокой точности морфологического поиска при в 2,1 – 4 раза большей скорости и в 2,1 – 2,7 раза меньшей пространственной сложности в зависимости от величины динамического диапазона изображений.

4. Комплекс программных средств, позволяющий осуществлять компактное описание, пространственную фильтрацию и текстурную сегментацию полутоновых изображений с широким динамическим диапазоном с использованием селективно-сегментного, блочно-сегментного поиска и встречного волнового наращивания областей локальных яркостных экстремумов.

Личный вклад соискателя ученой степени

Содержание диссертации отображает личный вклад автора. Он заключается в научном обосновании и разработке алгоритмов и программных средств поиска однопиксельных и многопиксельных локальных экстремумов и выделения их областей с монотонным изменением яркости, постановке и проведении экспериментов по исследованию характеристик, оценке эффективности разработанных алгоритмов для обработки полутоновых изображений с широким динамическим диапазоном, обработке и анализе полученных результатов, формулировке выводов.

Определение целей и задач исследований, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем д.т.н. В.Ю. Цветковым.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: международном научно-техническом семинаре «Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных» (Минск, 2018–2020); международной научно-практической конференции «Кодирование и цифровая обработка сигналов в инфокоммуникациях» (Минск, 2019–2020); XIV международной научно-практической конференции «Pattern Recognition and Information Processing» (Минск, 2019); V международной научно-практической конференции «Big Data and Advanced Analytics» (Минск, 2019).

Результаты диссертационной работы использованы в лабораторном курсе по дисциплине «Технологии видеонаблюдения и видеоналитики» специальности «Системы и сети инфокоммуникаций» магистратуры в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» и системе видеонаблюдения компании Elite Technology JSC (Вьетнам).

Опубликование результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 13 печатных работ, в том числе: 6 статей в научных журналах, рекомендованных ВАК, общим объемом 3,5 авторских листа; 7 статей 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 семи приложений.

Общий объем диссертационной работы составляет 241 страницу, из них 80 страниц текста, 109 рисунков на 41 странице, 14 таблиц на 5 страницах, список использованных библиографических источников (115 наименований на 9 страницах), список публикаций автора по теме диссертации (13 наименований на 2 страницах), 7 приложений на 104 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены объект и предмет исследования, сформулирована научная гипотеза: модель на основе областей локальных яркостных экстремумов является более эффективной для описания изображений с широким динамическим диапазоном, ее использование позволит повысить точность и скорость сегментации, а также эффективность последующей обработки таких изображений.

В **первой главе** рассмотрены алгоритмы выделения областей на полутоновых изображениях, поиска локальных яркостных экстремумов и показатели точности разделения полутоновых изображений на области.

Установлено, что для разделения полутоновых изображений с широким динамическим диапазоном на области локальных яркостных экстремумов наиболее эффективны алгоритмы волнового наращивания областей (пороговая сегментация не учитывает локализацию пикселей и положение начальных точек роста; обычное наращивание областей не контролирует направление роста области, что приводит к пересегментации; разделение и слияние областей не учитывает положение начальных точек роста; границы водораздела формируются в областях локальных минимумов). Для присоединения пикселя к области на каждой итерации эти алгоритмы используют критерии на основе средней яркости сегмента или значений граничных пикселей. Использование этих критериев позволяет уменьшить разброс значений яркости пикселей относительно среднего в пределах выделяемых областей, но не обеспечивает монотонность ее изменения и может приводить к неполной сегментации.

Известные показатели точности разделения изображений на области основаны на численной оценке однородности яркости внутри области, несоответствии яркости областей и семантических характеристиках. Показатели однородности чувствительны к шуму и с большой вероятностью ошибочно указывают на недостаточную сегментации. Большинство известных показателей предполагают единственное базовое распределение пикселей в области.

Показатели однородности и несоответствия часто несбалансированы и противоречат друг другу. Ни один из известных показателей точности сегментации не учитывает монотонность изменения яркости областей.

Для поиска локальных яркостных экстремумов применяются алгоритмы блочного и морфологического поиска. Блочные алгоритмы имеют низкую вычислительную сложность, но выделяют не все многопиксельные экстремумы, вследствие ограниченных размера и формы блока. Морфологические алгоритмы дают точные результаты, выделяя все однопиксельные и многопиксельные экстремумы, но имеют высокую вычислительную сложность, вследствие многократной итеративной обработки окрестностей всех пикселей изображения.

Возможности устранения отмеченных недостатков алгоритмов выделения областей, поиска локальных яркостных экстремумов и показателей точности разделения изображений с широким динамическим диапазоном на области заключаются в использовании градиентного условия роста областей, учитывающего тип локального экстремума и изменение яркости присоединяемых пикселей; проверке знака градиента яркости для каждого пикселя выделенной области с учетом типа локального экстремума, сокращении числа итераций при обработке неэкстремальных пикселей. Реализация данных возможностей легла в основу задач диссертационной работы.

Во **второй главе** приведено описание модели полутонового изображения с широким динамическим диапазоном, траекторных показателей степени монотонности изменения яркости области в двухмерном пространстве; алгоритма встречного волнового наращивания областей локальных яркостных экстремумов.

Модель $\{M_P, M_S, M_E\}$ полутонового изображения с широким динамическим диапазоном представляет его в виде матрицы $M_P = \left\| m_P(y, x) \right\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ пикселей размером $Y \times X$ ($m_P(y, x) \in [0, 2^B - 1]$, где B – разрядность пикселей, определяющая ширину динамического диапазона $[0, 2^B - 1]$ – не ограничена), разделенной на N_S областей $S = \left\| s(n_S) \right\|_{(n_S=1, N_S)}$ локальных экстремумов (максимумов и минимумов) $E = \left\| e(n_S) \right\|_{(n_S=1, N_S)}$ с монотонным изменением яркости, где M_S – матрица сегментации, $M_S = \left\| m_S(y, x) \right\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$; M_E – матрица локальных экстремумов, $M_E = \left\| m_E(y, x) \right\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ [1, 2]. Значения элементов матрицы M_S указывают на номера n_S сегментов $s(n_S)$, которым они принадлежат ($|m_S(y, x)| = n_S$, $n_S \in [1, N_S]$), а знаки – на тип сегмента: $m_S(y, x) > 0$ – элемент области локального максимума; $m_S(y, x) < 0$ – элемент области локального минимума. Значения элементов матрицы M_E указывают на принадлежность

соответствующих пикселей изображения n_s -й максимальной ($m_E(y, x) = n_s$), минимальной ($m_E(y, x) = -n_s$) или неэкстремальной ($m_E(y, x) = 0$) области $e(n_s)$. Экстремальная (максимальная или минимальная) область $e(n_s)$ может состоять из одного или более элементов: $\forall y \forall x (|m_E(y, x)| = n_s) \Rightarrow (m_E(y, x) \in e(n_s))$. Число экстремальных областей $e(n_s)$ совпадает с числом областей $s(n_s)$ изображения и каждой области изображения соответствует одна экстремальная область: $\forall n_1 \forall n_2 (s(n_1) \leftrightarrow e(n_2)) \Rightarrow (n_1 = n_2)$ (рисунок 1).

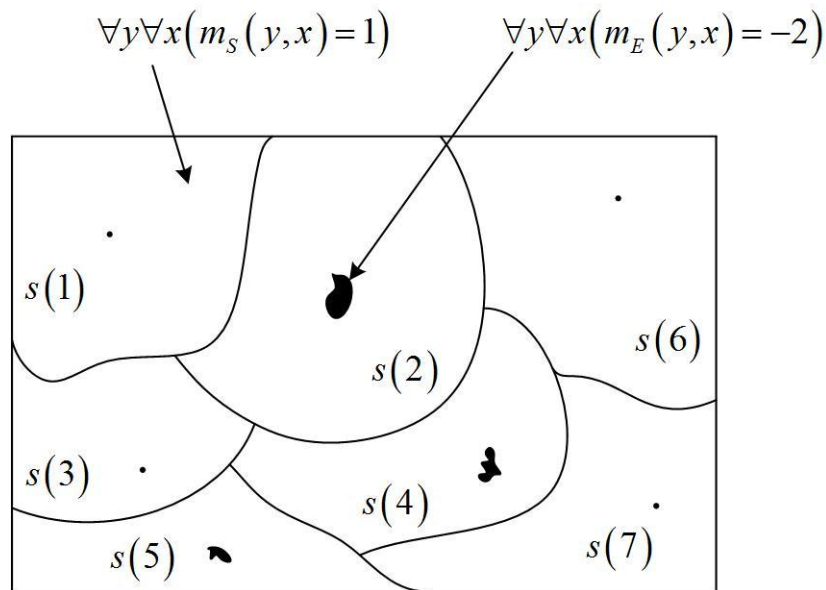


Рисунок 1. – Пример разделения изображения на 7 областей локальных экстремумов

Изображения с широким динамическим диапазоном характеризуются низкой вероятностью появления однородных областей значительной площади (рисунок 2). Для оценки результатов сегментации изображений с узким динамическим диапазоном важен учет однородных областей, имеющих значительную площадь на изображении. Чем шире динамический диапазон изображения, тем меньше общая площадь и, следовательно, значимость однородных областей в оценке результатов сегментации такого изображения, и тем больше значимость областей с монотонным изменением яркости. При сегментации изображений с широким динамическим диапазоном использование однородности яркости в качестве критерия при выборе начальной точки роста области приводит к результатам, неточно описывающим структуру изображения. Для повышения точности сегментации изображений с широким динамическим диапазоном более эффективным подходом является использование в качестве начальных точек роста локальных экстремумов (максимумов и минимумов) с последующим присоединением к ним фрагментов с монотонным изменением яркости.

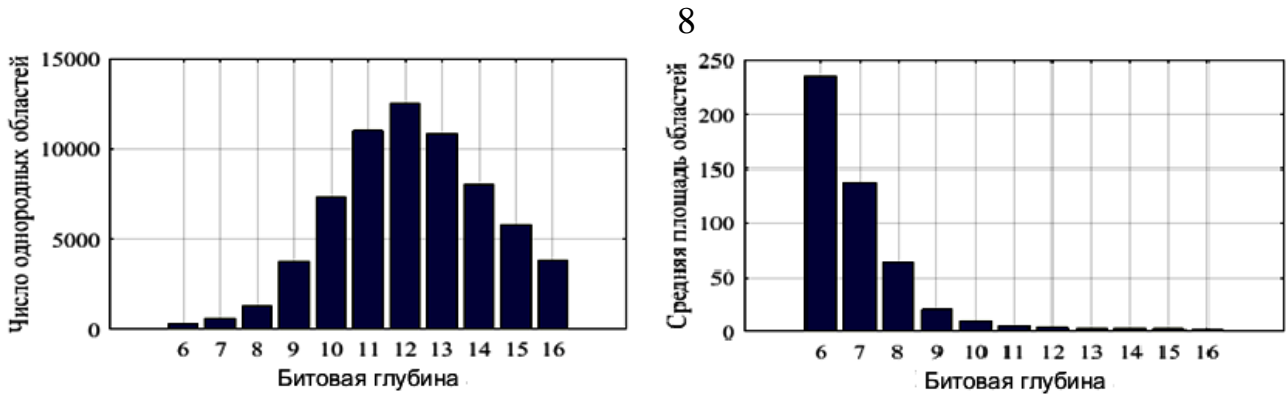


Рисунок 2. – Зависимости количества и средней площади однородных областей от битовой глубины изображения

Траекторные показатели степени монотонности изменения яркостей областей изображения, выделенных с помощью алгоритмов сегментации, основаны на вычислении: а) взвешенной суммы D_{SLE} кратчайших расстояний $l(n_s, k)$ от каждого пикселя k с координатами $(y(n_s, k), x(n_s, k))$ в области n_s до соответствующего локального экстремума с координатами $(y_E(n_s), x_E(n_s))$ по маршрутам $k = \overline{1, S(n_s)}$, определяемым максимальным увеличением (для области локального максимума) или уменьшением (для области локального минимума) яркости пикселей; б) взвешенного количества N_{MIP} пикселей, прерывающих монотонность изменения яркости области (с измененным градиентом яркости) [1]. Значения D_{SLE} и N_{MIP} определяются с помощью выражений:

$$D_{SLE} = \frac{1}{N_S} \sum_{n_s=1}^{N_S} \left(\frac{1}{S(n_s)^2} \sum_k^{S(n_s)} l(n_s, k) \right),$$

$$N_{MIP} = \frac{1}{N_S} \sum_{n_s=1}^{N_S} \frac{1}{S(n_s)} \sum_{k=0}^{S(n_s)-1} n_{MIP}(n_s, k),$$

где $l(n_s, k) < S(n_s)$, если координаты $(y_F(n_s, k), x_F(n_s, k))$ последнего пикселя в k -м маршруте совпадают с координатами локального экстремума:

$$(y_F(n_s, k) = y_E(n_s)) \wedge (x_F(n_s, k) = x_E(n_s));$$

$$l(n_s, k) = S(n_s), \text{ если } (y_F(n_s, k) \neq y_E(n_s)) \vee (x_F(n_s, k) \neq x_E(n_s));$$

$n_{MIP}(n_s, k)$ – индикатор монотонности изменения яркости сегмента, принимающий значение 0 (или 1), если существует (или не существует) маршрут от пикселя с координатами $(y(n_s, k), x(n_s, k))$ до локального экстремума с координатами $(y_E(n_s), x_E(n_s))$, проходящий через пиксели с большими или равными значениями (для области локального максимума), или через пиксели с меньшими или равными значениями (для области локального минимума).

Чем меньше значение D_{SLE} , тем более монотонно изменяются яркости пикселей в областях локальных максимумов и минимумов. Значение $N_{MIP} > 0$ свидетельствует о нарушении монотонности изменения яркости сегмента.

Траекторные показатели степени монотонности, вычисляемые в двухмерном пространстве, являются более точными в сравнении с аналогичными одномерными оценками, которые могут быть получены для профиля яркости, формируемого вдоль прямой, соединяющей каждый пиксель области с ее начальной точкой роста, – прямо-профильными показателями. С учетом сложной структуры области для формирования прямо-профильных показателей дополнительно к монотонным (обеспечивающим монотонность профиля яркости) и немонотонным (нарушающим монотонность профиля яркости) пикселям необходимо учитывать неопределенные пиксели, относящиеся к другим областям, но включаемые в формируемые профили яркости. Неопределенные пиксели не могут использоваться для вычисления прямо-профильных показателей монотонности из-за возможных ошибок при сложной форме области. Точность прямо-профильных показателей снижается также из-за возможности обнаружения нарушения монотонности при наличии непрямой траектории, для профиля яркости которой условие монотонности выполняется. В результате прямо-профильные показатели обеспечивают примерно на 25 % меньшую точность оценки степени монотонности по сравнению с траекторными показателями.

Разработанный для сегментации изображений с широким динамическим диапазоном алгоритм встречного волнового наращивания областей локальных экстремумов (CLERG) основан на итеративной пороговой выборке пикселей с равномерным встречным изменением значения порога от глобальных минимума и максимума яркости и градиентном условии присоединения смежных пикселей к области [1, 9, 11 – 13]. Алгоритм отличается от базового алгоритма OSRG волнового наращивания областей использованием вектора $S_E = \|s_E(n_E)\|_{(n_E=1, \overline{N_E})}$ знаков локальных экстремумов, элементы которого принимают значения 1 для локальных максимумов и минус 1 для локальных минимумов, цикла по уровням яркости q ($q = 0, 2^B - 1$), векторов $Y_E = \|y_E(n_E)\|_{(n_E=1, \overline{N_E})}$ и $X_E = \|x_E(n_E)\|_{(n_E=1, \overline{N_E})}$ координат начальных пикселей роста.

В результате выполнения алгоритма CLERG формируется матрица сегментации, значение каждого элемента которой указывает на номер и тип соответствующей области: положительные значения – номера областей локальных максимумов; отрицательные значения – номера областей локальных минимумов; нулевые значения соответствуют несегментированным областям. С каждым циклом перебора выращиваемых областей размеры сегментов постепенно увеличиваются, в чем проявляется прогрессивный характер сегментации с монотонным изменением яркости.

На рисунке 3 приведены зависимости показателей степени монотонности от битовой глубины изображения для различных алгоритмов сегментации. Из рисунка следует, что предложенный алгоритм обеспечивает лучшие результаты сегментации изображений в сравнении с другими алгоритмами. Он показывает отсутствие нарушений монотонности при любой ширине динамического диапазона изображений. Причем, разница в точности сегментации предложенным алгоритмом и другими алгоритмами, оцениваемая по показателям степени монотонности, увеличивается с расширением динамического диапазона изображения.

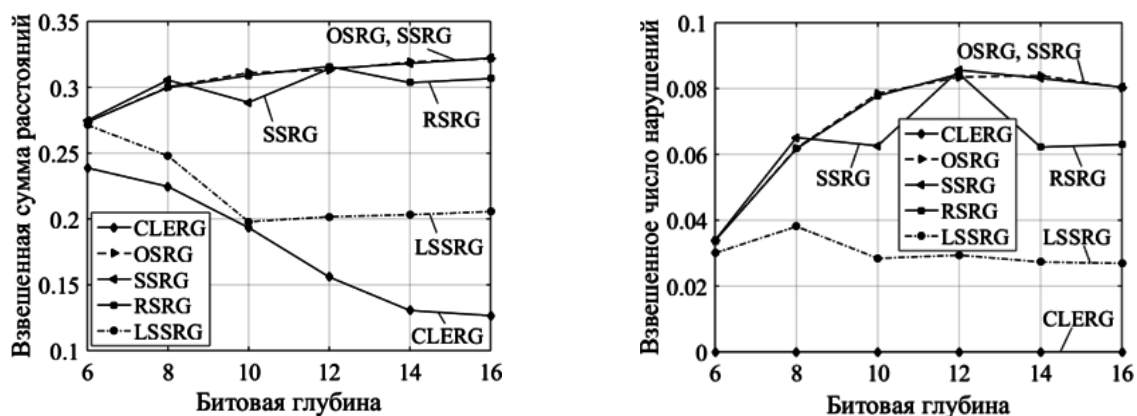


Рисунок 3. – Зависимости показателей степени монотонности (взвешенной суммы кратчайших расстояний и количества нарушений монотонности) от битовой глубины изображения

Реализация предложенного алгоритма в среде MATLAB (R2015a) на платформе Intel Core i3 3,1 ГГц с 6 ГБ ОЗУ обеспечивает повышение в 56 – 104 раза точности (по траекторным показателям степени монотонности) и в 1,2 – 4,3 раза скорости выделения областей локальных экстремумов с монотонным изменением яркости на изображениях с широким динамическим диапазоном по сравнению с известными алгоритмами наращивания областей OSRG, SSRG, RSRG и LSSRG.

В третьей главе приведено описание разработанных алгоритмов селективно-сегментного (НЗА) и блочно-сегментного поиска (BSA) однопиксельных и многопиксельных локальных яркостных экстремумов на полутоновых изображениях с широким динамическим диапазоном.

Алгоритм НЗА селективно-сегментного поиска локальных яркостных экстремумов основан на совместной обработке экстремальных пикселей и областей с однократной выборкой неэкстремальных пикселей в процессе обработки [2, 5]. Алгоритм отличается: а) от известных алгоритмов блочного поиска учетом однородных по яркости областей, которые являются локальными максимумами или минимумами по отношению к смежным областям, что позволяет повысить точность выделения локальных экстремумов; б) от известных алгоритмов морфологического поиска исключением итеративной обработки неэкстремальных пикселей, что позволяет снизить вычислительную сложность; в) от известных алгоритмов

блочного и морфологического поиска – присвоением номеров локальным экстремумам в процессе их поиска, что позволяет снизить вычислительную сложность. Сущность алгоритма состоит в сканировании изображения для поиска несегментированных пикселей, использовании их в качестве начальных точек роста, наращивании однородных областей и сравнении значений их граничных пикселей со значениями соответствующих пикселей смежных сегментов: область является локальным максимумом (минимумом), если значения всех ее граничных пикселей больше (меньше) значений всех смежных пикселей или равны им.

В результате выполнения алгоритма НЗА формируется матрица E экстремумов, значение каждого элемента $e(y,x)$ которой указывает на принадлежность соответствующих пикселей изображения n_s -й максимальной ($e(y,x)=n_s$), минимальной ($e(y,x)=-n_s$) или неэкстремальной ($e(y,x)=0$) области $R(n_s)$.

Алгоритм НЗА реализован на платформах: а) Intel Core i3 3,1 ГГц, 6 ГБ ОЗУ, Windows 7, Matlab (платформа IWM); б) Intel Core i3 3,1 ГГц, 6 ГБ ОЗУ, Windows 7, C++ (платформа IWC); в) Raspberry Pi 3 Model B, ARM-A53, Linux, C++ (платформа RLC). Алгоритмы НЗА и морфологический выделяют в 1,08 – 1,86 раза (в 1,35 раза в среднем по изображениям) больше локальных яркостных экстремумов по сравнению с блочным алгоритмом Scanline3x3 за счет учета многопиксельных экстремумов (в алгоритме Scanline3x3 число экстремальных пикселей и число локальных экстремумов совпадают, а в алгоритмах НЗА и морфологическом число экстремальных пикселей значительно превышает число локальных экстремумов). Выделение экстремальных областей дополнительно к однопиксельным экстремумам приводит к росту вычислительной сложности алгоритма НЗА в сравнении с блочным алгоритмом Scanline3x3. Алгоритм НЗА по сравнению с алгоритмом Scanline3x3 требует в 3,3 – 4,2, 2,6 – 3,2, 3,3 – 3,9 раз (в 3,9, 2,9, 3,7 раза в среднем по изображениям) больше времени на выделение локальных яркостных экстремумов на вычислительных платформах IWM, IWC, RLC соответственно. При этом реализации алгоритма НЗА на вычислительных платформах IWM, IWC превосходят в скорости реализации морфологического алгоритма в 2,1, 1,7 раза соответственно с усреднением по изображениям и требуют в 2,7 раза меньше оперативной памяти.

Алгоритм BSA блочно-сегментного поиска однопиксельных и многопиксельных локальных яркостных экстремумов на изображениях с широким динамическим диапазоном основан на отдельной обработке экстремальных пикселей и областей с локальным и глобальным сравнением яркостей смежных и граничных пикселей однородных областей [3, 4, 6, 7, 8, 10]. Алгоритм отличается от алгоритмов блочного и морфологического поиска: а) совмещенным поиском максимумов и минимумов за счет присвоения элементам $e(y,x)$, как

положительных, так и отрицательных значений; б) учетом многопиксельных экстремумов за счет оценки окрестности пикселя $i(y, x)$ с использованием нестрогих неравенств; в) исключением ошибок поиска локальных экстремальных областей за счет оценки окрестностей всех пикселей каждой однородной области $R(n_s)$; г) отсутствием необходимости сегментации матрицы E локальных экстремумов за счет назначения номеров n_s однопиксельным экстремумам и экстремальным областям; д) однократной обработкой окрестностей всех пикселей за счет наращивания однородных областей $R(n_s)$. Сущность алгоритма BSA состоит в поиске однопиксельных локальных экстремумов с помощью алгоритма блочного поиска локальных яркостных экстремумов на основе центрально-симметричного сканирования [7] и однородных по яркости экстремальных областей (из двух и более одинаковых пикселей) с помощью сегментного поиска на основе алгоритма наращивания однородных областей.

Алгоритмы BSA, НЗА и морфологический выделяют в 1,4 раза больше локальных экстремумов по сравнению с алгоритмом блочного поиска Scanline3x3 за счет учета многопиксельных экстремумов. Выделение экстремальных областей дополнительно к однопиксельным экстремумам приводит к росту вычислительной сложности алгоритма BSA в сравнении с алгоритмом Scanline3x3. При использовании вычислительных платформ IWM, IWC, RLC алгоритм BSA по сравнению с алгоритмом Scanline3x3 требует соответственно в 2,2, 1,7, 2,0 раза больше времени и в 5,8 раза больше оперативной памяти. При этом реализации алгоритма BSA на вычислительных платформах IWM и IWC по сравнению с реализациями морфологического алгоритма требуют соответственно в 4,1 и 3,1 раза меньше времени и в 2,1 раза меньше оперативной памяти, что в 1,9 раза лучше по скорости и в 1,3 раза хуже по пространственной сложности в сравнении с селективно-сегментным поиском.

Морфологический алгоритм требует больше времени на поиск локальных экстремумов по сравнению с алгоритмом BSA для любой ширины динамического диапазона изображений (рисунок 4).

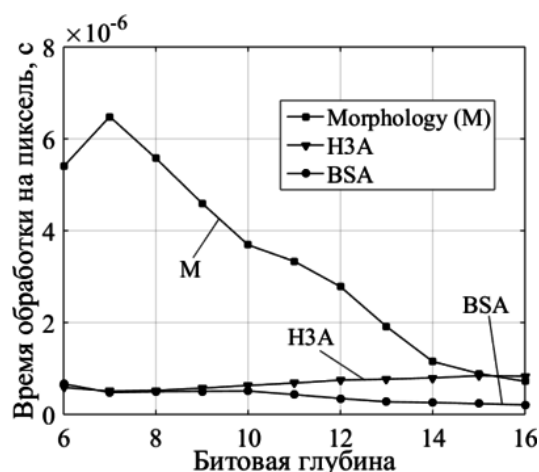
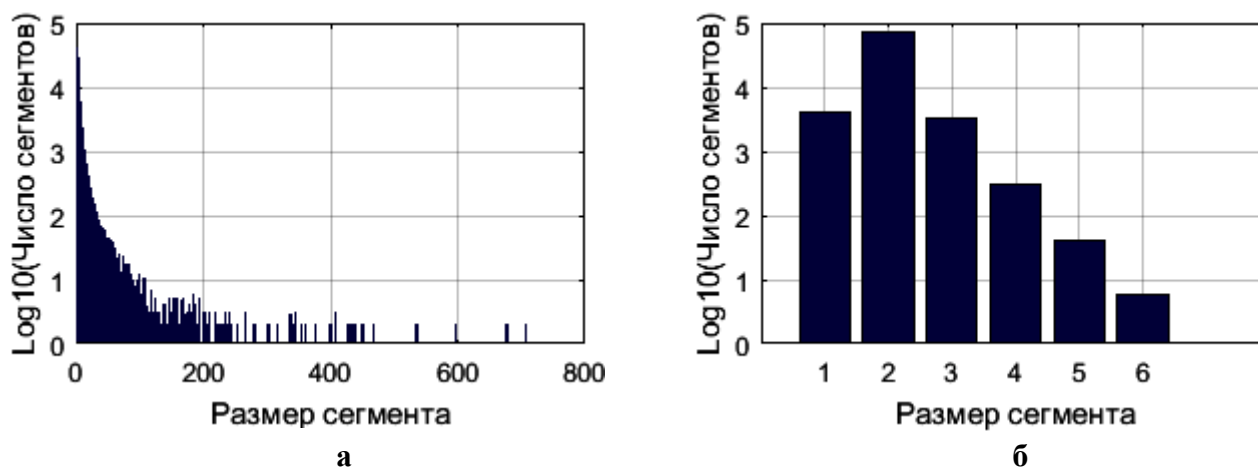


Рисунок 4. – Зависимости скорости алгоритмов от битовой глубины изображений

Из рисунка 4 следует, что с расширением динамического диапазона изображений скорость алгоритма BSA возрастает, и он начинает работать быстрее алгоритма НЗА. Это связано с зависимостями количества и размеров областей от ширины динамического диапазона сегментируемых изображений (рисунок 5). Из рисунка 5 следует, что с расширением динамического диапазона уменьшается количество крупных сегментов. Поэтому алгоритм BSA, использующий отдельные процедуры: простую – для поиска однопиксельных локальных экстремумов на основе блочного поиска и более сложную – для поиска многопиксельных локальных экстремумов на основе наращивания областей, работает быстрее с уменьшением площади и количества таких областей, что наблюдается при расширении динамического диапазона изображения. Алгоритм НЗА, напротив, использует общую процедуру для поиска однопиксельных и многопиксельных локальных экстремумов. Это позволяет сократить расход оперативной памяти по сравнению с алгоритмом BSA (примерно в 1,3 раза), но приводит к увеличению времени поиска. Время работы алгоритма НЗА растет с увеличением количества областей, а не их площади (он работает быстрее на небольшом числе крупных однородных областей, чем на большом числе мелких областей), что наблюдается при расширении динамического диапазона изображения.



а – битовая глубина 12 бит; б – битовая глубина 16 бит

Рисунок 5. – Распределения количества областей изображения от битовой глубины

В четвертой главе приведено описание разработанных алгоритмов и программных средств компактного описания, пространственной фильтрации и текстурной сегментации полутоновых изображений с широким динамическим диапазоном, основанных на селективно-сегментном, блочно-сегментном поиске и встречном волновом наращивании областей локальных яркостных экстремумов. Программные средства разработаны в среде Matlab, на языках программирования C++ и JavaScript, для универсального компьютера и аппаратной платформы Raspberry Pi 3 Model B, ARM-A53 (Linux).

Алгоритм компактного описания изображений с широким динамическим, основан на многоуровневой бессеточной аппроксимации областей локальных экстремумов с монотонным изменением яркости при помощи двухмерных примитивных функций с перестраиваемыми параметрами. Установлено, что 4-уровневая бессеточная аппроксимация областей локальных экстремумов позволяет уменьшить до 7 раз суммарную энергию коэффициентов по сравнению с 4-уровневым вейвлет-разложением для 16-битных инфракрасных изображений. Аналогичные результаты получены для изображений с узким динамическим диапазоном (кодирование 8 бит/пиксель). Представления 16-битных спутниковых изображений с помощью вейвлет-преобразования и бессеточной аппроксимации имеют примерно одинаковую компактность.

Алгоритмы пространственной фильтрации основаны на анализе яркости (для удаления импульсных шумов) и размеров (для удаления малоразмерных объектов) областей локальных экстремумов с монотонным изменением яркости. Сущность алгоритмов состоит в поиске локальных экстремумов, выделении их областей с монотонным изменением яркости, локализации областей импульсных шумов и малого размера, замене значений пикселей таких областей средними по окрестности значениями. Алгоритмы позволяют уменьшить среднеквадратическую ошибку восстановления полутоновых изображений с широким динамическим диапазоном по сравнению с алгоритмами на основе медианного фильтра (до 20 раз) и фильтра Гаусса (в 2 раза).

Алгоритм текстурной сегментации изображений основан на оценке плотности распределения энергии локальных яркостных экстремумов. Сущность алгоритма заключается в поиске на изображении локальных экстремумов, вычислении плотности их распределения, формировании областей смежных локальных экстремумов с близкой плотностью распределения. Алгоритм отличается от алгоритма сегментации на основе энергетических карт выделением локальных экстремумов, представляющих структуры текстур изображения и группировке их с учетом плотности распределения в площадные объекты с использованием пороговой обработки. Сегментация на основе оценки плотности распределения локальных экстремумов с их блочно-сегментным поиском позволяет повысить точность и в 2 раза скорость определения границ текстурных областей по сравнению с сегментацией на основе энергетических карт.

В приложениях содержатся тестовая база полутоновых изображений с широким динамическим диапазоном, блок-схемы алгоритмов, расчетные и экспериментальные данные, акты о практическом использовании результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана модель полутонового изображения с широким динамическим диапазоном, учитывающая зависимости количества и размеров областей от битовой глубины пикселя и устанавливающая ограничение на монотонность изменения яркости в области локального экстремума [1, 2]. Модель позволяет выявить статистические яркостные свойства областей локальных экстремумов с монотонным изменением яркости на полутоновых изображениях с широким динамическим диапазоном.

2. Предложены траекторные показатели степени монотонности изменения яркости области в двумерном пространстве, основанные на вычислении суммы маршрутов минимальной длины с монотонным изменением яркости от каждого пикселя области до ее локального экстремума и определении количества пикселей области с измененным градиентом яркости [1]. Траекторные показатели позволяют повысить на 25 % точность оценки разделения полутоновых изображений с широким динамическим диапазоном на области локальных экстремумов с монотонным изменением яркости по сравнению с прямо-профильными показателями.

3. Разработан алгоритм встречного волнового наращивания областей локальных яркостных экстремумов, основанный на итеративной пороговой выборке пикселей с равномерным встречным изменением значения порога от глобальных минимума и максимума яркости и градиентном условии присоединения смежных пикселей к области [1, 9, 11 – 13]. Алгоритм позволяет повысить точность и в 1,2 раза скорость выделения областей локальных экстремумов с монотонным изменением яркости на изображениях с широким динамическим диапазоном.

4. Разработан алгоритм селективно-сегментного поиска однопиксельных и многопиксельных локальных яркостных экстремумов, основанный на совместной обработке экстремальных пикселей и областей с однократной выборкой неэкстремальных пикселей [2, 5]. Алгоритм позволяет достичь точности морфологического поиска локальных экстремумов при в 2,1 раза большей скорости и в 2,7 раза меньшей пространственной сложности.

5. Разработан алгоритм блочно-сегментного поиска однопиксельных и многопиксельных локальных яркостных экстремумов, основанный на отдельной обработке экстремальных пикселей и областей с локальным и глобальным сравнением яркостей смежных и граничных пикселей [3, 4, 6, 7, 8, 10]. На изображениях с широким динамическим диапазоном алгоритм позволяет достичь высокой точности морфологического поиска при в 4 раза большей скорости и в 2,1 раза меньшей пространственной сложности, что в 1,9 раза лучше по скорости и в 1,3 раза хуже по пространственной сложности в сравнении с селективно-сегментным поиском.

Рекомендации по практическому использованию результатов

На основе предложенных алгоритмов селективно-сегментного, блочно-сегментного поиска и встречного волнового наращивания областей локальных яркостных экстремумов разработаны программные средства компактного описания, пространственной фильтрации и текстурной сегментации полутоновых изображений с широким динамическим диапазоном в среде Matlab, на языках программирования C++ и JavaScript, для универсального компьютера и аппаратной платформы Raspberry Pi 3 Model B, ARM-A53 (Linux).

Использование для компактного описания полутоновых изображений с широким динамическим диапазоном бессеточной аппроксимации областей локальных экстремумов с монотонным изменением яркости при помощи простых двумерных функций с перестраиваемыми параметрами позволяет уменьшить до 7 раз суммарную энергию коэффициентов преобразования по сравнению с вейвлет-разложением.

Реализация пространственной фильтрации на основе анализа яркости (для удаления импульсных шумов) и размеров (для удаления малоразмерных объектов) областей локальных экстремумов с монотонным изменением яркости позволяет уменьшить среднеквадратическую ошибку восстановления полутоновых изображений с широким динамическим диапазоном по сравнению с медианным фильтром (до 20 раз) и фильтром Гаусса (в 2 раза).

Текстурная сегментация изображений с широким динамическим диапазоном на основе оценки плотности распределения локальных яркостных экстремумов, выделяемых с помощью блочно-сегментного поиска, позволяет повысить точность и в 2 раза скорость определения границ текстурных областей по сравнению с сегментацией на основе энергетических карт.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Нгуен, А.Т. Разделение изображений на области локальных экстремумов с монотонным изменением яркости пикселей / А.Т. Нгуен, В.Ю. Цветков // Доклады БГУИР. – 2021. – № 19 (4). – С. 61–69.

2. Нгуен, А.Т. Сегментный поиск локальных экстремумов изображений на основе анализа яркостей смежных однородных областей / А.Т. Нгуен, В.Ю. Цветков // Информатика. – 2019. – № 16 (3). – С. 23–36.

3. Нгуен, А.Т. Блочно-сегментный поиск локальных экстремумов изображений на основе анализа яркостей смежных пикселей и областей / А.Т. Нгуен, В.Ю. Цветков // Системный анализ и прикладная информатика. – 2019. – № 4. – С. 4–9.

4. Nguyen, A.T. New Fast Modified Non-Maximum Suppression Algorithm to Find Local Extrema in Grayscale Images / A.T. Nguyen, V.Yu. Tsviatkou // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering (IJARCCE). – 2019. – Vol. 8, iss. 9. – P. 1–10.

5. Al-Furaiji, O.J.M. A new fast efficient non-maximum suppression algorithm based on image segmentation / O.J.M. Al-Furaiji, A.T. Nguyen, V.Yu. Tsviatkou // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (IJECS). – 2020. – Vol. 19, iss. 2. – P. 1062–1070.

6. Al-Furaiji, O.J.M. A New Approach of Finding Local Extrema in Grayscale Images based on Space-Oriented Masks / O.J.M. Al-Furaiji, A.T. Nguyen, V.Yu. Tsviatkou // Engineering Letters. – 2020. – Vol. 28, iss. 2. – P. 586–593.

Статьи в сборниках научных трудов, материалов конференций и семинаров

7. Нгуен, А.Т. Поиск локальных экстремумов полутоновых изображений на основе центрально-симметричного сканирования / А.Т. Нгуен, В.Ю. Цветков // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: материалы междунар. науч.-техн. семинара, Минск, апрель-декабрь, 2018 г. / БГУИР. – Минск, 2018. – С. 61–66.

8. Нгуен, А.Т. Поиск экстремальных областей полутоновых изображений на основе выращиваемых масок / А.Т. Нгуен, В.Ю. Цветков // BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сборник материалов V Международной научно-практической конференции, Минск, 13–14 марта, 2019 г. часть 2. / БГУИР. – Минск, 2019. – С. 150 – 156.

9. Нгуен, А.Т. Встречное волновое выращивание областей локальных экстремумов полутоновых изображений / А.Т. Нгуен, В.Ю. Цветков // Кодирование и цифровая обработка сигналов в инфокоммуникациях: материалы международной научно-практической конференции, Минск, 4 апреля, 2019 г. / БГУИР. – Минск, 2019. – С. 66 – 72.

10. Nguyen, A.T. The search of extremes on the grayscale images using the space-oriented masks for region growing / A.T. Nguyen, V.Yu. Tsviatkou // International Conference on Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'2019). – Minsk, 2019. – P. 182–185.

11. Нгуен, А.Т. Волновое выращивание областей локальных экстремумов изображений / А.Т. Нгуен, Т.Х. Доан, В.Ю. Цветков // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: материалы междунар. научно-технич. семинара, Минск, ноябрь–декабрь, 2019 г. / БГУИР. – Минск, 2019. – С. 22–28.

12. Nguyen, A.T. A fully seeded region growing algorithm by wave propagation / A.T. Nguyen, T.H. Doan, V.Yu. Tsviatkou // Кодирование и цифровая обработка сигналов в инфокоммуникациях: материалы междунар. научно-технич. конференции, Минск, 24 апреля, 2020 г. / БГУИР. – Минск, 2020. – С. 5–11.

13. Nguyen, A.T. A multiple seeded region growing algorithm for image segmentation using local extrema / A.T. Nguyen, X.L. Dai, V.Yu. Tsviatkou // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: материалы междунар. научно-технич. семинара. Минск, ноябрь–декабрь, 2020 г. / БГУИР. – Минск, 2020. – С. 5–12.



Нгуен Ань Туан

Сегментацыя выяў з шырокім дынамічным дыяпазнам метадам нарошчвання абласцей

Ключавыя словы: вылучэнне абласцей лакальных экстрэмумаў, пошук лакальных экстрэмумаў, выявы з шырокім дынамічным дыяпазнам, паказчыкі манатоннасці змены яркасці, сегментацыя выяў, нарошчванне абласцей.

Мэта працы: павышэнне дакладнасці і хуткасці вылучэння абласцей лакальных яркасных экстрэмумаў для эфектыўнай апрацоўкі паўтонавых выяў з шырокім дынамічным дыяпазнам.

Метады даследавання і выкарыстоўванае абсталяванне: тэорыя лічбавай апрацоўкі выяў, пакет Matlab, мовы праграмавання C++ і JavaScript, адладкавы камплект Raspberry Pi 3 Model B, ARM-A53.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: мадэль выявы з шырокім дынамічным дыяпазнам, якая ўлічвае залежнасці колькасці і памераў абласцей ад бітавай глыбіні і ўстанаўлівае абмежаванне на манатоннасць змены яркасці вобласці, якая дазваляе ацаніць статыстычныя яркасныя асаблівасці абласцей лакальных экстрэмумаў; траекторныя паказчыкі ступені манатоннасці змены яркасці вобласці, заснаваныя на вылічэнні сумы маршрутаў мінімальнай даўжыні з манатоннай зменай яркасці ад кожнага пікселя вобласці да лакальнага экстрэмуму і вызначэнні колькасці пікселяў вобласці з змененым градыентам яркасці, якія дазваляюць падвысіць на 25 % дакладнасць ацэнкі падзелу выяў на вобласці; алгарытм сустрэчнага хвалевага нарошчвання абласцей лакальных экстрэмумаў, адрозніваюшчыся выкарыстаннем ітэратыўнай парогавай выбаркі пікселяў з раўнамерным сустрэчным змяненнем значэння парога, і градыентнай ўмовы далучэння сумежных пікселяў да вобласці, які дазваляе павысіць дакладнасць і ў 1,2 разы хуткасць вылучэння абласцей лакальных экстрэмумаў з манатоннай зменай яркасці; алгарытмы селектыўна-сегментнага і блокава-сегментнага пошуку лакальных экстрэмумаў, заснаваныя на аднаразовай выбарцы неэкстрэмальных пікселяў і параўнанні яркасцяў сумежных і межавых пікселяў аднастайных абласцей, дазваляюшчыя дасягнуць высокай дакладнасці марфалагічнага пошуку пры ў 2,1 – 4 разы большай хуткасці і ў 2,1 – 2,7 разы меншай складанасці.

Ступень выкарыстання: вынікі дысертацыйнай работы выкарыстаны ў лабараторным курсе па дысцыпліне "Тэхналогіі відэаназірання і відэаналітыкі" спецыяльнасці «Сістэмы і сеткі інфакамунікацый» магістратуры ва ўстанове адукацыі «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі» і сістэме відэаназірання кампаніі Elite Technology JSC (В'етнам).

Вобласць прымянення: сістэмы тэхнічнага гледжання.

РЕЗЮМЕ

Нгуен Ань Туан

Сегментация изображений с широким динамическим диапазоном методом наращивания областей

Ключевые слова: выделение областей локальных экстремумов, поиск локальных экстремумов, изображения с широким динамическим диапазоном, показатели монотонности изменения яркости, сегментация изображений, наращивание областей.

Цель работы: повышение точности и скорости выделения областей локальных яркостных экстремумов для эффективной обработки полутоновых изображений с широким динамическим диапазоном.

Методы и средства исследования: теория цифровой обработки изображений, пакет Matlab, языки программирования C++ и JavaScript, отладочный комплект Raspberry Pi 3 Model B, ARM-A53.

Полученные результаты и их новизна: модель изображения с широким динамическим диапазоном, учитывающая зависимости количества и размеров областей от битовой глубины и устанавливающая ограничение на монотонность изменения яркости области, позволяющая оценить статистические яркостные особенности областей локальных экстремумов; траекторные показатели степени монотонности изменения яркости области, основанные на вычислении суммы маршрутов минимальной длины с монотонным изменением яркости от каждого пикселя области до локального экстремума и определении количества пикселей области с измененным градиентом яркости, позволяющие повысить на 25 % точность оценки разделения изображений на области; алгоритм встречного волнового наращивания областей локальных экстремумов, отличающийся использованием итеративной пороговой выборки пикселей с равномерным встречным изменением значения порога, и градиентного условия присоединения смежных пикселей к области, позволяющий повысить точность и в 1,2 раза скорость выделения областей локальных экстремумов с монотонным изменением яркости; алгоритмы селективно-сегментного и блочно-сегментного поиска локальных экстремумов, основанные на однократной выборке неэкстремальных пикселей и сравнении яркостей смежных и граничных пикселей однородных областей, позволяющие достичь высокой точности морфологического поиска при в 2,1 – 4 раза большей скорости и в 2,1 – 2,7 раза меньшей сложности.

Степень использования: результаты диссертационной работы использованы в лабораторном курсе по дисциплине «Технологии видеонаблюдения и видеоаналитики» специальности «Системы и сети инфокоммуникаций» магистратуры в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» и системе видеонаблюдения компании Elite Technology JSC (Вьетнам).

Область применения: системы технического зрения.

SUMMARY

Nguyen Anh Tuan

**Segmentation of high dynamic range images
using the region growing method**

Keywords: segmentation of areas of local extrema, search for local extrema, images with a wide dynamic range, indicators of monotonicity of changes in brightness, image segmentation, region growing.

Aim of the work: increasing the accuracy and speed of segmentation of areas of local brightness extrema for efficient processing of grayscale images with a wide dynamic range.

Research methods and tools: digital image processing theory, Matlab package, C ++ and JavaScript programming languages, Raspberry Pi 3 Model B, ARM-A53.

Obtained results and their novelty: a image model with a wide dynamic range has been developed, which takes into account the dependence of the number and size of areas on the bit depth and sets a limit on the monotonicity of the brightness change in the area, which makes it possible to evaluate the statistical brightness features of the areas of local extrema; trajectory indices of the degree of monotonicity of changes in the brightness of an area, based on calculating the sum of routes of the minimum length with a monotonic change in brightness from each pixel of the area to a local extremum and determining the number of pixels of an area with a changed brightness gradient, which allows to increase the accuracy of estimating the separation of images by 25% a wide dynamic range in the area; an algorithm for counter-wave growth of local extrema regions, which is characterized by the use of an iterative threshold sampling of pixels with a uniform counter change in the threshold value, and a gradient condition for joining adjacent pixels to the region, which makes it possible to increase the accuracy and 1,2 times the rate of segmentation of local regions extrema with a monotonic change in brightness; algorithms for selective-segment and block-segment search for local extrema, based on a single sampling of non-extreme pixels and a comparison of the brightness of adjacent and boundary pixels of homogeneous regions, allowing to achieve high accuracy of morphological search with 2,1 – 4 times higher speed and 2,1 – 2,7 times less complexity.

Use guidelines: the results of the thesis were used in the laboratory course on the discipline "Technologies of video systems and video analytics" of the specialty "Systems, networks and telecommunication devices" of the master's program in the educational establishment "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics" and the camera security system of Elite Technology JSC (Vietnam).

Application area: systems of technical vision.

Научное издание

Нгуен Ань Туан

**СЕГМЕНТАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ШИРОКИМ ДИНАМИЧЕСКИМ
ДИАПАЗОНОМ МЕТОДОМ НАРАЩИВАНИЯ ОБЛАСТЕЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации

Подписано в печать 08.12.2021. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч. изд. л. 1,4. 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. Бровки, 6