

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 004.93'1; 004.932

Д.В. Прадун, Б.А. Залесский

**АВТОМАТИЧЕСКАЯ БИНАРИЗАЦИЯ ГРАДИЕНТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПОРОГОВОЙ ВЕЛИЧИНЫ**

Исследуется проблема автоматической бинаризации мультиспектральных и полутоновых изображений. Дается краткая характеристика основных типов алгоритмов и методов автоматического определения порога бинаризации. Приводится общая схема работы наиболее эффективных алгоритмов бинаризации. Сравниваются результаты бинаризации градиентных изображений, т. е. изображений, полученных в результате вычисления градиента исходного изображения. Проводится оценка качества адаптивного сглаживания изображений, содержащих шумовой сигнал, на основе выбранных алгоритмов автоматической бинаризации.

Введение

Процесс бинаризации, или приведения цветных и полутоновых изображений к бинарному виду, используется практически во всех основных направлениях обработки графических данных, особенно в процедурах сегментации, фильтрации и классификации изображений. Поэтому проблема нахождения точного порога бинаризации – одна из основополагающих при выполнении процедуры бинаризации. Эта проблема еще более актуальна при обработке так называемых градиентных изображений, т. е. изображений, полученных в результате вычисления градиента, или, другими словами, производной исходного снимка [1].

За последние годы было создано достаточно большое количество методов и алгоритмов автоматического определения порога бинаризации, использующих различные свойства обрабатываемых графических данных. Выделяют следующие основные алгоритмы бинаризации:

- основанные на свойствах и форме гистограмм изображений, где анализируются пики, точки минимума и кривизна сглаженной гистограммы;
- выполняющие кластеризацию изображения на два основных класса (задний и передний фоны);
- использующие свойства энтропии заднего и переднего фонов изображений, перекрестную энтропию между исходным и бинарным изображениями и т. д.;
- основанные на сравнении характеристик объектов изображения. В данных методах обычно происходит поиск меры схожести между полутоновым и бинарным изображениями;
- использующие распределение вероятности и/или корреляцию между пикселями;
- изменяющие значение порога для каждого пикселя в зависимости от локальных характеристик изображений [2].

Проведенные исследования показали, что среди выделенных групп алгоритмов наиболее приемлемые результаты бинаризации дают так называемые кластерные и энтропийные алгоритмы, среди которых можно выделить алгоритмы Китлера, Капура и Отсу. Отметим, что данный вывод совпадает с результатами других авторов. Кроме того, существует так называемая многоуровневая бинаризация, когда изображение разбивается на два разных сегмента при помощи нескольких пороговых значений. Обычно такая бинаризация используется для изображений, гистограмма которых содержит несколько пиковых значений и точек минимума [3].

В настоящей статье исследуется использование различных алгоритмов автоматической бинаризации непосредственно для градиентных изображений. Для этого был выбран ряд наиболее эффективных методов вычисления порогового значения бинаризации. Полученные результаты бинаризации используются для алгоритма адаптивной фильтрации мультиспектральных изображений [1].

1. Обозначения и общая характеристика алгоритмов бинаризации

Обозначим через $g = 0, \dots, G$ диапазон всех возможных порогов бинаризации, а через $p(g)$ – вероятность того, что случайная переменная (в случае графических данных – интенсивность пикселя) равна значению g . Если для изображения размером N построить гистограмму распределения интенсивности пикселей $h(g)$, то такая оценка вероятности будет определяться следующим образом:

$$p(g) = \frac{N_g}{N}, \quad (1)$$

где N_g – число пикселей, интенсивность которых равна g .

Тогда функция распределения вероятности $P(g)$ будет определяться как

$$P(g) = \sum_{i=0}^g p(i). \quad (2)$$

Основной задачей процесса бинаризации является разделение пикселей на задний и передний фоны. Поэтому если обозначить через $p_b(g)$, $0 \leq g \leq T$, оценку вероятности для заднего фона, а через $p_f(g)$, $T+1 \leq g \leq G$, оценку вероятности для переднего фона, где T – пороговое значение бинаризации, то суммарные функции вероятности для каждого фона будут определяться следующим образом [2]:

$$P_b(T) = P_b = \sum_{g=0}^T p(g); \quad P_f(T) = P_f = \sum_{g=T+1}^G p(g). \quad (3)$$

Исходя из данных определений функций вероятности можно вывести формулы для вычисления математического ожидания и дисперсии. Так, математическое ожидание и дисперсия для заднего фона как функции бинаризации по порогу T будут вычисляться по формулам

$$m_b(T) = \sum_{g=0}^T g \cdot p(g); \quad \sigma_b^2(T) = \sum_{g=0}^T (g - m_b(T))^2 \cdot p(g). \quad (4)$$

Аналогично для переднего плана изображения [2]:

$$m_f(T) = \sum_{g=T+1}^G g \cdot p(g), \quad \sigma_f^2(T) = \sum_{g=T+1}^G (g - m_f(T))^2 \cdot p(g). \quad (5)$$

Формулы (3)–(5) используются для определения энтропии заднего фона и переднего плана изображения, гистограммы изображения, а также пространственных свойств графических объектов практически во всех алгоритмах автоматического определения порога бинаризации, в том числе в кластерных и энтропийных алгоритмах. На основе выполненных исследований [2] было установлено, что наиболее подходящими алгоритмами бинаризации для мультиспектральных изображений являются кластерные методы Китлера и Отсу. Кроме того, целый ряд энтропийных методов, например метод Капура, также дают приемлемые результаты бинаризации.

1.1. Кластерные методы бинаризации

В данном классе методов графические данные подвергаются кластерному анализу с фиксированным числом кластеров, равным 2. Одним из наиболее распространенных среди кластерных методов является алгоритм Отсу [2, 4]. В общем, метод Отсу максимизирует вероятность выбора такого порога, который позволяет отделить объект на изображении от его фона. Согласно Отсу [5] оптимальный порог для бинаризации достигается минимизации взвешенной суммы дисперсий внутри каждого кластера или, с другой стороны, максимальной суммы межклассовой дисперсии, т. е.

$$T_{opt} = \arg \max \left\{ \frac{P_b(T)[1 - P_b(T)][m_f(T) - m_b(T)]^2}{P_b(T)\sigma_b^2 + [1 - P_b(T)]\sigma_f^2} \right\}, \quad (6)$$

где $T = 0, \dots, G$, а $P_b(T)$, $m_f(T)$, $m_b(T)$, $\sigma_b^2(T)$ и $\sigma_f^2(T)$ рассчитываются по формулам (3)–(5).

Среди кластерных методов следует выделить алгоритм Китлера. Он относится к так называемым методам определения порога бинаризации с минимальной ошибкой [2]. Как показали исследования на тестовых изображениях, это один из наиболее точных алгоритмов бинаризации изображений. Оптимальный порог в алгоритме Китлера определяется по формуле

$$T_{opt} = \arg \min \{P_b(T) \cdot \log \sigma_b(T) + (1 - P_b(T)) \cdot \log \sigma_f(T) - P_b(T) \cdot \log P_b(T) - (1 - P_b(T)) \cdot \log(1 - P_b(T))\}. \quad (7)$$

1.2. Энтропийные методы бинаризации

Алгоритмы данного класса используют показатель энтропии заднего фона и объектов изображения. Под энтропией понимается мера информативности отдельных деталей изображения, которая впервые была определена Шенноном в 1949 г. [3, 6]. Энтропийные алгоритмы бинаризации в качестве оптимального порога выбирают тот, который либо максимизирует показатель энтропии, т. е. достигает максимума передачи информации, либо минимизирует энтропию между исходным полутоновым снимком и полученным бинарным изображением [2].

Среди наиболее эффективных энтропийных методов можно выделить алгоритм Капура [7]. Данный алгоритм рассматривает объекты изображений и их задний фон как два разных источника сигналов, поэтому когда сумма энтропий двух данных классов достигает своего максимума, можно утверждать, что найден оптимальный порог бинаризации.

Обозначим через $H_f(T)$ и $H_b(T)$ энтропии переднего плана и заднего фона изображения соответственно. Тогда согласно [2, 6] эти показатели будут вычисляться по формулам

$$H_b(T) = - \sum_{g=0}^T \frac{p(g)}{P_b(T)} \cdot \log \frac{p(g)}{P_b(T)}; \quad H_f(T) = - \sum_{g=T+1}^G \frac{p(g)}{P_f(T)} \cdot \log \frac{p(g)}{P_f(T)}, \quad (8)$$

где $T = 0, \dots, G$. В случае графических изображений исходя из формулы (3) видно, что $P(T)$ будет фактически определять размер изображения. Тогда оптимальный порог бинаризации по Капуру будет определяться как

$$T_{opt} = \arg \max [H_b(T) + H_f(T)]. \quad (9)$$

2. Использование алгоритмов автоматической бинаризации для градиентных изображений

Описанные алгоритмы автоматической бинаризации в основном применяются для обычных полутоновых и многоспектральных изображений. Однако качество их работы при бинаризации градиентных изображений до сих пор не было изучено. Поэтому для решения данной задачи были выбраны именно те методы и алгоритмы, которые на обычных изображениях давали наилучшие результаты [2]: Капура, Китлера и Отсу. Данные алгоритмы тестировались на градиентных изображениях, полученных в результате вычисления градиента изображения в алгоритме адаптивного сглаживания [1]. Напомним, что определение градиента выполняется с помощью градиентных масок в вертикальном, горизонтальном и диагональных направлениях:

1	2	1
-1	-2	-1

1	-1
2	-2
1	-1

1	2	1	0
0	-1	-2	-1

0	-1	-2	1
1	2	1	0

Примеры тестовых изображений показаны на рис. 1, результаты работы алгоритмов бинаризации градиентных изображений – на рис. 2 и 3.



Рис. 1. Исходные тестовые изображения аэродромов: а) аэросъемка; б) спутниковая съемка

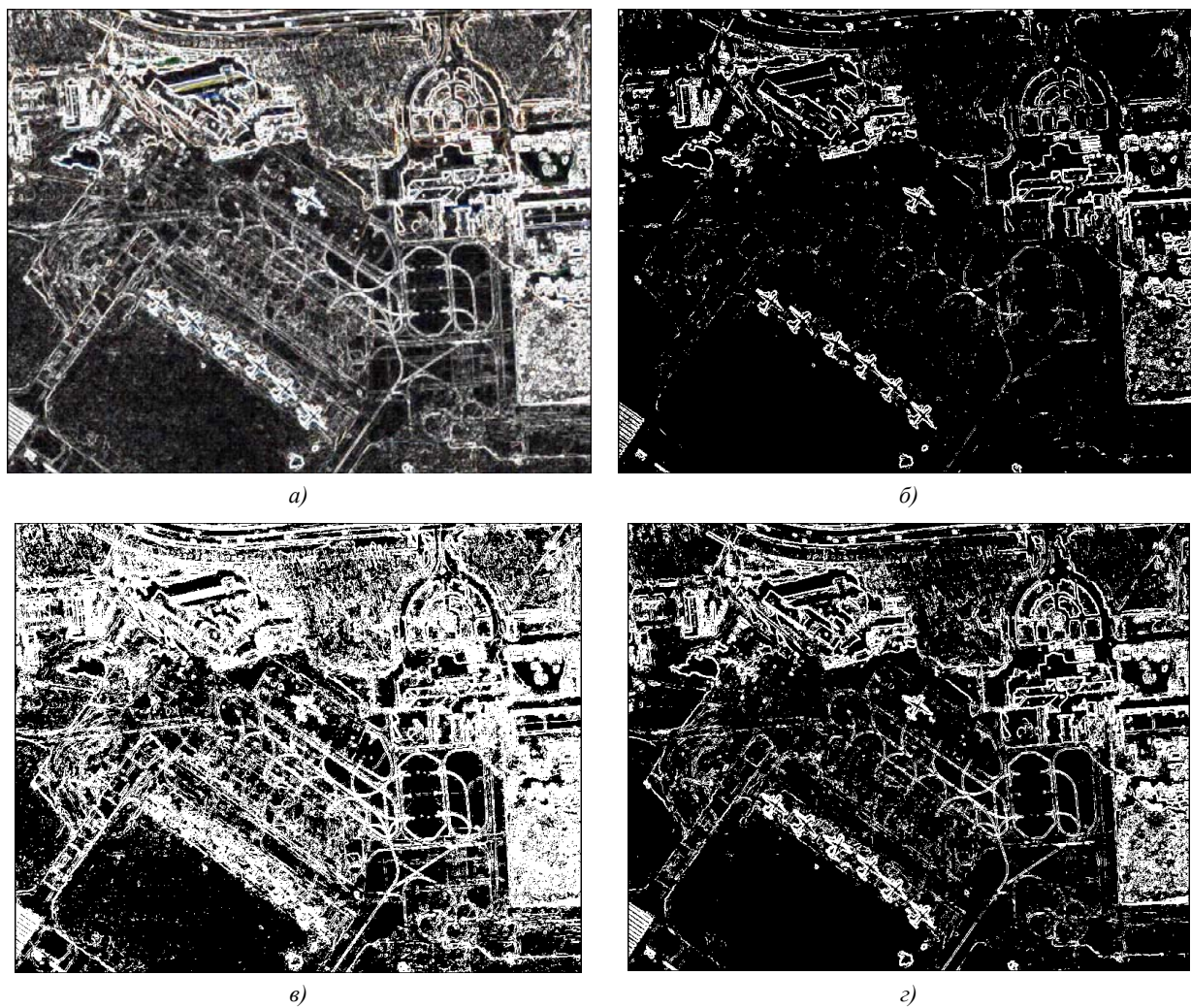


Рис. 2. Примеры бинаризации снимка на рис. 1, а: а) исходное градиентное изображение; б) результат бинаризации алгоритмом Капура; в) алгоритмом Китлера; г) алгоритмом Отсу

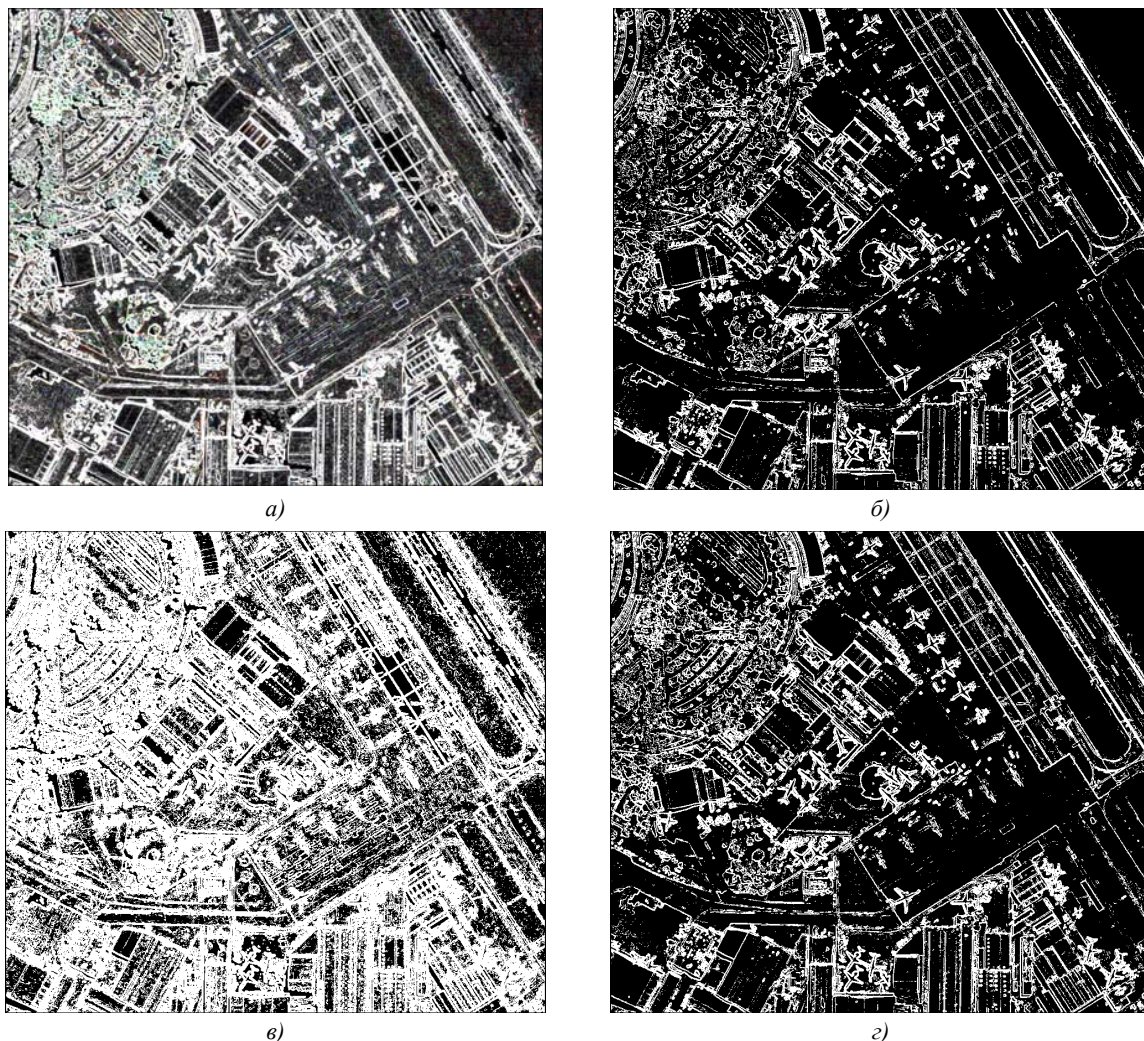


Рис. 3. Примеры бинаризации снимка на рис. 1, б: а) исходное градиентное изображение; б) результат бинаризации алгоритмом Капура; в) алгоритмом Китлера; г) алгоритмом Отсу

Исходя из результатов бинаризации можно сделать вывод, что наиболее подходящим алгоритмом автоматической бинаризации для градиентных изображений является алгоритм Отсу, хотя в [2] наиболее эффективным и качественным алгоритмом отмечается метод Китлера. Метод Капура хотя и отмечается как один из лучших, однако для градиентных изображений он задает слишком высокий порог бинаризации, что приводит к потере границ изображений. Алгоритм Китлера задает слишком низкий порог бинаризации, вследствие чего происходит чрезмерное сглаживание изображений. Однако данный алгоритм дает неплохие результаты бинаризации при определении порога для градиента, полученного для сглаженного изображения.

Результаты использования алгоритма Отсу для бинаризации градиента в алгоритме адаптивной фильтрации [1] показали, что, несмотря на приемлемые результаты бинаризации, алгоритм Отсу неспособен определить оптимальный порог бинаризации при обработке зашумленных изображений. Поэтому в таких ситуациях выгоднее использовать алгоритм Китлера. При этом необходимо выполнять так называемое двойное сглаживание. Это означает, что после того как изображение сглажено алгоритмом адаптивной фильтрации, необходимо провести повторное определение градиента, его бинаризацию и новое сглаживание. Повторная бинаризация перед сглаживанием проводится исходя из порогов бинаризации, полученных после бинаризации градиента сглаженного изображения. На рис. 4 показаны результаты бинаризации градиента при двойном сглаживании изображения. Видно, что использование алгоритма Китлера предпочтительно в таких случаях, так как алгоритм Отсу при повторной бинаризации градиента задает слишком высокий порог, а это приводит к потере градиентных пикселей (рис. 4, ж), т. е. к чрезмерному сглаживанию (рис. 4, и).

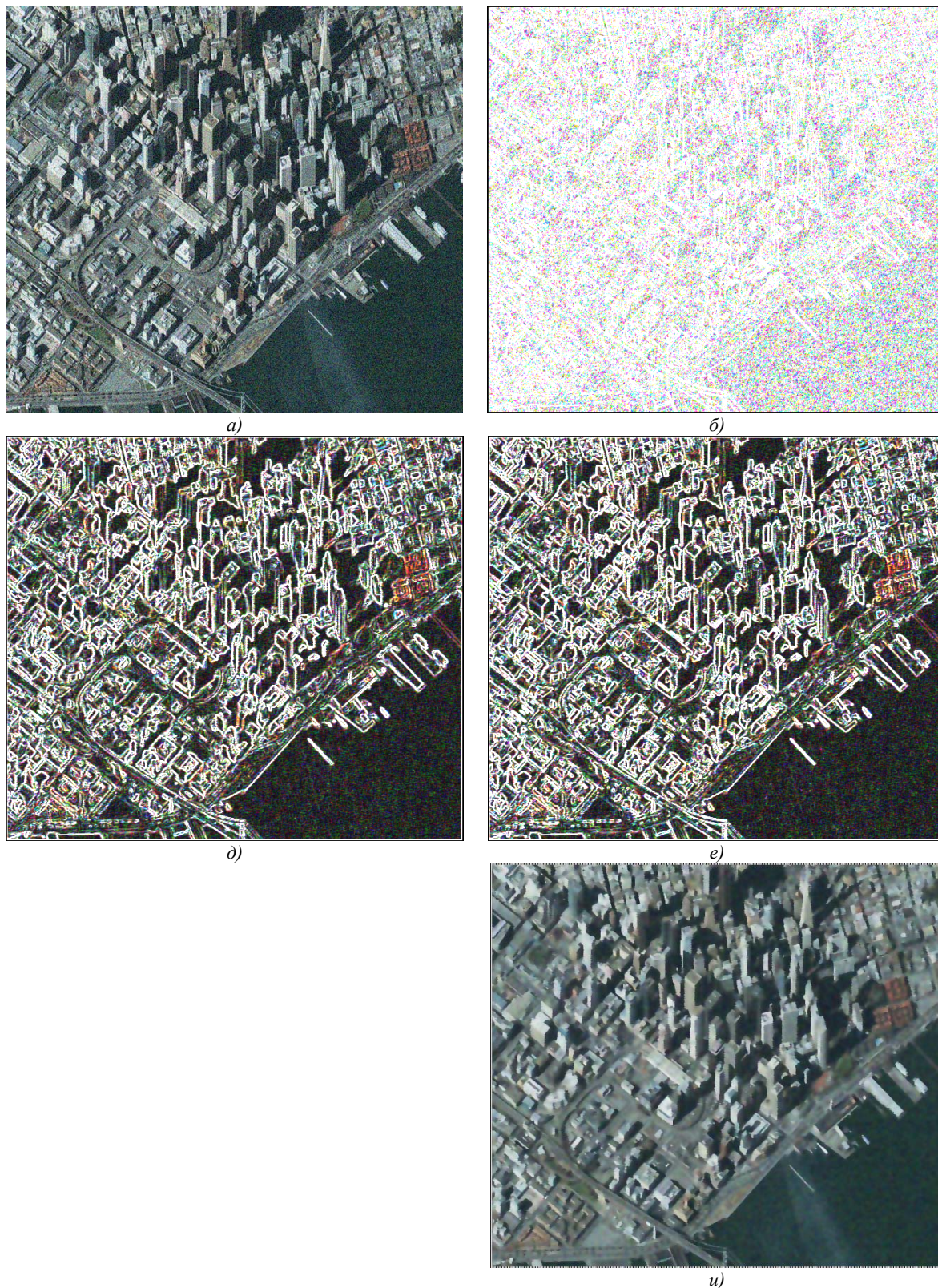
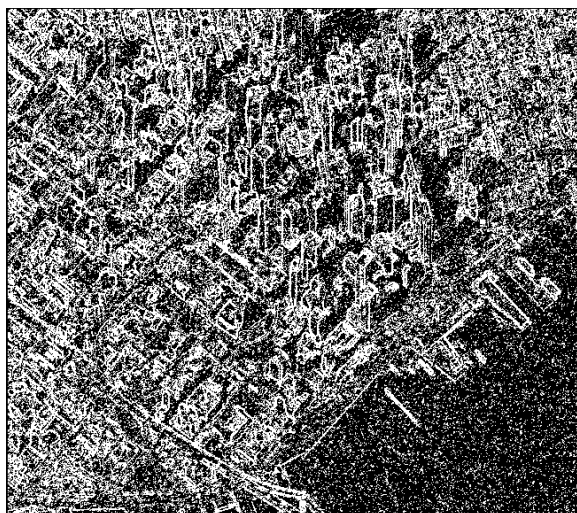
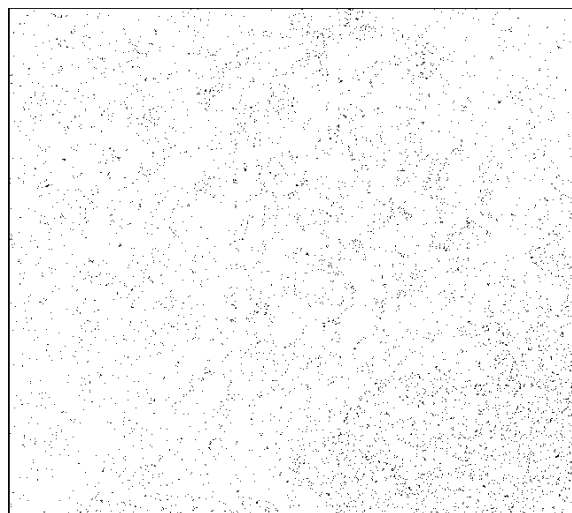


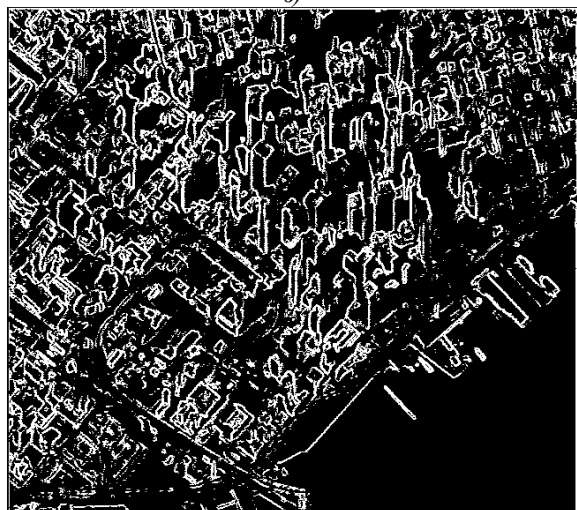
Рис. 4. Примеры двойного сглаживания изображения: *a)* исходное изображение; *б)* градиент *д), е)* градиенты, полученные в результате адаптивного сглаживания на основе бинаризации изображения алгоритмами Отсу и Китлера соответственно; *и), к)* результаты повторного



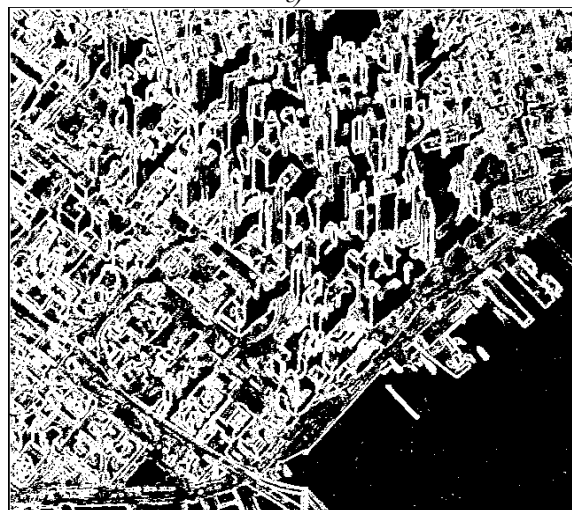
б)



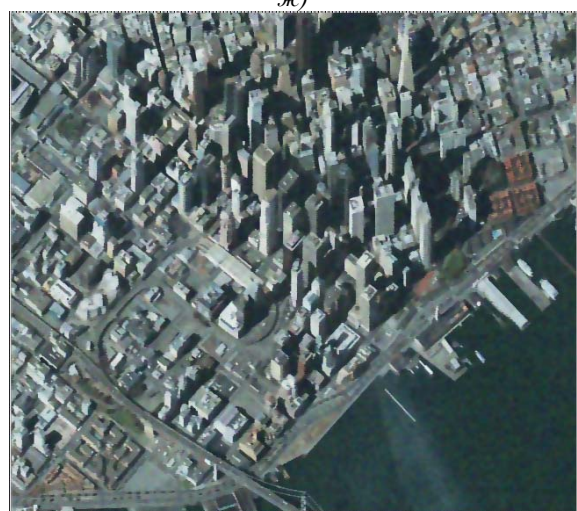
в)



ж)



з)



к)

исходного изображения; в), з) результаты бинаризации алгоритмами Отсу и Китлера соответственно; ж), з) результаты бинаризации градиентов сглаженного сглаживания на основе градиентов, бинаризованных алгоритмами Отсу и Китлера соответственно

Заключение

Анализ существующих методов и алгоритмов автоматической бинаризации, а также их применение для градиентных изображений в алгоритме адаптивной фильтрации показали, что наиболее удобным алгоритмом поиска порога бинаризации является метод Отсу. Бинаризованные градиентные изображения с помощью данного алгоритма не содержат слишком большого количества градиентных пикселей и толстых граней, однако повторное применение алгоритма Отсу при обработке зашумленных изображений приводит к чрезмерному сглаживанию изображения, т. е. к стиранию граней объектов. Поэтому в подобных случаях желательно использовать алгоритм Китлера, который при одинарном использовании задает слишком низкий порог бинаризации. Следовательно, при сглаживании изображения, в котором не присутствует шумовой сигнал или он незначителен, необходимо использовать алгоритм Отсу как наиболее точный алгоритм автоматической бинаризации. Если же космо- или аэроснимок содержит достаточное количество шума, необходимо выполнить повторное сглаживание изображения, используя при этом бинаризацию с помощью алгоритма Китлера.

Список литературы

1. Залесский, Б.А. Алгоритм адаптивной фильтрации мультиспектральных изображений / Б.А. Залесский, Д.В. Прадун // Информатика. – 2009. – № 2 (22). – С. 31–38.
2. Sezgin, M. Survey over image thresholding / M. Sezgin, B. Sankur // Journal of Electronic Imaging. – 2004. – Vol. 13, № 1. – P. 146–165.
3. Acharya, T. Image Processing. Principles and applications / T. Acharya, A.K. Ray. – New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2005. – 428 p.
4. Nixon, M.S. Feature Extraction and Image Processing / M.S. Nixon, A.S. Aguado. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2002. – 350 p.
5. Otsu, N. A threshold selection method from gray level histograms / N. Otsu // IEEE Trans. Syst. Man Cybern. – 1979. – SMC-9, № 1. – P. 62–66.
6. Прэртт, У. Цифровая обработка изображений : пер. с англ. : в 2 т. / У. Прэртт ; под ред. Д.С. Лебедева. – М. : Мир, 1982. – Т. 2. – 478 с.
7. Kapur, J.N. A new method for gray-level picture thresholding using entropy of the histogram / J.N. Kapur, P.K. Sahoo, A.K.C. Wong // Graph. Models Image Process. – 1985. – Vol. 29. – P. 273–285.

Поступила 11.06.09

*Объединенный институт проблем
информатики НАН Беларуси,
Минск, Сурганова, 6
e-mail: pradundv@gmail.com*

D.V. Pradun, B.A. Zalesky

AUTOMATIC BINARIZATION OF GRADIENT IMAGES BASED ON THE CLUSTERING METHOD OF THRESHOLD VALUE DEFINITION

The problem of automatic binarization of multispectral and gray-scale satellite images as well as binarization of their gradients is investigated. A brief review of the basic types of algorithms and methods of automatic definition of a threshold value is given. The general scheme of the most efficient thresholding algorithms is represented. The results of binarization of gradient images represented the images, obtained as a result of calculation of gradient of the initial image are compared. The quality assessment of adaptive smoothing of satellite images degraded by noise on the basis of the chosen automatic thresholding algorithms is discussed.