

УДК 004.93'1; 004.932

Б.А. Залесский, Д.В. Прадун

АЛГОРИТМ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Предлагается алгоритм адаптивного сглаживания изображений с учетом границ их однородных областей, основанный на вычислении границ с помощью адаптивного градиента, автоматической бинаризации градиента, адаптивного, на основе локальных характеристик шума, гауссовского сглаживания исходного изображения с сохранением границ. Дается краткий обзор основных алгоритмов и методов фильтрации изображений, их основных недостатков и особенностей. Проводятся оценка уровня локального шума изображения, близости каждого пикселя к границам однородных областей, а также сравнение результатов работы алгоритма адаптивной фильтрации в нескольких режимах. Полученные результаты сравниваются с результатами других алгоритмов фильтрации.

Введение

Алгоритмы фильтрации и сглаживания изображений нашли свое применение во многих мультимедийных системах, цифровой фотографии, а также задачах обработки и классификации изображений. Большинство современных программных комплексов и графических редакторов, предназначенных для обработки изображений, содержит набор сглаживающих процедур. В качестве примера можно привести Adobe Photoshop и Corel Draw, в которых процедуры сглаживания изображений являются одними из ключевых.

В прикладных задачах обработки изображений сглаживание применяется не только для подавления помех различных типов, связанных с несовершенством изображающей системы, но и для устранения малоразмерных деталей, мешающих восприятию объектов интереса, – так называемой генерализации изображения.

Существующие в настоящее время алгоритмы сглаживания и фильтрации [1–5] обладают двумя следующими недостатками: они либо сильно искажают изображение вблизи границ его однородных областей, которые в дальнейшем будем называть *границами изображения*, и сами границы, либо недостаточно сглаживают изображение. Это характерно, например, для всех линейных сглаживающих фильтров, а также некоторых нелинейных, локальных и адаптивных алгоритмов.

Простейшим средством подавления шумов является линейная фильтрация сигнала [1]. Кроме процедуры линейной фильтрации существуют алгоритмы нелинейной фильтрации, пороговые алгоритмы, а также адаптивные методы сглаживания. К ним можно отнести медианный фильтр, сглаживание с переменной формой окна, пороговое сглаживание, сигнально-адаптивные и контекстно зависимые методы сглаживания, гауссовские фильтры и др. [2]. Благодаря использованию фильтрующей маски, заменяющей исходные значения пикселей на средние значения, достигается уменьшение резких переходов уровней яркости. Однако недостаток большинства сглаживающих фильтров заключается в том, что контуры, которые обычно представляют интерес на изображении и также характеризуются резкими перепадами яркостей, подвергаются так называемой расфокусировке, или «размытию» [3]. Ярким примером этого является один из наиболее простых и эффективных алгоритмов нелинейной фильтрации – медианный фильтр, который в одних случаях обеспечивает подавление шума, а в других – вызывает нежелательное подавление сигнала [4]. Это же касается и гауссовского оператора сглаживания, который, в отличие от медианного, лучше удаляет шумы за счет «стирания» контуров объектов.

Для решения проблемы чрезмерного сглаживания контуров на изображении существуют так называемые адаптивные фильтры. Основная идея таких фильтров заключается в том, что сглаживание выполняется лишь тогда, когда сигнал слабо отличается от шума, в то время как значения яркости остаются неизменными, когда обнаруживается наличие сильного шума. Од-

нако основным недостатком таких фильтров является то, что в окрестностях контуров, границ объектов и других деталей изображения шум не устраняется [5].

Очень сложно найти алгоритм, который способен одновременно свести к минимуму упомянутые выше ошибки. Одним из таких алгоритмов является фильтр Smart Blur, представленный в пакете Adobe Photoshop. Он недоступен для использования в открытых системах обработки космических изображений, так как является запатентованным алгоритмом с закрытым кодом.

В настоящей статье описан алгоритм адаптивного сглаживания изображений с учетом их границ, который был разработан специально для обработки аэро- и космических изображений, в том числе и многоспектральных. Данный алгоритм является полностью автоматическим и выполняет процессы определения границ и сглаживания изображения в горизонтальном, вертикальном и диагональных направлениях. Основной задачей при его разработке было достижение приемлемого качества получаемого изображения. Исходя из этой задачи были подобраны параметры алгоритма: характер локального сглаживания изображения и его градиента, а также способ автоматической бинаризации вычисленных границ.

Предложенный алгоритм адаптивного сглаживания учитывает многоспектральность изображений, так как каждый шаг алгоритма может выполняться независимо над всеми его спектральными каналами, имеющимися в изображении. Это позволяет сохранить цветовое содержание изображения, что может быть использовано для дальнейшей классификации и распознавания обрабатываемого изображения.

1. Обозначения и общая схема алгоритма

Обозначим через $\Omega = \{0, \dots, n\} \times \{0, \dots, m\}$ множество пикселей RGB-изображения $I = \{I_j\}_{j \in \Omega}$ со значениями $I_j = (R_j, G_j, B_j) \in \{0, \dots, 255\}^3$ в каждом пикселе j , а через ∂_α – разностную производную в направлении вектора, составляющего угол α с осью OX изображения. Далее будем использовать разностные производные $\partial_0, \partial_{\pi/4}, \partial_{\pi/2}, \partial_{3\pi/4}$, понимая пиксели изображения $\partial_\alpha(I) = (\partial_\alpha(R), \partial_\alpha(G), \partial_\alpha(B))$ как ребра, разделяющие соответствующие пиксели I . Например, $\partial_{0,j}(R)$ – ребро, разделяющее пиксели $j = (j_1, j_2)$ и $(j_1 + 1, j_2)$ изображения R и т. д.

Градиент $Gr(I)$ изображения примем как вектор с компонентами

$$Gr(R) = \sum_{\alpha} w_{\alpha} |\partial_{\alpha}(R)|, \quad Gr(G) = \sum_{\alpha} w_{\alpha} |\partial_{\alpha}(G)|, \quad Gr(B) = \sum_{\alpha} w_{\alpha} |\partial_{\alpha}(B)|,$$

где w_{α} – неотрицательные весовые коэффициенты, $\alpha = 0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}$.

Оператор адаптивной бинаризации изображения обозначим через B , а оператор сглаживания – через S , помня о его адаптивном характере $S = S(I)$. Под локальной выборочной дисперсией изображения $\sigma(I)$ будем понимать матрицу с элементами $\sigma_j(I)$, $j \in \Omega$.

Общая схема алгоритма показана на рис. 1.

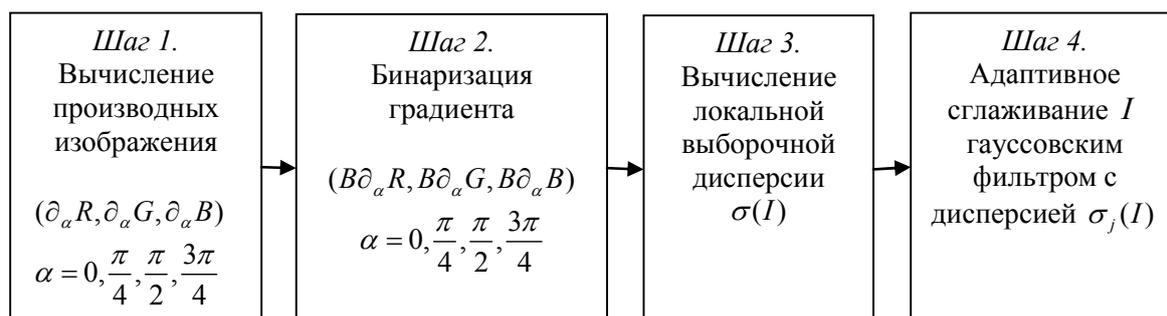


Рис. 1. Схема алгоритма адаптивного сглаживания

Шаг 1. Вычисление производных. На первом шаге выполняется выделение границ объектов на изображении с помощью разностных производных по направлениям $Gr_\alpha(I) = (\partial_\alpha(R), \partial_\alpha(G), \partial_\alpha(B))$, $\alpha = 0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}$, и градиента $Gr(I)$. Напомним, что под градиентными изображениями понимаются ребра, разделяющие соответствующие соседние пиксели исходного изображения I . Так, например, пиксель $j = (j_1, j_2)$ изображения $\partial_0(R)$ соответствует ребру, разделяющему пиксели (j_1, j_2) и $(j_1 + 1, j_2)$ изображения R . Производные вычисляются с помощью масок для вертикального, горизонтального и диагональных градиентов соответственно:

| | | |
|----|----|----|
| 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 |

Шаг 2. Бинаризация градиента. Бинаризация градиента, полученного на первом шаге алгоритма адаптивного сглаживания, производится автоматически одним из двух способов: либо независимо для каждой из производных $\partial_\alpha(I)$, $\alpha = 0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}$, либо на основе градиента $Gr(I)$. Для этого строится гистограмма градиента (рис. 2).

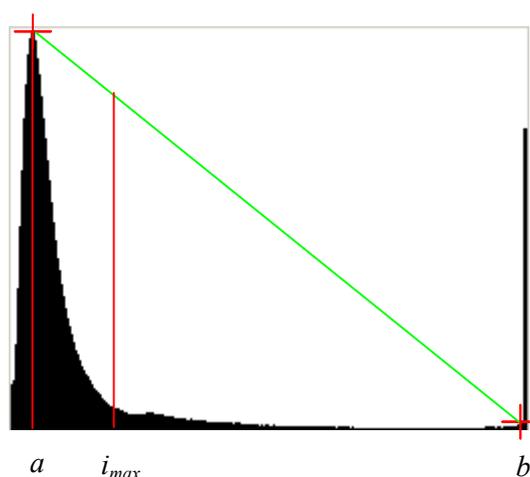


Рис. 2. Общий вид гистограммы градиента изображения

В обоих случаях гистограмма сначала сглаживается, затем находится ее максимальное значение в нижней части яркостного диапазона и минимальное значение в верхней его части.

Через полученные точки плоскости проводится отрезок. В качестве порога выбирается значение яркости, соответствующее максимальному расстоянию по оси OY между сглаженной гистограммой и построенным отрезком. Затем выполняется бинаризация градиентного изображения. Она необходима для того, чтобы определить, какие пиксели изображения принадлежат границам объектов изображения и, следовательно, должны быть исключены из процедуры сглаживания.

Шаг 3. Вычисление дисперсии. В общем виде дисперсия характеризует степень отклонения случайной величины от своего среднего значения [6]. В предлагаемом алгоритме используется так называемая оконная выборочная дисперсия. Для вычисления ее значения применяются только значения тех пикселей, которые не разделяются как бинаризованным градиентом изображения $B(Gr(I))$, так и бинаризованными производными по направлениям $B(\partial_\alpha(I))$, полученными на предыдущем шаге алгоритма. Для окрестностей, не разделенных градиентом, дисперсия задается в первом случае формулами

$$\sigma_{j,x}(U) = \frac{1}{3} \sum_{i=-1}^1 \left(U_{(j_1+i, j_2)} - \frac{1}{3} \sum_{i=-1}^1 U_{(j_1+i, j_2)} \right)^2; \quad (1)$$

$$\sigma_{j,y}(U) = \frac{1}{3} \sum_{i=-1}^1 \left(U_{(j_1, j_2+i)} - \frac{1}{3} \sum_{i=-1}^1 U_{(j_1, j_2+i)} \right)^2, \quad (2)$$

где $U = R, G, B$, или во втором случае одной формулой

$$\sigma_{j,x}(U) = \sigma_{j,y}(U) = \sigma_{j,45}(U) = \sigma_{j,135}(U) = \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 \left(U_{(j_1+k, j_2+l)} - \frac{1}{9} \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 U_{(j_1+k, j_2+l)} \right)^2. \quad (3)$$

Полученные значения дисперсий используются в качестве параметров гауссовского оператора сглаживания, который применяется к изображению на следующем шаге.

$$\rho_j(U) = \exp \left\{ -\frac{j_1^2}{2\sigma_{j,x}(U)} - \frac{j_2^2}{2\sigma_{j,y}(U)} - \frac{2j_1j_2}{2\sigma_{j,xy}(U)} \right\}.$$

$$\sigma_{j,xy}(U) = \frac{\sigma_{j,45} + \sigma_{j,135}}{2}.$$

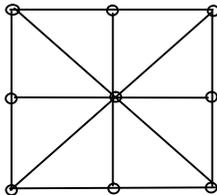


Рис. 3. Исходный неразрезанный граф G_j .

Если между центральным и боковым пикселями проходит ребро одной из бинаризованных производных по направлению $B(\partial_\alpha(I))$, которое разрезает ребро графа, то это ребро вместе с висящей на ней вершиной выбрасывается из графа G_j . Таким образом, окончательно получается граф G_j , содержащий только центральную и неразрезанные производными по направлению $B(\partial_\alpha(I))$ или градиентом $Gr(U)$ вершины.

Операция свертки записывается в виде

$$U_{j,\text{сглаж}} = \frac{\sum_{i \in G_j} U_{j-i} \rho_i(U)}{\sum_{i \in G_j} \rho_i(U)}.$$

Данный способ сглаживания предотвращает размазывание границ изображения, характерное для других фильтров.

2. Результаты работы алгоритма

Для проверки работы алгоритма был реализован тестовый модуль в среде разработки Microsoft Visual Studio 2005. Для тестирования использовались космические и аэроснимки с тремя спектрами цвета. Каждый снимок обрабатывался в следующих основных режимах:

- 1) общий градиент изображения, для которого определяется локальная дисперсия во всех четырех направлениях;
- 2) градиенты изображения во всех четырех направлениях, для каждого из которых определяется локальная дисперсия;
- 3) градиенты изображения во всех четырех направлениях, для каждого из которых определяется общая дисперсия.

Кроме того, после выполнения процесса сглаживания было реализовано повторное вычисление градиента изображения, что позволяет определить качество фильтрации. Примеры работы всех трех режимов показаны на рис. 4–6.

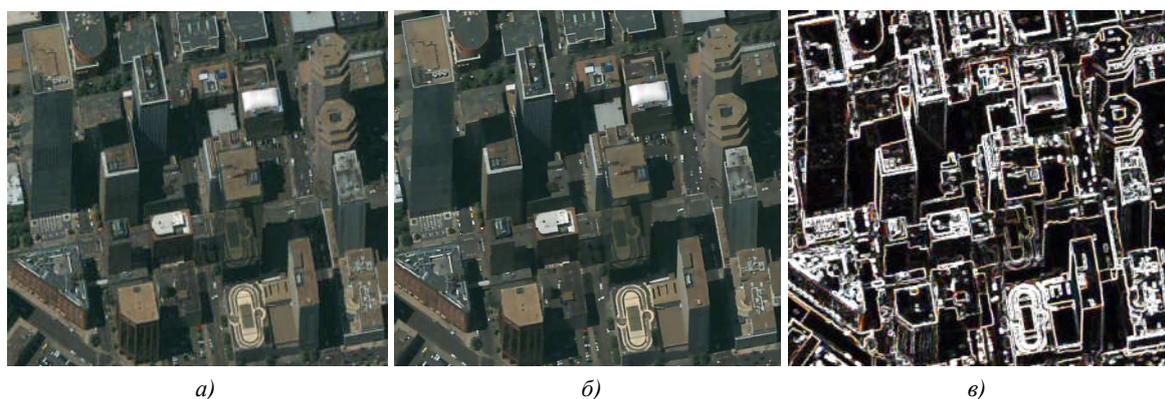


Рис. 4. Фрагмент снимка квартала в Денвере: а) исходный снимок; б) изображение, сглаженное на основе вычисления общей дисперсии; в) градиент сглаженного изображения



Рис. 5. Фрагмент зашумленного снимка: а) исходный снимок; б) изображение, сглаженное на основе вычисления общего градиента; в) градиент сглаженного изображения

При тестировании всех режимов сглаживания было установлено, что наиболее оптимальным является второй режим фильтрации, так как он максимально учитывает текстурные особенности изображения и корректирует свою работу на основе этих особенностей. Однако в некоторых ситуациях использование третьего режима является более выгодным. Выбор режима сглаживания зависит от того, насколько велика контрастность пикселей на изображении. При незначительном перепаде контрастности между пикселями, принадлежащими границам объектов, и пикселями заднего фона вычисление общей дисперсии изображения имеет преимущество перед другими режимами.

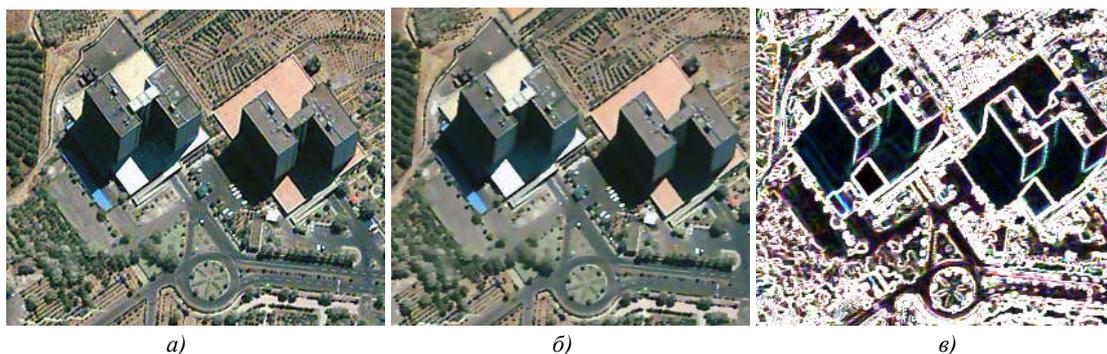


Рис. 6. Фрагмент снимка городских построек в Тегеране: *а)* исходный снимок; *б)* изображение, сглаженное на основе локальной дисперсии для градиентов во всех четырех направлениях; *в)* градиент сглаженного изображения

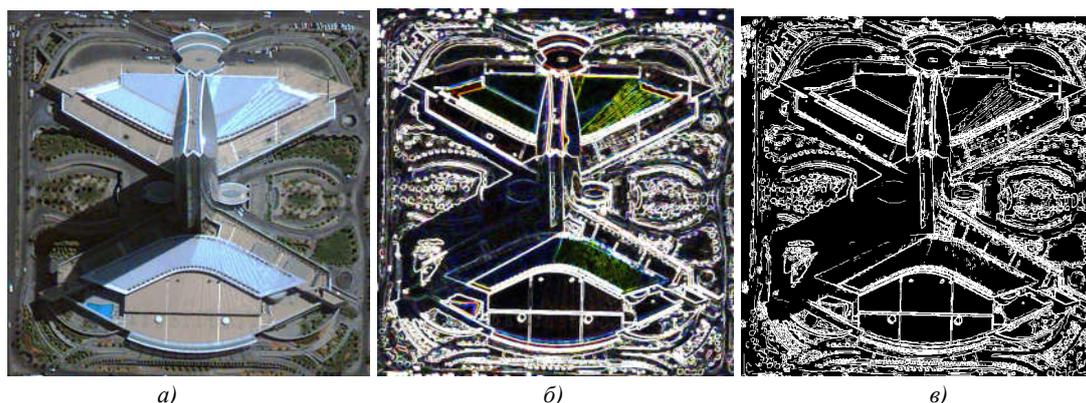


Рис. 7. Пример работы алгоритма адаптивной фильтрации и Smart Blur: *а)* исходный снимок; *б)* градиент изображения, полученный после работы алгоритма адаптивной фильтрации; *в)* градиент изображения, полученный после работы алгоритма Smart Blur

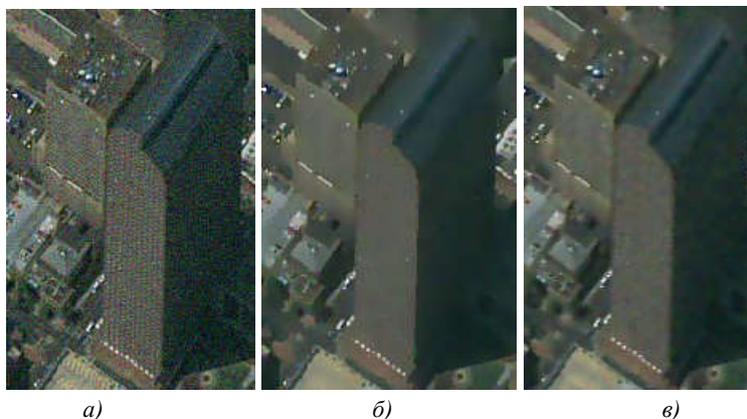


Рис. 8. Пример работы алгоритма адаптивной фильтрации и Smart Blur с зашумленным изображением: *а)* исходный снимок с добавленным шумом; *б)* сглаженное изображение, полученное после работы алгоритма адаптивной фильтрации; *в)* сглаженное изображение, полученное после работы алгоритма Smart Blur

Если сравнить результаты работы алгоритма адаптивного сглаживания с алгоритмом Smart Blur, то можно увидеть, что предложенный алгоритм работает не хуже, а в некоторых ситуациях даже лучше фильтра Smart Blur (рис. 7). Так, например, сглаживание принудительно зашумленного изображения алгоритмом Smart Blur приводит к тому, что многие пиксели шума начинают рассматриваться алгоритмом как пиксели, принадлежащие контурам изображения (рис. 8). Несмотря на то, что алгоритм адаптивного сглаживания при этом по качеству сглаживания однородных областей уступает алгоритму Smart Blur, он гораздо лучше позволяет убрать лишний шум с изображения. Это доказывает, что предложенный алгоритм адаптивной фильтрации может быть использован как аналог алгоритма Smart Blur.

При этом следует учитывать, что алгоритм адаптивной фильтрации работает полностью автоматически, в то время как приведенные результаты Smart Blur были получены только при дополнительных настройках и подгонке параметров фильтрации.

Заключение

Предложенный алгоритм фильтрации с помощью адаптивного окна имеет определенные преимущества перед существующими алгоритмами сглаживания. В сравнении с автоматическими алгоритмами фильтрации он учитывает принадлежность пикселей к контурам изображения, при этом получая результаты, сравнимые и даже иногда превосходящие результаты работы полуавтоматических алгоритмов. Кроме сглаженного изображения, алгоритм позволяет получать градиентное изображение на основе сглаженного, причем данный градиент сохраняет цветовое содержание изображения, что может быть использовано в процессе распознавания образов.

Несмотря на достигнутые положительные результаты, в работе алгоритма фильтрации с помощью адаптивного окна существуют определенные трудности. Основной недостаток алгоритма заключается в методе автоматической бинаризации градиента, так как не у всех градиентных изображений гистограммы удовлетворяют заданному виду. Вследствие этого для некоторых изображений автоматически выбирается слишком низкий порог бинаризации, что приводит к неправильной бинаризации самого градиента. Поэтому дальнейшие исследования будут направлены на разработку более точного алгоритма автоматического определения порога бинаризации.

Список литературы

1. Ярославский, Л.П. Введение в цифровую обработку изображений / Л.П. Ярославский. – М. : Сов. радио, 1979. – 312 с.
2. Цифровое преобразование изображений : учеб. пособие для вузов / Р.Е. Быков [и др.]. – М. : Горячая линия–Телеком, 2003. – 228 с.
3. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
4. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений: в 2 кн. / У. Прэтт. – М. : Мир, 1982. – Кн. 2. – 480 с.
5. Методы компьютерной обработки изображений / М.В. Гашников [и др.] ; под. ред. В.А. Сойфера. – 2-е изд., испр. – М. : Физматлит, 2003. – 784 с.
6. Бочаров, П.П. Теория вероятностей. Математическая статистика / П.П. Бочаров, А.В. Печинкин. – 2-е изд. – М. : Физматлит, 2005. – 296 с.

Поступила 15.12.08

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

B.A. Zalesky, D.V. Pradun

**AN ALGORITHM OF ADAPTIVE FILTRATION
OF MULTISPECTRAL IMAGES**

An algorithm of adaptive smoothing of images that preserves edges of homogeneous areas is suggested. It is based on detecting edges by means of calculation of an adaptive gradient, automatic gradient binarization and adaptive smoothing of the image based on local characteristics of Gaussian noise. A brief review of major algorithms and methods of image filtering, their limitations and basic features is provided. The way of estimation of local noise level of the image, affinity of each pixel to the borders of homogeneous areas is described. A comparison of results of algorithm application using different modes is presented. Results are compared to the results obtained using some other filtering algorithms.