

УДК 004.932.2

## ЛОКАЛЬНО АНИЗОТРОПНОЕ ГАУССОВСКОЕ СГЛАЖИВАНИЕ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СНЕЖНО-ЛЕДОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ АРКТИКИ

<sup>1</sup>Путинцев Д.Н., <sup>2</sup>Арлазаров Н.В., <sup>1</sup>Слугин Д.Г.

<sup>1</sup>Институт системного анализа ФИЦ ИУ РАН, Москва,

e-mail: 2001dnp@mail.ru, slugindm@gmail.com;

<sup>2</sup>ООО «Смарт Энджинс Сервис», Москва, e-mail: nikita.arlazarov@gmail.com

В настоящей работе рассматривается алгоритм локально анизотропной гауссовской фильтрации, применяемый для сглаживания изображений с сохранением границ. Анализируются его преимущества по сравнению с другими аналогичными алгоритмами для обработки изображений. Производится оценка производительности и качества работы алгоритма на изображениях поверхности Арктики, содержащих торосы, открытую воду и припайный лед. Результаты обработки изображений арктической поверхности показали, что предложенный подход имеет близкое с методом анизотропной диффузионной фильтрации визуальное восприятие изображений в части обработки однородных областей и сохранения границ, но при этом обеспечивается высокое быстродействие. Показано, что предложенный метод может эффективно применяться не только при обработке отдельных изображений, но и для шумоподавления при обработке видеопоследовательностей в системах компьютерного зрения, работающих в реальном времени.

**Ключевые слова:** обработка изображений, сглаживание изображений, аддитивный шум, ледовый покров, Арктика

## LOCAL ANISOTROPIC GAUSSIAN SMOOTHING COLOR IMAGE OF SNOW-ICE SURFACE OF THE ARCTIC

<sup>1</sup>Putintsev D.N., <sup>2</sup>Arlazarov N.V., <sup>1</sup>Slugin D.G.

<sup>1</sup>Institute for Systems Analysis, FRC CSC RAS, Moscow,

e-mail: 2001dnp@mail.ru, slugindm@gmail.com;

<sup>2</sup>Smart Engines Ltd., Moscow, e-mail: nikita.arlazarov@gmail.com

In this paper, the algorithm of local anisotropic Gaussian filter for smoothing images with conservation of boundaries is considered. Its advantages with other similar algorithms for image processing are compared. The estimation of productivity and quality of algorithm on images of the surface of the Arctic containing hummocks, open water and fast ice is made. The results of image processing of the Arctic surface showed that the proposed approach has a visual representation of the image close to the anisotropic diffusion filtering method in the part of processing homogeneous regions and preserving the boundaries, but at the same time high speed is provided. It is shown that the proposed method can be effectively applied not only for processing individual images, but also for noise reduction for video processing in computer vision systems operating in real time.

**Keywords:** image processing, image smoothing, additive noise, ice cover, Arctic

Многие современные методы цифровой обработки изображений были разработаны на основе ранее созданных методов для обработки речевых, звуковых, сейсмических и гидроакустических сигналов. Немаловажная часть этих методов связана с задачей подавлением шума. Многие из них основаны на представлении сигнала как некой гладкой функции от параметров (это могут быть время, координаты и т.д.), и поэтому обработка может беспрепятственно вестись как в частотной, так и во временной области [1, 12].

Шумоподавление является одной из наиболее актуальных задач в области компьютерного зрения при обработке как отдельных изображений, так и видеопоследовательностей [3]. Появление шума обусловлено следующими факторами:

– техническими характеристиками оборудования для видеосъемки;

– сложными условиями съемки (недостаточным освещением);

– возникновением помех при передаче данных;

– использованием неточных фильтров при выделении сигналов.

Как уже было сказано, видеопоследовательности могут обладать пространственным и временным шумом. Известно, что наиболее негативный вклад в работу систем компьютерного зрения вносит именно пространственный шум, поэтому для подавления шума на видеопоследовательностях применимы методы шумоподавления [9], предназначенные для обработки отдельных цифровых изображений.

Алгоритмы шумоподавления обычно специализируются на подавлении конкретного вида шума, и их задача заключается в улучшении визуального восприятия изо-

бражений и повышении качества и скорости работы алгоритмов детектирования объектов интереса на последующих этапах обработки изображений.

Цифровое изображение уже нельзя представить в виде гладкой функции. Это происходит из-за того, что при отображении трех мерных объектов на плоскости неизбежны (в приближении лучевой оптики) разрывы интенсивности на границах объектов. Поэтому представляется важным рассматривать интенсивность изображения лишь как кусочно-непрерывную функцию. Естественно, хотелось бы учесть этот факт при разработке алгоритма подавления шума, так как в противном случае фильтрация будет приводить к размытию границ и, соответственно, к искажению полезного сигнала.

Таким образом, для подавления шума и сведения к минимуму потери информации на изображении необходимо использовать алгоритмы, способные сохранить границы объектов, в том числе и тех, которые по амплитуде соизмеримы с шумом. Далее рассмотрим базовый алгоритм гауссовской фильтрации и анизотропное диффузионное сглаживание [11].

### Фильтр Гаусса

Гауссовская фильтрация заключается в свертке изображения со следующей функцией

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} * e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}.$$

Здесь параметр  $\sigma$  задает степень размытия. Фактически мы имеем линейное усреднение, только пиксель смешивается с другими по закону, заданному функцией Гаусса. Посчитанный по приведенной формуле матричный фильтр называется гауссианом.

Благодаря сепарабельности фильтр Гаусса представим в виде

$$g(x, y) = g_1(x) * g_2(y).$$

Это означает, что свертку можно производить последовательно по строкам и по столбцам, что позволяет ускорить работу алгоритма при больших размерах фильтра.

Фильтр Гаусса применяется в различных задачах компьютерного зрения, в том числе при детекции объектов дорожной сцены. В частности, в задаче поиска и выделения дорожной разметки (прямых линий) на этапе предварительной обработки [4].

Для некоторых типов помех фильтр Гаусса позволяет достаточно хорошо смазать шумовую компоненту сигнала, при этом размытие границ объектов на изображении

происходит в меньшей степени. Это позволяет смазать мелкие детали в кадре, которые не требуют отделения от фона, а крупные объекты сохранить для дальнейшей обработки. Зачастую для локализации границ объектов фильтр Гаусса применяют совместно с градиентными методами. В силу чувствительности градиентных методов к шумам, для смазывания шумовых скачков яркости и, как следствие, исключения порождённых шумом границ предварительно используется фильтр Гаусса.

Кроме того, стоит отметить алгоритмы быстрого рекурсивного вычисления гауссовского фильтра [10].

### Анизотропный диффузионный фильтр

Регистрируемое изображение можно рассматривать как сумму идеального изображения и аддитивного шума. Шум является небольшим возмущением на изображении [6]. Наша задача – максимально уменьшить уровень шума при сохранении полезного сигнала.

Диффузия является физическим процессом выравнивания концентрации вещества. Интенсивность сигнала в точке изображения может рассматриваться как «концентрация», а шум как небольшие неоднородности в концентрации. Эти неоднородности могут быть сглажены с помощью диффузии.

Пусть  $\mathbf{u}$  – распределение концентрации. Тогда закон Фика гласит, что градиенты концентрации вызывают появление потока  $\mathbf{j}$ , который стремится выровнять концентрации:

$$\mathbf{j} = -\mathbf{D} * \nabla \mathbf{u} \sqrt{b^2 - 4ac}.$$

Здесь  $\mathbf{D}$  – тензор диффузии (в общем случае – положительно определённая симметричная матрица). Таким образом, получается, что тензор диффузии определяет, как соотносятся между собой направления и величины потока диффузии и градиента концентрации. Поэтому в зависимости от поведения тензора выделяют разные типы диффузии:

1.  $\mathbf{D}$  постоянен вдоль всего изображения: линейная диффузия.
2.  $\mathbf{D}$  зависит от структуры изображения: нелинейная диффузия.
3.  $\mathbf{j}$  и  $\nabla \mathbf{u}$  параллельны: изотропная диффузия.
4.  $\mathbf{j}$  и  $\nabla \mathbf{u}$  не параллельны: анизотропная диффузия.

По описанным выше причинам будем рассматривать последний тип диффузии [7]. Для реализации алгоритма нужно вести сглаживание в направлении, перпендикулярном направлению максимальной диффузии, которое в данном случае определяется

одним из собственных векторов тензора диффузии. Далее приходим к уравнению диффузии, при решении которого и получается искомый результат – сглаженное изображение, сохраняющее границы.

**Локально анизотропный гауссовский фильтр**

Главным недостатком ранее рассмотренного алгоритма является его вычислительная трудоёмкость, связанная в первую очередь с необходимостью решать дифференциальное уравнение [5]. В результате решения этой проблемы возник алгоритм анизотропной гауссовской фильтрации.

Изображение рассматривается как кусочно-непрерывная функция  $f(x, y)$ , разрывы которой соответствуют границам объектов. При подсчёте дисперсии производных

$$D_{12} = D_{21} = (f_u^{|} * f_v^{|} * g)(x, y) - (f_u^{|} * g) * (f_v^{|} * g)(x, y).$$

Здесь  $(f * g)(x, y)$  – свёртка функции  $f(x, y)$  с двумерной гауссианой  $g(x, y)$ ;  $f_u^{|}$ ,  $f_v^{|}$  – производные по диагоналям. Таким образом  $D_{ij}$  – дисперсии производных вдоль диагоналей.

Структурному тензору можно поставить в соответствие эллипсоид. Далее можно определить направление главной оси – оно как раз и будет перпендикулярно границам объектов на картинке. Поэтому нужно вести сглаживание в направлении перпендикулярном направлению главной оси, для того чтобы сглаживать вдоль границ и таким образом избавиться от эффекта размытия.

Свяжем систему координат с пикселом. Тогда угол между направлением главной оси и горизонтальной осью системы координат можно определить по формуле

можно использовать окна разного типа. Например, квадратное окно [2]. Недостатком этого подхода являются большие скачки тензора при перемещении окна вдоль изображения. Этим недостатком не страдает гауссовское окно, поэтому его мы и будем использовать.

Для определения направления сглаживания будем использовать структурный тензор, определяемый следующим образом:

$$\begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{pmatrix},$$

где

$$D_{11} = (f_u^{|} * g)^2(x, y) - (f_u^{|} * g)(x, y),$$

$$D_{22} = (f_v^{|} * g)^2(x, y) - (f_v^{|} * g)(x, y),$$

$$\frac{\arctan\left(\frac{D_{11} - D_{22}}{D_{12} + D_{21}}\right) + \frac{\pi}{2}}{2}.$$

Область значений угла составляет отрезок от 0 до  $\pi/2$ . Эту область можно разбить на 4 части, например так, как показано на рис. 1.

В зависимости от того, в какую из областей попадает главная ось эллипса, мы можем определить, в каком из четырех направлений вести сглаживание. Например, на представленном выше рисунке главная ось попала в интервал  $(3\pi/8, 5\pi/8)$ , поэтому сглаживание имеет смысл вести в перпендикулярном ей направлении, т.е. в направлении горизонтальной оси.

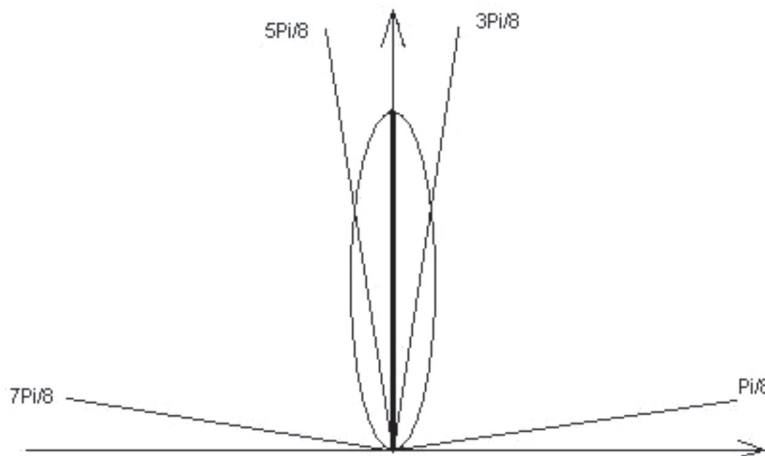


Рис. 1. Разбиение области значений угла между направлением главной оси и горизонтальной осью





а)



б)

Рис. 2. Снежная поверхность: а) исходное изображение, б) после преобразования



а)



б)

Рис. 3. Стамуха, ледовый покров: а) исходное изображение, б) после преобразования



а)



б)

Рис. 4. Снежный покров и открытая вода: а) исходное изображение, б) после преобразования



а)



б)

Рис. 5. Торосы: а) исходное изображение, б) после преобразования



а)



б)

Рис. 6. Припайный лед: а) исходное изображение, б) после преобразования

Данный алгоритм работает быстрее анизотропного диффузионного фильтра за счёт того, что в нём нет необходимости решать дифференциальное уравнение, а вместо этого нужно лишь провести свёртку с гауссианой, которая при использовании алгоритма Дерише [8] может быть выполнена за 8 операций на пиксель.

#### Примеры и результаты

Далее на рис. 2–6 приведены примеры работы предложенного алгоритма на реальных цветных изображениях снежно-ледовой поверхности Арктики, на которых присутствуют основные элементы рельефа (торосы, стамухи, открытая вода, припайный лед). Левая картинка – изначальная, правая – после преобразования.

#### Обсуждение результатов

В настоящей работе для уменьшения влияния аддитивного шума предложен алгоритм предварительной обработки изображений на основе локально анизотропной гауссовской фильтрации. Результаты обработки изображений арктической поверхности показывают, что предложенный подход имеет близкое с методом анизотропной диффузионной фильтрации визуальное восприятие изображений в части обработки однородных областей и сохранения границ, но при этом обеспечивается высокое быстродействие.

Как следствие, предложенный метод может эффективно применяться не только при обработке отдельных изображений, но и для шумоподавления при обработке видеопосле-

довательностей в системах компьютерного зрения, работающих в реальном времени.

*Работа проводилась при поддержке грантов РФФИ № 15-29-06091 (офи\_м) и 15-29-06080 (офи\_м).*

#### Список литературы

1. Саниев К.Б. Распознавание сигналов изображения // Радиотехника. – 2007. – № 4. – С. 9–15.
2. Яне Б. Цифровая обработка изображений / Пер. с англ. А.М. Измайловой. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.
3. Abdallah M.B., Malek J., Azar A.T., Belmabrouk H., Monreal J.E., Krissian K. Adaptive noise-reducing anisotropic diffusion filter // Neural Computing and Applications. – 2016. – V. 27, № 5. – P. 1273–1300.
4. Aly M. Real time Detection of Lane Markers in Urban Streets. – URL: <http://www.vision.caltech.edu/malaa/publications/aly08realtime.pdf> (дата обращения: 06.03.2017).
5. Bustacara C., Gómez-Mora M., Flórez-Valencia L. Anisotropic Diffusion for Smoothing: A Comparative Study / In proc. Of ICCVG. – 2016. – P. 109–120.
6. Galić I., Weickert J., Welk M., Bruhn A., Belyaev A., Seidel H. Image Compression with Anisotropic Diffusion // Journal of Mathematical Imaging and Vision. – 2008. – V. 31, № 2. – P. 255–269.
7. Hajiaboli M.R. An Anisotropic Fourth-Order Diffusion Filter for Image Noise Removal // International Journal of Computer Vision. – 2011. – V. 92, № 2. – P. 177–191.
8. Monga O., Deriche R., Malandain G., Cocquerez J.P. Recursive Filtering and Edge Closing: two primary tools for 3-D edge detection / In proc. of ECCV. – 1990. – P. 56–65.
9. Nguyen T., Hong M. Filtering-Based Noise Estimation for Denoising the Image Degraded by Gaussian Noise / In proc. Of PSIVT. – 2011. – P. 157–167.
10. Van Vliet L.J., I. Young I., Beek P. Recursive gaussian derivative filters / In proc. of ICPR. – 1998. – V. 1. – P. 509–514.
11. Weickert J. Foundations and applications of nonlinear anisotropic diffusion filtering // Z. angew. Math. und Mech. – 1996. – V. 76. – P. 283–286.
12. Zhang Z.G., Chan S.C. On Kernel Selection of Multivariate Local Polynomial Modelling and its Application to Image Smoothing and Reconstruction // Journal of Signal Processing Systems. – 2011. – V. 64, № 3. – P. 361–374.