

Анализ эффективности алгоритмов билатеральной фильтрации 77-30569/340957

02, февраль 2012

Крапчатова Т. В., Филиппов М. В.

УДК 621.395

МГТУ им. Н.Э. Баумана
profitbig@rambler.ru

Изображения в процессе формирования их системами (фотографическими, голографическими, телевизионными) обычно подвергаются воздействию различных случайных помех или шумов. Фундаментальной проблемой в области обработки изображений является эффективное удаление шума при сохранении важных для последующего распознавания деталей изображения. Сложность решения данной задачи существенно зависит от характера шумов.

Наиболее распространенным видом помех является случайный аддитивный шум, статистически независимый от сигнала. Модель аддитивного шума используется тогда, когда сигнал на выходе системы или на каком-либо этапе преобразования может рассматриваться как сумма полезного сигнала и некоторого случайного сигнала. Модель аддитивного шума хорошо описывает действие зернистости фотопленки, шум в радиотехнических системах, шум квантования в аналого-цифровых преобразователях и т.п.

В последние два десятилетия в цифровой обработке изображений активно развиваются нелинейные алгоритмы на основе ранговой статистики для восстановления изображений, поврежденных различными моделями шумов [1]. Подобные алгоритмы позволяют избежать дополнительного искажения изображения при удалении шума, а также значительно улучшить результаты работы фильтров на изображениях с высокой степенью зашумленности. Частным случаем рангового фильтра является медианный фильтр.

Медианные фильтры и их модификации достаточно часто применяются на практике как средство предварительной обработки цифровых данных из-за простоты программной и аппаратной реализации. Специфической особенностью фильтров является избирательность обработки пикселей: наибольшее влияние оказывается на немонотонные составляющие, монотонные фильтр оставляет без изменений. Особенно эффективным медианный фильтр оказывается при очистке

сигналов от импульсных шумов при обработке изображений, акустических сигналов, передаче кодовых сигналов и т.п. Также применяют медианную фильтрацию с адаптивным изменением размера окна фильтра в зависимости от динамики сигнала и характера шумов (адаптивная медианная фильтрация), что позволяет изменять только интенсивности только искаженных пикселей. Однако, подавление аддитивного шума данным фильтром намного менее эффективно, т.к. степень размытия границ изображения может превысить допустимые значения.

Сгладить изображение с сохранением четких границ позволяет использование билатерального фильтра [2]. На рис. 1 представлены результаты сглаживания зашумленного изображения с использованием медианного и билатерального фильтра. Нетрудно заметить, что медианный фильтр существенно размывает границы предметов. В тоже время билатеральный фильтр, подавляя шум и малоразмерные детали, сохраняет резкость границ.



Рис. 1. Сравнение шумоподавления билатеральным и медианным фильтрами (а– зашумленное изображение, б – шумоподавление медианным фильтром, в – шумоподавление билатеральным фильтром).

В настоящее время вопросам билатеральной фильтрации посвящено большое количество работ. Билатеральный фильтр был адаптирован для таких задач, как: удаление текстуры [3], динамическое ранговое сжатие [4] и обработка фотографий [5, 6]. Также успешно используется в других областях: выделение контуров [7, 8], объемное шумоподавление [9] и коррекция видео. Такой широкий спектр применения фильтр получил из-за нескольких особенностей. С одной стороны, простота формализации и

выполнения: пиксель просто заменяется взвешенным средним его соседей. Кроме того билатеральный фильтр не итерационен, т.е. удовлетворительный результат достигается уже после одного прохода, что позволяет интуитивно понимать параметры фильтра, т.к. их действие не зависит от кумулятивного эффекта нескольких итераций. С другой стороны, билатеральный фильтр нелинеен и не имеет практического применения без различных улучшений, т.к. требует больших вычислительных ресурсов.

На рис. 2 представлена структурная схема билатерального фильтра. Результатом работы билатерального фильтра является вычисление интенсивности каждого пикселя, как взвешенного среднего интенсивностей соседних пикселей [2]. Вес, связанный с каждым соседним пикселем, изменяется в соответствии со значениями расстояний на плоскости изображения (пространственный вес) и на оси интенсивности (ранговый вес), что позволяет сохранять четкие границы элементов изображения. Используя функцию Гаусса G_{σ} в виде зависимости и считая входное изображение I черно-белым, определим результат билатерального фильтра I_p для каждого пикселя p :

$$I_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|) I_q$$

$$W_p = \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|),$$

где: S – множество возможных позиций пикселей изображения;

R – количество используемых цветов;

$p = (p_x, p_y) \in S$ – позиция центрального пикселя;

q – позиция соседнего пикселя;

$I_p, I_q \in R$ – интенсивности пикселей p и q в диапазоне $[0, 1]$;

$G_{\sigma_s}, G_{\sigma_r}$ – функции Гаусса с параметрами σ_s и σ_r ;

W_p – сумма весов для нормализации значений.

Параметр σ_s задает количество соседних пикселей, значение которых учитывается при обработке одного пикселя области S , σ_r отражает потерю в весе соседними пикселями при разности интенсивностей. На рис. 2 показано вычисление веса отдельного пикселя на простом примере (изображение представлено в виде двумерного сигнала).

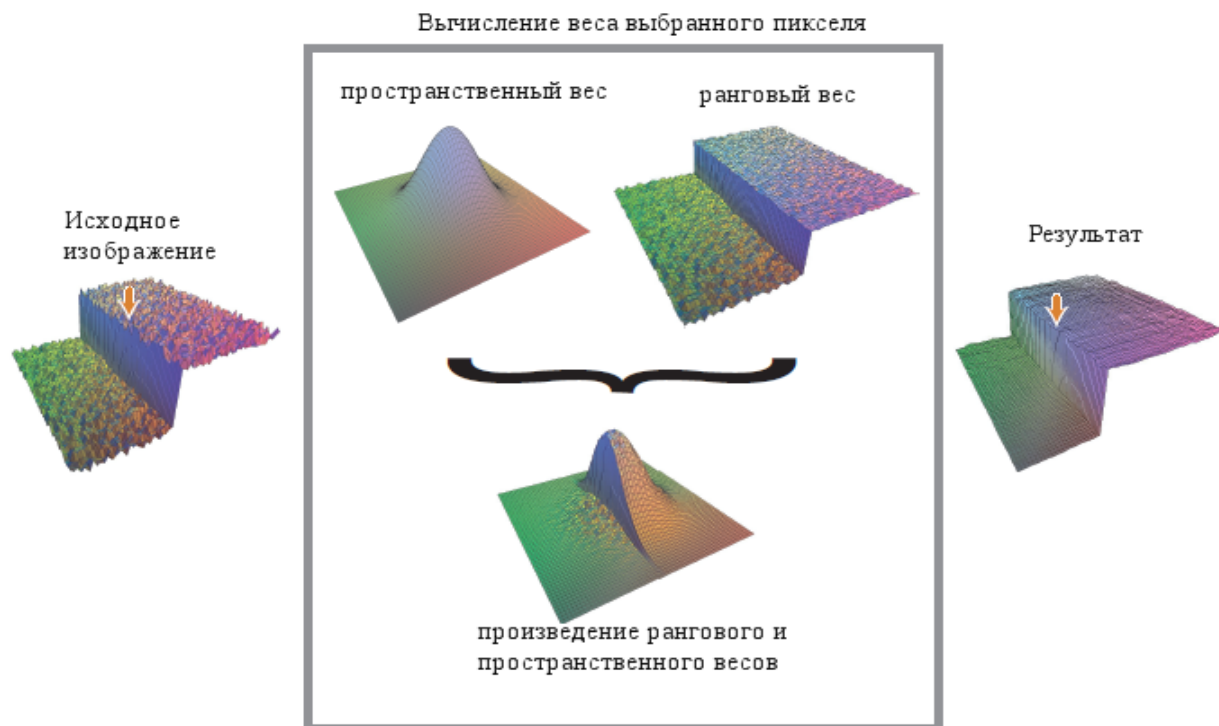


Рис. 2. Сглаживание билатеральным фильтром исходного сигнала с сохранением границ.

Билатеральный фильтр также может быть определен с использованием быстрого преобразования Фурье [4], но Гауссов билатеральный фильтр получил большее практическое применение.

Точная обработка билатеральным фильтром с использованием определения требует больших затрат вычислительных ресурсов, что неприменимо, например, для предварительной обработки цифровых данных. Существует четыре приближенных метода билатеральной фильтрации [1]. В настоящей работе выполнен сравнительный анализ этих методов с точки зрения критериев качества фильтрации и быстродействия. Выработаны рекомендации к их применению в конкретных случаях.

При реализации билатеральной фильтрации прямым методом вычисление интенсивности пикселя происходит по ограниченной области B_{σ_s} по следующей формуле:

$$I_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in B_{\sigma_s}} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|) I_q$$

Эта область содержит в себе пиксели, удаленные от центрального не более чем на удвоенное стандартное отклонение $2\sigma_s$, т.к. вклад остальных пикселей незначителен. Сложность алгоритма по данному методу - $O(|B_{\sigma_s}|^2)$. Такое приближение эффективно только для небольших ядер (малых значениях параметра σ_s) из-за квадратичной зависимости от σ_s . С помощью данного алгоритма можно получить результат близкий к

точному за счет больших временных затрат, например, обработка изображения размером 8 Мп длится более 10 минут.

По методу разделяемого ядра двумерный фильтр заменяется двумя одномерными, применяемыми последовательно. Сначала изображение фильтруется по столбцам, затем по строкам. Каждый раз используется прямой метод билатеральной фильтрации, преобразованный для одномерного массива исходных данных. Такой прием значительно сокращает время вычислений, т.к. количество обрабатываемых пикселей пропорционально радиусу ядра. Сложность данного алгоритма становится равной $O(S|\sigma_s|)$, т.к. множество рассматриваемых пикселей одномерно. Время вычислений по данному алгоритму существенно меньше по сравнению с прямым алгоритмом и линейно возрастает при увеличении размеров ядра.

Данный метод фильтрации эффективен при небольших ядрах и применим для обработки видео, при условии применения нескольких итераций фильтра с небольшим ядром. Но фильтр неприменим для больших ядер ($\sigma_s > 5$ пикселей) из-за появления видимых артефактов, т.к. при увеличении размеров ядра область, обрабатываемая для вычисления веса каждого пикселя, содержит все больше разнообразных деталей изображения, например, несколько краев объекта и его внутренних границ. Но эти особенности не могут повлиять на результат фильтрации из-за раздельной обработки строк и столбцов. Также существует расширение описанной идеи, где разделяемые оси ориентированы по градиенту изображения, что усложняет фильтрацию из-за предварительного анализа исходного изображения, но позволяет улучшить качество результата.

Метод локальных гистограмм не учитывает расстояние между пикселями. Результат вычисляется по пикселям, захватываемым квадратным ядром (локальной гистограмме N_{σ_s}) по следующей формуле:

$$I_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in N_{\sigma_s}} G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|) I_q,$$

где $N_{\sigma_s}(p) = \{q, \|p - q\| \leq \sigma_s\}$.

За счет исключения пространственного веса происходит ускорение вычислений, т.к. для двух соседних пикселей локальные гистограммы почти полностью совпадают. Сложность алгоритма вычисляется как логарифм от радиуса ядра - $O(S|\log \sigma_s|)$. Таким образом, время выполнения составляет порядка нескольких секунд даже для больших ядер (радиусом 100 пикселей для более чем 8 Мп изображения).

Недостатком применения данного метода является появление ореолов возле резких границ, т.н. полос Маха. Избежать этого эффекта можно применив фильтр в три итерации, оставляя ранговые веса постоянными, что сглаживает границы артефактов. Но подобное улучшение приводит к тому, что схема алгоритма становится трудной для адаптации, в особенности для цветных изображений и других задач фильтрации изображений с большим объемом обрабатываемой информации.

Основная идея метода билатеральной решетки заключается в том, чтобы результат зависел только от расстояния между пикселями. Изображение представляется в трехмерном пространстве, где к стандартным координатам плоскости изображения добавляется координата интенсивности пикселя, т.е. вычисляем однородный вектор по формуле:

$$\begin{pmatrix} I_p \cdot W_p \\ W_p \end{pmatrix} = \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|) G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|) \begin{pmatrix} I_q \\ 1 \end{pmatrix}$$

Полученное пространство сжимается с заданной частотой дискретизации, при этом информация по каждому пикселю сохраняется в соответствующей ему грубой накопительной ячейке. Объемная структура, состоящая из таких ячеек, называется билатеральной решеткой. Далее производится обработка билатеральным фильтром с учетом только расстояния между пикселями, а именно свертка с трехмерной функцией

$$\frac{\sigma_s}{s_s}, \sigma_r$$

Гаусса с параметрами $\frac{\sigma_s}{s_s}, \sigma_r$, после чего результат восстанавливается по исходным позициям пикселей: трилинейная интерполяция и нормализация результата. Данный алгоритм позволяет производить обработку с ядрами любого размера за короткий промежуток времени (примерно 1 сек).

Сложность представленного алгоритма $O\left(|S| + \frac{|S| |R|}{\sigma_s^2 \sigma_r}\right)$, где $|S|$ – размер изображения в пикселях, $|R|$ – диапазон шкалы интенсивностей.

Основным преимуществом метода быстрой билатеральной фильтрации является простота его адаптации для других задач и расширений, например, для цветных изображений или при одновременной обработке двух изображений.

В результате сравнения билатеральной фильтрации со стандартными методами шумоподавления и анализа различных методов билатеральной фильтрации (визуальное сравнение и численные характеристики приведены на рис.3) можно сделать следующие выводы:

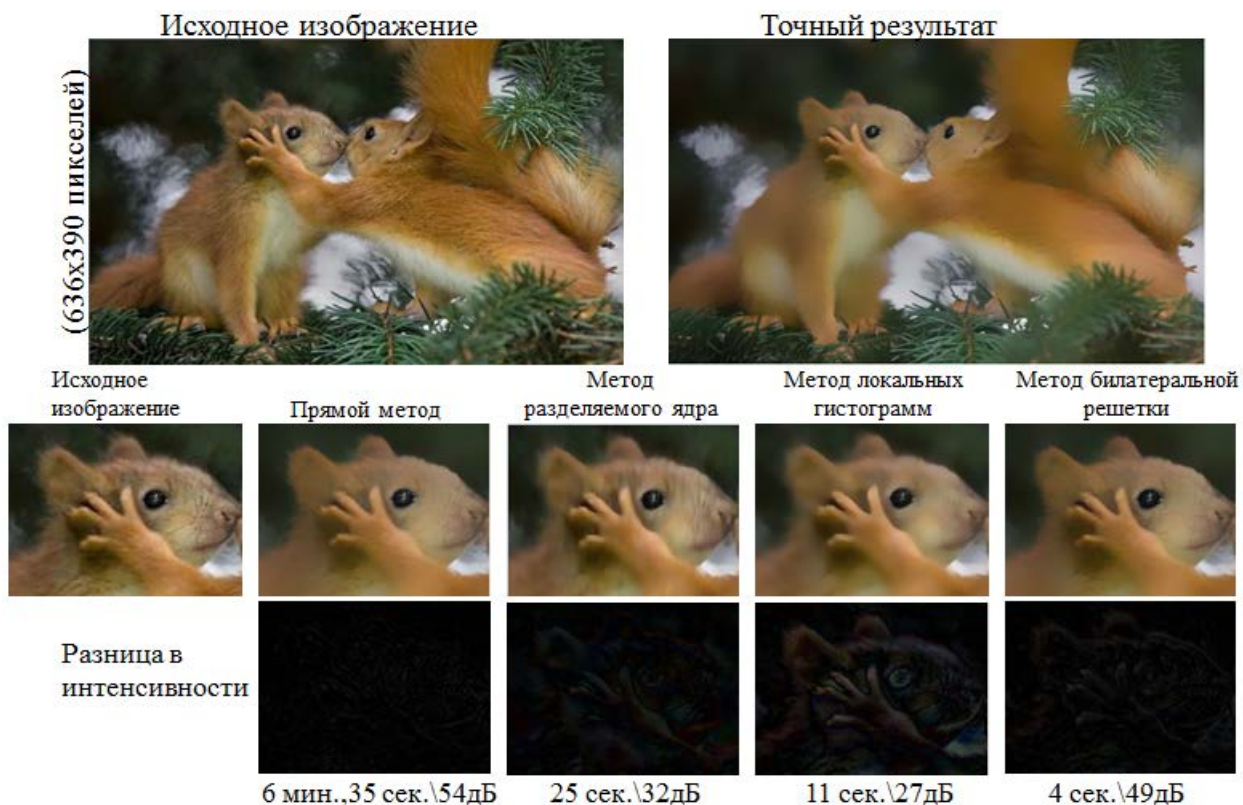


Рис. 3. Визуальное сравнение методов билатеральной фильтрации с ядром радиусом в 16 пикселей на фрагменте исходного изображения по сравнению с точным результатом по критериям: разница интенсивности, время вычислений (внизу) и пиковое отношение сигнал/шум (ПОСШ) в дБ.

- 1) Билатеральный фильтр сохраняет границы изображения, что облегчает дальнейшую обработку изображения, в отличие от медианного фильтра, наиболее широко используемого в настоящее время.
- 2) Билатеральная фильтрация по методу билатеральной решетки является наиболее эффективной для практического применения по соотношению критериев быстродействия и качества.
- 3) Прямой метод билатеральной фильтрации целесообразно использовать в том случае, если требуется максимально точный результат без временных ограничений.
- 4) Билатеральную фильтрацию по методам разделяемого ядра и локальных гистограмм целесообразно использовать при небольших ядрах, что позволит провести быструю обработку, а ошибки в вычислениях не будут заметны для визуального восприятия.

Литература:

1. SoonminBae, Sylvain Paris, and Fr.edo Durand: Two-scale tone management for photographic look. *ACM Transactions on Graphics*, 25(3):637 – 645, 2006. Proceedings of the SIGGRAPH conference.
2. Tomasi, C., Manduchi, R.: Bilateral filtering for gray and color images. In: Proc.of International Conference on Computer Vision, IEEE (1998) 839–846
3. Oh, B.M., Chen, M., Dorsey, J., Durand, F.: Image-based modeling and photo editing. In: Proc. of SIGGRAPH conference, ACM (2001)
4. Durand, F., Dorsey, J.: Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images. *ACM Trans. on Graphics* **21** (2002) Proc. of SIGGRAPH conference.
5. Eisemann, E., Durand, F.: Flash photography enhancement via intrinsic relighting. *ACM Trans. on Graphics* **23** (2004) Proc. of SIGGRAPH conference.
6. Petschnigg, G., Agrawala, M., Hoppe, H., Szeliski, R., Cohen, M., Toyama, K.: Digital photography with flash and no-flash image pairs. *ACM Trans. on Graphics* **23** (2004) Proc. of SIGGRAPH conference.
7. Jones, T.R., Durand, F., Desbrun, M.: Non-iterative, feature-preserving mesh smoothing. *ACM Trans. on Graphics* **22** (2003) Proc. of SIGGRAPH conference.
8. Fleishman, S., Drori, I., Cohen-Or, D.: Bilateral mesh denoising. *ACM Trans. OnGraphics* **22** (2003) Proc. of SIGGRAPH conference.
9. Wong, W.C.K., Chung, A.C.S., Yu, S.C.H.: Trilateral filtering for biomedical images. In: Proc. of International Symposium on Biomedical Imaging, IEEE (2004)

Performance analysis of bilateral filtering algorithms

77-30569/340957

02, February 2012

Krapchatova T.V., Filippov M.V.

Bauman Moscow State Technical University

profitbig@rambler.ru

Usage of bilateral filters for image smoothing allows of removing small-scale noises and details, and, at the same time, saving clearness of borders. The authors present the results of the comparative analysis for four well-known algorithms of bilateral filtering and give recommendations for their usage for image digital processing.

Publications with keywords: [noise](#), [motion blur](#), [bilateral filter](#), [fast Furje transform](#)

Publications with words: [noise](#), [motion blur](#), [bilateral filter](#), [fast Furje transform](#)

References

1. Bae S., Paris S., Durand F. Two-scale tone management for photographic look. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, vol. 25, no. 3, pp. 637-645.
2. Tomasi C., Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images. *Proc. IEEE 6th Int. Conf. on Computer Vision*, Bombay, India, Jan. 4-7, IEEE, 1998, pp. 839-846
3. Oh B.M., Chen M., Dorsey J., Durand F. Image-based modeling and photo editing. *Int. Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques (ACM SIGGRAPH 2007)*. San Diego, CA, Aug. 5-9, 2007.
4. Durand F., Dorsey J. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images. *Int. Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques (ACM SIGGRAPH 2007)*. San Diego, CA, Aug. 5-9, 2007.
5. Eisemann E., Durand F. Flash photography enhancement via intrinsic relighting. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, vol. 23, no. 3, pp. 673-678. (*Proc. of ACM SIGGRAPH 2004*).
6. Petschnigg G., Agrawala M., Hoppe H., Szeliski R., Cohen M., Toyama K. Digital photography with flash and no-flash image pairs. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, vol. 23, no. 3, pp. 664-672. (*Proc. of ACM SIGGRAPH 2004*). DOI: 10.1145/1015706.1015777.
7. Jones T.R., Durand F., Desbrun M. Non-iterative, feature-preserving mesh smoothing. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, vol. 22, no. 3, pp. 943-949. (*Proc. of ACM SIGGRAPH 2003*). DOI: 10.1145/882262.882367.

8. Fleishman S., Drori I., Cohen-Or D. Bilateral mesh denoising. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, vol. 22, no. 3, pp. 950-953. (*Proc. of ACM SIGGRAPH 2003*). DOI: 10.1145/882262.882368.
9. Wong W.C.K., Chung A.C.S., Yu S.C.H. Trilateral filtering for biomedical images. *2nd IEEE Int. Symp. on Biomedical Imaging: Macro to Nano*. Arlington, VA, Apr. 15-18, 2004, vol. 1, pp. 820-823.