УДК 004.932.4

# ПОДАВЛЕНИЕ ШУМА ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОПТИМАЛЬНЫМ ОКНОМ

**М.Ю. Людаев,** инженер-программист ОАО «Российский институт мощного радиостроения»; mike_ld@mail.ru

***Ключевые слова:*** *обработка изображений, подавление шума, фильтрация оптимальным окном.*

**При передаче аналоговых изображений по радиоканалу они подвергаются ряду искажений, самое распространенное из которых – появление шумовой компоненты сигнала, ухудшающее визуальную привлекательность изображения. Применение наиболее известных методов борьбы с этим искажением приводит к размытию изображения. Предлагаемый в статье метод, будучи ориентированным на визуальное восприятие человека, позволяет существенно ослабить шум без потери резкости контрастных участков.**

Для коррекции шума применяют тот или иной алгоритм частотной фильтрации, призванный ограничить ширину пространственного спектра изображения и тем самым подавить шум, попавший в высокочастотную область. Поскольку на большинстве реальных изображений интенсивность высокочастотной компоненты спектра невелика, частотная фильтрация позволяет существенно снизить уровень шума на изображении [1]. Однако у такого подхода есть существенный недостаток: в процессе подавления шума снижается резкость контурных элементов, что отрицательно сказывается на визуальной привлекательности изображения [2, 3]. Данная проблема решается с помощью адаптивных алгоритмов, уменьшающих апертуру фильтрации в случае приближения к контурным линиям и увеличивающих апертуру при удалении от них [4]. В таких алгоритмах перед фильтрацией необходимо провести поиск контурных линий, или сегментацию изображения. Кажущийся оптимальным, такой подход обладает серьезным недостатком – его эффективность принципиально зависит от точности обнаружения контурных линий на исходном изображении. Поскольку при наличии шума обнаружение контурных линий затруднено, использование таких алгоритмов не всегда возможно, а их эффективность стремительно падает по мере увеличения уровня шума [5].

Рассматриваемый алгоритм также относится к алгоритмам удаления шума с помощью окна с адаптирующейся апертурой, но при этом не требует предварительного поиска контурных линий, или сегментации изображения.

Для эффективного подавления шума на однородных участках фильтрующее окно должно иметь максимально возможный размер, но при этом не пересекать границы участка (рис. 1, слева). Однако, если вблизи контура изменяется яркость в направлении, перпендикулярном направлению контура, результат фильтрации окажется неточным. Артефакт будет выражен в виде падения интенсивности изменения яркости вблизи границ.

На реальных изображениях яркость часто меняется вблизи границ, и такая ошибка весьма распространена. Если использовать окно фильтрации минимальной ширины, расположенное в направлении, перпендикулярном направлению градиента, и не пересекающее контуры изображения (рис. 1, справа), искажения не возникнет. Поскольку для эффективной фильтрации окно должно иметь достаточно большую протяженность и при этом не пересекать контурные линии, для работы алгоритма потребуется множество фильтрующих окон, из которых будет подбираться оптимальное фильтрующее окно для каждого фрагмента изображения.

Задание множества фильтров длиной $2r+1$, где $r$ – радиус фильтра, возможно через начальный образующий вектор $a_0=(1;\ 0)$. Существует восемь вариантов поворота данного вектора (рис. 2). Возможные положения вектора можно задать через $k$ векторов поворота $V$. Для $k=8$

$$V8=\left\{\begin{pmatrix}1&0\\0&1\end{pmatrix};\begin{pmatrix}1&1\\-1&1\end{pmatrix};\begin{pmatrix}1&-1\\1&1\end{pmatrix};\begin{pmatrix}0&1\\-1&0\end{pmatrix};\begin{pmatrix}0&-1\\1&0\end{pmatrix};\begin{pmatrix}-1&1\\-1&-1\end{pmatrix};\begin{pmatrix}-1&-1\\1&-1\end{pmatrix};\begin{pmatrix}-1&0\\0&-1\end{pmatrix}\right\}.$$

Базовый сегмент фильтра создается умножением начального единичного вектора на две различные матрицы поворота. Дальнейшее наращивание фильтрующего элемента в нужном направлении осуществляется домножением предыдущего вектора на новую матрицу поворота и рекурсивно представляется в виде:

$\forall n\in N\wedge v\in V\left(a_{n+1}=a_n\times v\right)$ – для положительной ветви окна;

$\forall n\in N\wedge v\in V\left(a_{-n-1}=a_{-n}\times v\right)$ – для отрицательной ветви окна.

Для задания одного фильтрующего окна радиусом $r$ понадобится $2r$ векторов поворота. В итоге появятся $k^{2r}$ окон, задаваемых множеством $C$, где

$$\forall n\in Z\left[-r,r\right]\wedge\forall l\in N\left[1,k^{2r}\right]\left(C(l,n)\in Z\left[0;k-1\right]\right).$$

Положение каждой фильтрующей точки определяется как сумма образующих векторов. В итоге множество фильтрующих окон $F$ можно задать следующим образом:

$$\begin{cases}\forall l\in N((a_{l,0}=(1;0)\wedge F_{l,0}=(0;0));\\ \forall n\in N[1;r]\wedge\forall l\in N\left[1,k^{2r}\right]\left|\begin{array}{l}F_{l,n}=\sum\limits_{i=1}^{n}\left(a_0\times\prod\limits_{j=1}^{i}V_{C(l,j)}\right)\\ F_{l,-n}=\sum\limits_{i=-1}^{-n}\left(-a_0\times\prod\limits_{j=-1}^{i}V_{C(l,j)}\right)\end{array}\right.;\\ \forall i,j\in Z\left[-r;r\right]\wedge l\in N\left[1,k^{2r}\right]\left(\left(i\neq j\right)\to F_{l,i}\neq F_{l,j}\right),\end{cases}$$

где условие $\forall i,j\in Z\left[-r;r\right]\wedge l\in N\left[1,k^{2r}\right]\left(\left(i\neq j\right)\to F_{l,i}\neq F_{l,j}\right)$ необходимо для исключения так называемых вырожденных окон, т.е. окон, в которых разные точки фильтрующей линии попадают в одну точку пространства. Процесс фильтрации начинается с подбора оптимального окна для каждой точки

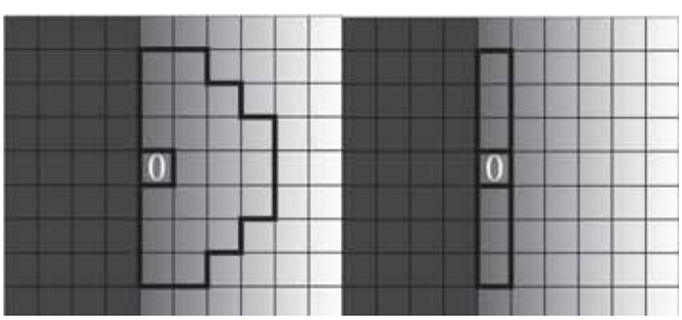


***Рис. 1***

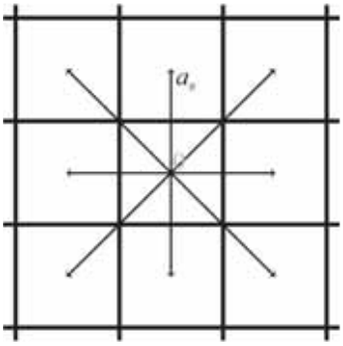


*Рис. 2*

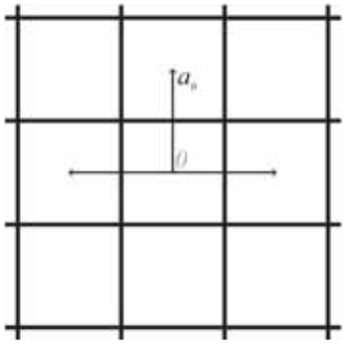


*Рис. 3*

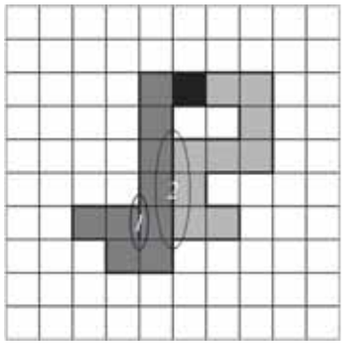


*Рис. 4*

*Рис. 5*

изображения. Если направление фильтрующего окна совпадает с направлением минимального изменения яркости изображения, дисперсия значений яркости, попадающих в окно, окажется минимальной. Такое окно будет оптимальным, и его можно описать выражением

$$\forall l \in N\left[1,k^{2r}\right]\left(B_l = \sqrt{\frac{\sum\limits_{i=-r}^{r}\left(\frac{\sum\limits_{j=-r}^{r} I(F_{l,j})}{2r+1} - I(F_{l,i})\right)^2}{2r+1}}\right);$$

$$\exists l \in N\left[1,k^{2r}\right] \wedge \forall m \in N\left[1,k^{2r}\right]\left(B_l \le B_m \to F_l \ \textit{оптимальное_окно}\right).$$

Фильтрация оптимальным окном позволяет удалять шумоподобные искажения без потери резкости контурных линий. Основным недостатком этого алгоритма является необходимость перебора большого числа окон для нахождения оптимального окна. Изначально число окон равно $k^{2r}$, где $r$ – радиус фильтрующего окна. На практике их меньше из-за наличия вырожденных контуров. В частности, из восьми возможных векторов поворота последний всегда будет приводить к появлению вырожденного окна (исключение составляет только получение первого вектора – он приведет к появлению окон-двойников, имеющих одинаковую форму, но различающихся задающим множеством). По этой причине последний вектор можно исключить из рассмотрения, и тогда число окон не будет превышать $7^{2r}$. Кроме того, из рассмотрения можно исключить окна с диагональным расположением соседних элементов. Это несколько снизит оптимальность окна, зато существенно повысит быстродействие алгоритма. После исключения вектора разворота останется только три задающих вектора поворота.

При использовании множества задающих векторов, описываемых как

$$V3 = \left\{\begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{pmatrix};\begin{pmatrix}0 & 1\\ -1 & 0\end{pmatrix};\begin{pmatrix}0 & -1\\ 1 & 0\end{pmatrix}\right\},$$

при формировании фильтрующего окна радиусом $r$ будет получено $3^{2r}$ окон. После исключения вырожденных окон число окон, применяемых для фильтрации, станет еще меньше.

Далее были исключены окна, близкие к вырожденным, т.е. такие, в которых имеется соседство в пространстве не идущих подряд точек окна (рис. 4, области 1 и 2).

Это исключение окон можно описать как

$$\forall l \in N[1,k^{2r}] \wedge \forall j \in$$
$$\in Z[-r,r]\left(\bigcap_{i=-r}^{r}\left(\bigcap_{j=-r}^{i-3}\left(\bigcap_{z=0}^{7}\left(F_{l,j} + a_0 V8_z \ne F_{l,i}\right)\right) \wedge \bigcap_{j=i+3}^{r}\left(\bigcap_{z=0}^{7}\left(F_{l,j} + a_0 V8_z \ne F_{l,i}\right)\right)\right)\right).$$

Экспериментально было установлено, что число фильтрующих окон, удовлетворяющих описанным выше условиям, составит примерно $2{,}45^{2r}$ при $r \in N$ [5, 11].

Для оценки эффективности подавления шума при фильтрации данным множеством использовалось типичное портретное изображение (рис. 5), на которое был наложен 5%-ный аддитивный белый шум. После этого полученное и исходное изображения были подвергнуты фильтрации окном с $r$=9. Фильтрация исходного (незашумленного) изображения производилась с целью оценки искажений, вносимых в изображение алгоритмом фильтрации.

В процессе фильтрации вычислялось среднее арифметическое яркостей точек, попавших в оптимальное окно:

$$\begin{cases} I(x,y)\dfrac{\sum\limits_{j=-r}^{r} I((x,y)+F_{l,j})}{2r+1}; \\ \exists l \in N[1,k^{2r}]\forall m \in N[1,k^{2r}]\sqrt{\dfrac{\sum\limits_{i=-r}^{r}\left(\frac{\sum\limits_{j=-r}^{r} I((x,y)+F_{l,j})}{2r+1} - I((x,y)+F_{l,i})\right)^2}{2r+1}} \ge \\ \ge \sqrt{\dfrac{\sum\limits_{i=-r}^{r}\left(\frac{\sum\limits_{j=-r}^{r} I((x,y)+F_{m,j})}{2r+1} - I((x,y)+F_{m,i})\right)^2}{2r+1}}. \end{cases}$$

Результат оценивался по трем увеличенным фрагментам изображения (см. рис. 5). Фрагмент 1 имеет контрастные границы и контурные элементы. Фрагмент 2 содержит области с плавным переходом яркости и границы средней и низкой контрастности, а фрагмент 3 – области с плавным переходом и границу низкой контрастности.

На рис. 6 представлен увеличенный фрагмент 1 из рис. 5: сверху слева – исходное изображение, справа – зашумленное изображение; внизу (слева и справа) – результат фильтрации исходного и зашумленного изображений соответственно.

Нетрудно заметить, что на рис. 6 исходное и зашумленное изображения, подвергнутые фильтрации, практически неразличимы. В процессе фильтрации исходного изображения у него были удалены мелкие детали, а резкость контурных линий повышена. Такие тонкие контурные элементы, как волосы, пострадали мало. Фильтрация зашумленного изображения привела к значительному подавлению уровня шума, в то время как контурные линии не только не были размыты – их резкость заметно возросла. Несмотря на то что повышение резкости контурных линий – артефакт данного алгоритма фильтрации, из-за повышения резкости

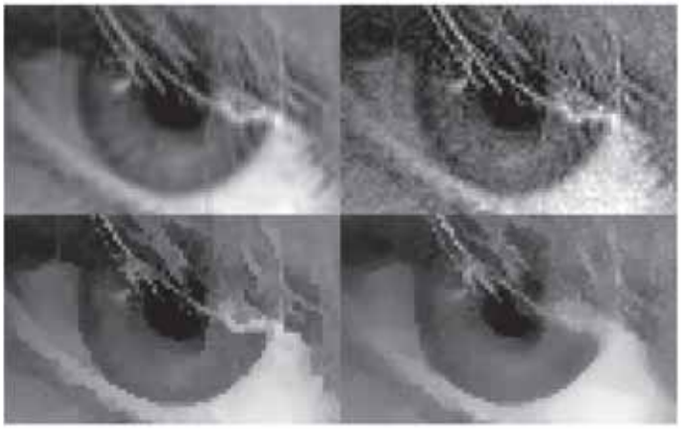

*Рис. 6*

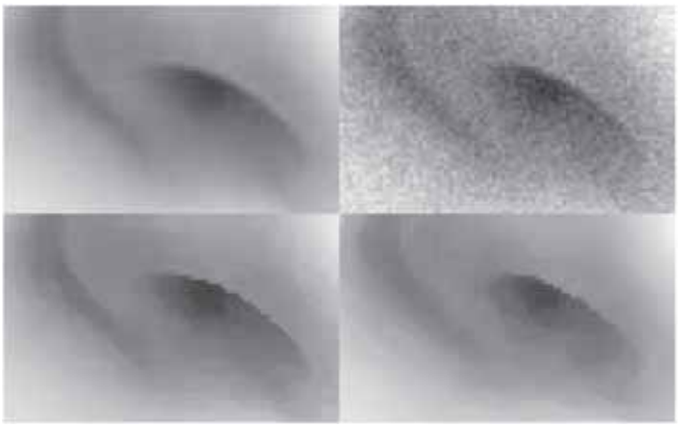

*Рис. 7*

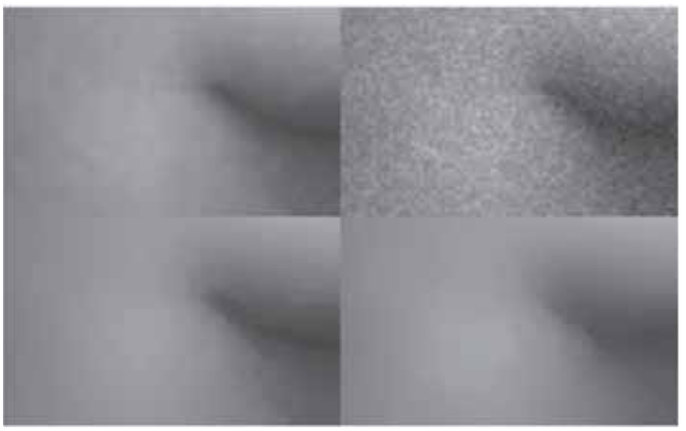

*Рис. 8*

контуров визуальная привлекательность изображения увеличивается.

На рис. 7 показан результат работы алгоритма на участках изображения с плавно меняющейся яркостью (см. рис. 5, фрагмент 2). Как и на рис. 6, сверху слева дано исходное изображение, справа – зашумленное изображение, а внизу (слева и справа) – результат фильтрации исходного и зашумленного изображений соответственно. Эффективность работы алгоритма налицо: шум удален полностью без снижения резкости контурных линий. Но на однородных участках виден небольшой дефект – ложные контуры, появившиеся в результате повышения резкости контурных линий. Тем не менее за счет того, что резкость контурных линий на отфильтрованном изображении заметно выше, чем на исходном, можно провести незначительное размытие, не опасаясь снижения визуальной привлекательности изображения.

На рис. 8 показан результат работы фильтра на практически однородном участке с плавно меняющейся яркостью и отсутствием резких контурных элементов (см. рис. 5, фрагмент 3). Как и в предыдущих случаях, сверху слева – исходное изображение, справа – зашумленное изображение. Фильтрация исходного изображения подавляет текстуру и приводит к малозаметному выделению ложных контуров вблизи уголка губ. При фильтрации зашумленного изображения наблюдается небольшое размытие уголка губ, что в данном случае объясняется не самим алгоритмом фильтрации, а наложением шума, приведшим к потере контрастности низкочастотной области. А отсутствие высокочастотной контурной компоненты на этом участке изображения не позволило увеличить резкость данной области в процессе обработки.

Поскольку ставилась цель добиться визуальной привлекательности изображений после фильтрации, результат оценивали независимые наблюдатели. Каждому из них многократно демонстрировались пары однотипных изображений и предлагалось выбрать наиболее привлекательное, при этом критерии оценки наблюдателям не предоставлялись. Результаты выбора по каждой паре регистрировались.

Результаты, полученные после большой серии предъявлений пар изображений, позволяют утверждать, что наблюдатели оказались не в состоянии однозначно различить изображения, подвергнутые фильтрации. Изображениям, полученным путем фильтрации исходного и зашумленного изображений, была дана одинаковая оценка. Изображение с присутствием шума все наблюдатели оценили как наименее привлекательное. При выборе наилучшего изображения мнения наблюдателей разделились: одни из них отдали предпочтение исходному изображению, другие – отфильтрованному. При этом в большинстве случаев выбор наблюдателей не был однозначным и находился в пределах погрешности измерений. Расхождения в выборе можно объяснить тем, что при фильтрации изображения была увеличена резкость контурных линий, и многим наблюдателям более резкое изображение показалось более привлекательным. Но из-за того, что при фильтрации пропала текстура кожи, снизилась естественность изображения. Субъективность человеческого восприятия привела к разделению мнений.

**Таким образом, можно утверждать, что алгоритм фильтрации оптимальным окном позволяет эффективно подавлять шумоподобные искажения на изображении, сохраняя визуальную привлекательность за счет сохранения резкости контурных линий. При этом такие особенности работы алгоритма, как возможное появление ложных контуров и повышение резкости контурных линий, не приводят к заметному снижению визуальной привлекательности полученных изображений.**

*ЛИТЕРАТУРА*


1. **Балакришнан А.В.** Теория фильтрации Калмана: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988.
2. Физиология сенсорных систем. Ч. I. Физиология зрения / Под ред. Г.В. Гершуни. – Л.: Наука, 1971.
3. **Глезер В.Д.** Зрение и мышление. – Л.: Наука, 1985.
4. **Бронников А.В., Воскобойников Ю.Б.** Комбинированные алгоритмы нелинейной фильтрации зашумленных сигналов и изображений // Автометрия. – 1990. – № 1.
5. **Бакут П.А., Колмогоров Г.С.** Сегментация изображений: Методы выделения границ областей // Зарубежная радиоэлектроника. – 1987. – № 10.


*Получено 20.09.11*