

## Применение частотной фильтрации изображения для удаления помех, вызванных тиснением фотобумаги

П. А. Чочиа

*Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН, Москва, Россия*  
Поступила в редколлегию 02.12.2010

**Аннотация**—Рассматривается применение частотной фильтрации изображения для удаления на сканированных фотоснимках помех, вызываемых тиснением фотобумаги.

При сканировании старых фотоотпечатков с тиснением (текстурным рельефом) фотобумаги, как правило, появляются специфические помехи. Сами по себе тисненные фотографии не выглядят дефектными, но из-за имеющегося рельефа их поверхности, при оцифровке планшетными сканерами возникает блик на каждом из элементов рельефа тиснения фотоотпечатка. В результате введенная фотография оказывается покрытой множеством мелких пятен, форма и структура расположения которых зависят от конкретной матрицы тиснения. Пример того, как выглядит такое тисненное изображение, представлен на Рис. 1.

В принципе, возможен способ подавления таких помех еще при оцифровке. Для этого требуется сканировать снимок несколько раз, каждый раз располагая его под разными углами по отношению к лампе и оптической оси объектива сканера (т.е. попросту поворачивая снимок); в дальнейшем полученные изображения совмещаются и усредняются [1]. Благодаря тому, что при повороте снимка блики оказываются на другом участке рельефа элемента тиснения, удастся заметно уменьшить их яркость. Однако, во-первых, такой способ не устраняет помехи полностью, а во-вторых, он не всегда возможен; например, в случае, если доступен только один какой-то вариант изображения. В такой ситуации становятся полезными методы цифровой обработки, а более конкретно — частотной фильтрации.

Известно, что в предположении аддитивности, некоррелированности и стационарности сигнала и помехи, наилучшей линейной фильтрацией с точки зрения минимума среднеквадратического отклонения является винеровская фильтрация [2–4]. Т.е. для аддитивной модели, в которой получаемый сигнал есть сумма исходного сигнала и шума



Рис. 1. Исходное изображение с помехами, вызванными тиснением фотобумаги.

$$g(t) = s(t) + n(t), \quad (1)$$

где  $s(t)$  — полезный сигнал, а  $n(t)$  — шум, оптимальный линейный фильтр будет иметь частотную характеристику

$$C(f) = \frac{P_s(f)}{P_s(f) + P_n(f)}. \quad (2)$$

Здесь  $P_s(f)$  — энергетический спектр сигнала, а  $P_n(f)$  — энергетический спектр шума. Этот подход может быть с успехом применен и к двумерным дискретным сигналам — изображениям [5, 6], с тем лишь отличием, что частота  $f$  является уже координатами в двумерном спектре:  $f = (u, v)$ , где  $u \in [0, X - 1]$ ,  $v \in [0, Y - 1]$ ;  $X, Y$  — размеры изображения.

При построении фильтра (2) основная трудность заключается в оценке значений  $P_s(f)$  и  $P_n(f)$ . К сожалению ни одна, ни другая функция нам неизвестны. Все, чем мы можем воспользоваться — это измерить спектр получаемого сигнала  $P_g(f) = P_s(f) + P_n(f)$ , т.е. их смеси, и применить какие-то предположения о характеристиках каждой из  $P_s(f)$  и  $P_n(f)$ , исходя из априорных сведений о сигнале и помехе.

Исходный сигнал (изображение)  $g(x, y)$  является действительным, следовательно, его Фурье-спектр  $F(u, v)$  будет комплексно сопряженным, а энергетический спектр — центрально симметричным. Компоненты спектра, соответствующие низким пространственным частотам изображения, будут располагаться по углам матрицы значений двумерного спектра, а соответствующие высоким пространственным частотам — в ее центре. Такое расположение не вполне удобно для анализа. Как правило, его меняют, диагонально переставляя квадранты спектра:  $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 3 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 3 & 2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ ; при этом нижние частоты оказываются в центре, а верхние — по углам спектра. Нулевая частота будет находиться в точке с координатами  $(X/2, Y/2)$ . Такая перестановка эквивалентна предварительному умножению изображения на  $(-1)^{x+y}$  [5]. Далее мы будем придерживаться именно такой интерпретации спектра.

Вид энергетического спектра  $P_g(f)$  изображения на Рис. 1 показан на Рис. 2,а. Интересующему нас изображению без помех соответствует центральное светлое пятно в области низких частот спектра; высокочастотные его составляющие заметно убывают по амплитуде к краям практически до нуля и сливаются с уровнем черного. Текстурная помеха отображается в энергетическом спектре в виде набора ярких мелких пятен, расположенных вокруг центрального пятна; назовем их сателлитами. Четкая геометрическая структура расположения этих пятен определена пространственной периодичностью элементов текстуры на исходном фотоснимке.

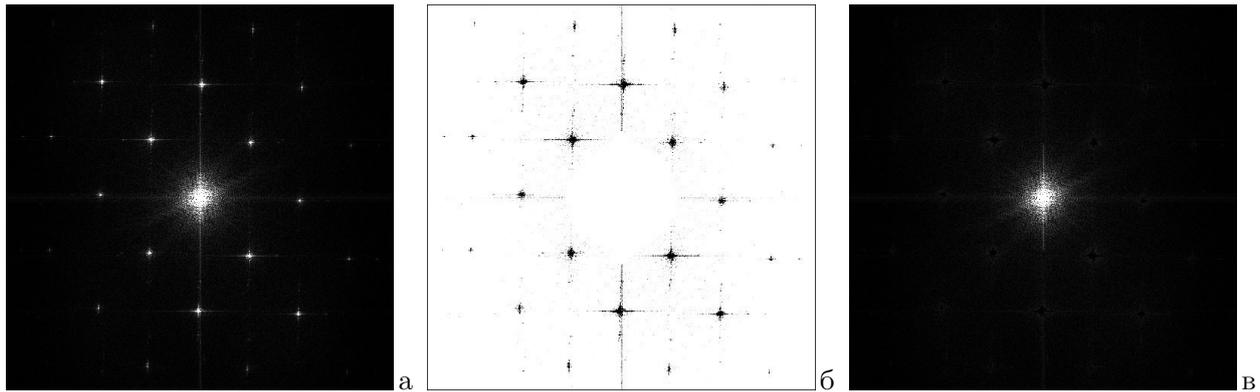


Рис. 2. Спектр изображения на Рис. 1 (а); полученный фильтр (б); спектр после фильтрации (в).

Как видно, амплитуда пиков, соответствующих текстурной помехе, во много раз больше амплитуды сигнала в тех же точках, а значит, фазовая составляющая этих компонент спектра практически полностью определяется помехой. Следовательно, даже отыскав оптимальный

фильтр  $C(f)$  в (2) и применив его, нам не удастся восстановить правильную фазу в этих точках, поскольку он меняет только амплитуду. Как известно [7], фаза спектральных составляющих играет значительно более важную роль в формировании структуры изображения, чем амплитуда. Поэтому ненулевые частотные составляющие с неверной фазой по-прежнему останутся помехой, хотя и в значительно меньшей степени.

Будем полагать, что компоненты спектра текстурной помехи, дающие основной вклад, почти полностью сосредоточены в мелких пятнах-сателлитах, причем  $P_n(u, v) \gg P_s(u, v)$ , если точка  $(u, v)$  принадлежит одному из таких пятен, и  $P_n(u, v) \ll P_s(u, v)$  в противном случае. Тогда фильтр (2) можно приблизить следующей простой формулой, полагая  $k \sim \bar{P}_s$ :

$$C(u, v) = \begin{cases} k/(P_g(u, v) + k), & \text{если } (u, v) \text{ принадлежит пятну-сателлиту,} \\ 1, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3)$$

В такой ситуации, а также с учетом вышесказанного замечания по поводу фазы, не будет большой ошибкой вместо винеровского использовать режекторный (или близкий ему) фильтр [5], полностью обнуляющий компоненты спектра в заданных точках. Таким образом, задача состоит в построении фильтра, подавляющего компоненты спектра в участках, соответствующих текстурной помехе. Поскольку энергетический спектр  $P(u, v)$  является действительным сигналом, он в свою очередь может рассматриваться как изображение, что позволяет использовать его как исходные данные для построения фильтра (3), применяя к нему разработанные ранее методы анализа и преобразования.

Для выравнивания фона  $P(u, v)$  воспользуемся алгоритмом нерезкого маскирования [8]:

$$q(u, v) = p(u, v) - \bar{p}(u, v) + K, \quad (4)$$

где  $\bar{p}(u, v)$  — среднее значение окружающих элементов в локальной окрестности  $W$ , а  $K = 0$ . В связи с тем, что  $P_n(u, v) \gg P_s(u, v)$ , а следовательно значения элементов в пятнах-сателлитах значительно отличаются от окружающего фона, рекомендуется  $\bar{p}(u, v)$  вычислять как значение медианы по окрестности  $W$  [9], а размеры  $W$  выбирать такими, чтобы площадь отдельного пятна составляла не более 1/4 площади  $W$ .

Также необходимо обеспечить сохранение центрального пятна спектра, соответствующего изображению без помех. Для этого создадим маску с формой, соответствующей центральному пятну. Подберем порог  $t_1$  такой, чтобы площадь центральной области  $P_s(u, v)$ , отсекаемой данным порогом — т.е. количество связанных его точек, удовлетворяющих условию  $\bar{p}(u, v) > t_1$ , было максимальным, но тем не менее эта область еще не захватывала ближайшие пятна-сателлиты. Обозначим полученную область через  $Z$ . Сформируем новый массив  $r(u, v)$  такой, что

$$r(u, v) = \begin{cases} q(u, v), & \text{если } (u, v) \notin Z, \\ 0, & \text{если } (u, v) \in Z. \end{cases}$$



Рис. 3. Результат фильтрации изображения, представленного на Рис. 1.

Также выберем порог клипирования  $t_2$  таким, чтобы его значение было чуть меньше амплитуды наименьшего из основных пятен-спутников. После этого осуществим масштабирование значений  $r(u, v)$ :

$$r'(u, v) = \begin{cases} r(u, v)/t_2, & \text{если } r(u, v) < t_2, \\ 1, & \text{если } r(u, v) \geq t_2. \end{cases}$$

Искомый фильтр  $C(u, v)$  получим инвертированием значений  $r'(u, v)$ :  $C(u, v) = 1 - r'(u, v)$ . Сформированный фильтр показан на Рис. 2,б. Произведение (поэлементное) спектра исходного изображения  $F(u, v)$  на полученный фильтр  $C(u, v)$  даст отфильтрованный спектр (Рис. 2,в). После обратного его Фурье-преобразования получим окончательный результат, показанный на Рис. 3.

На Рис. 4, представлен еще один пример фильтрации изображения с помехами, вызванными тиснением фотобумаги.



Рис. 4. Исходное изображение, искаженное тиснением (а) и изображение после фильтрации (б).

Полученные результаты демонстрируют вполне приемлемое качество отфильтрованных изображений. Тем не менее, заметно, что полного удаления помех текстуры на всех участках изображения достичь не удастся. В качестве причин можно отметить две. Во-первых, эффект Гиббса, в результате которого остаются следы помех на краях изображения, а во-вторых, нестационарность (пространственная неоднородность) помехи, проявляющаяся в неполном удалении текстуры на отдельных участках изображения. Этот эффект особенно заметен в правом нижнем углу Рис. 4,а; к тому же на данном участке, вероятно, наблюдается клипирование (“зарезание” сигнала), т.е. полная потеря информации в пятнах помехи, а значит, нарушение предполагаемой модели (1) — аддитивности сигнала и шума.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дедерер В. Цифровая ретушь для ленивых. *КомпьюАрт*, 2000, № 4.
2. Wiener N. *Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series*. NY, John Wiley, 1949.

3. Боде Г., Шеннон К. Упрощенное изложение линейной минимально-квадратичной теории сглаживания и предсказания. В кн.: *Теория информации и ее приложения*. М.: Физматгиз, 1959.
4. Возенкрафт Дж., Джейкобс И. Теоретические основы техники связи. М.: Мир, 1968.
5. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005.
6. Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений. М.: Сов. радио, 1979.
7. Оппенхайм А. В., Лим Дж. С. Важность фазы при обработке сигналов. ТИИЭР, 1981, т. 69, № 5, с. 39–54.
8. Беликова Т. П., Кронрод М. А., Чочиа П. А., Ярославский Л. П. Цифровая обработка фотоснимков поверхности Марса, переданных АМС “Марс-4” и “Марс-5”. *Космические исследования*, 1975, Т. 13, вып. 6, с. 898–906.
9. Chochia P. A. Image Enhancement Using Sliding Histograms. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1988, V. 44, no. 2, pp. 211–229.

*Статью представил к публикации член редколлегии В. И. Венец*