

ОБРАБОТКА КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

А.Ю. Лихошерстный

Белгородский
государственный
университет

e-mail:
ozzy.osbourne.man@gmail.com

В работе изложен новый метод фильтрации аэрокосмических изображений на основе частотных представлений и представлены результаты экспериментальных исследований эффективности разработанных алгоритмов.

Ключевые слова: изображение, импульсный шум, фильтрация, частотные представления.

Большинство знаний о мире получается из эмпирических данных. Значительная часть задач обработки информации и анализа данных связана с изображениями. Примерами могут служить обработка и анализ данных дистанционного зондирования Земли со спутников, объемные изображения объектов, полученные с помощью голографических устройств, результаты применения методов неразрушающих исследований и контроля в промышленности, разработка “органов зрения” роботов и современных медицинских систем диагностики (рентгенография, машинная томография, эндоскопия и т.д.). При получении космических снимков (данных дистанционного зондирования Земли) часто встречаются изображения, искаженные помехами, появляющимся на этапах формирования или передачи. Причинами возникновения шума на изображении могут быть сбои в работе канала связи, несовершенством аппаратуры и др. В конечном результате это приводит к ухудшению качества визуального восприятия и снижению достоверности решений, которые будут приниматься на основе анализа таких изображений. Для успешного решения задач поиска и идентификации объектов, определения различного рода их количественных характеристик необходимо, чтобы первичные изображения характеризовались высоким визуальным качеством, которое теряется из-за неудовлетворительных условий получения изображений, несовершенства систем передачи видеoinформации и ее отображения [2] и т.п.

Ослабление действия помех достигается фильтрацией [2]. Под *фильтрацией изображений* понимают операцию, имеющую своим результатом изображение того же размера, полученное из исходного по некоторым правилам [1].

Основными видами помех являются импульсный шум и полосы:



Рис.1. Помехи на космических снимках вида импульсный шум (слева) и полосы(справа)

Импульсные помехи представляют собой значительные по величине одиночные изолированные выбросы (изолированные контрастные точки) [6]. *Полосы* проявляются в виде квазипериодических изменений интенсивности пикселей только вдоль одной оси координат.

Современные интерактивные программные средства ScanViewer и ENVI вместе с тем не позволяют эффективно устранять помехи вида импульсный шум и полосы и при фильтрации существенно искажают само изображение. Поэтому задача разработки алгоритмов фильтрации указанных помех является актуальной.

Целью работы является изложение предлагаемого метода фильтрации космических изображений на основе частотных представлений и результатов экспериментальных исследований, демонстрирующих эффективность разработанных алгоритмов.

Изображение можно определить как двумерную функцию f_{ik} , где $i=1,2,\dots,M$ и $k=1,2,\dots,N$ – координаты в пространстве (конкретно, на плоскости), и значение f которой в любой точке, задаваемой парой координат (i,k) , называется *интенсивностью* изображения в этой точке [1].

Частотным представлением функции f_{ik} называется следующее выражение [4]:

$$f_{ik} = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F(u, v) e^{ju_i} e^{jv_k} dudv. \quad (1)$$

Здесь e^{ju_i} и e^{jv_k} – базисные функции (функции представляются в базисе Фурье), аргументы u и v – *круговые частоты*, отражающие периодичность (цикличность) изменений исходной функции f_{ik} с изменением аргументов i и k .

В качестве весовой функции $F(u,v)$ можно использовать трансформанту Фурье:

$$F(u, v) = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N f_{ik} e^{-ju(i-1)} e^{-jv(k-1)}. \quad (2)$$

На основе равенства Парсеваля энергию изображения можно представить в виде суммы:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N f_{ik}^2 = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |F(u, v)|^2 dudv = \sum_{r=1}^{R_x} \sum_{m=1}^{R_y} P_{\Omega_{r,m}}. \quad (3)$$

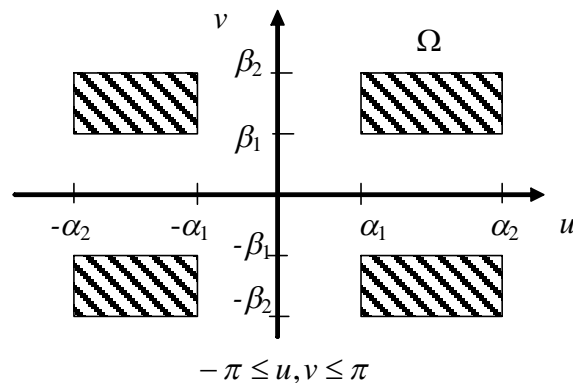
где значение доли энергии $P_{\Omega_{r,m}}$ двумерного сигнала f_{ik} в двумерной частотной области Ω_{ik} :

$$P_{\Omega_{r,m}} = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{(u,v) \in \Omega_{ik}} |F(u, v)|^2 dudv \quad (4)$$

В качестве области Ω_{ik} рассматривается следующая центрально-симметричная область частотной плоскости [4]:

$$\Omega_{ik} : \{ \Omega_{ik}(u, v) \mid (u \in [\alpha_1, \alpha_2], v \in [\beta_1, \beta_2]) \cup (u \in [\alpha_1, \alpha_2], v \in [-\beta_2, -\beta_1]) \cup (u \in [-\alpha_2, -\alpha_1], v \in [-\beta_2, -\beta_1]) \cup (u \in [-\alpha_2, -\alpha_1], v \in [\beta_1, \beta_2]) \}, \quad (5)$$

где $0 \leq \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2 \leq \pi$



Если в правую часть представления (4) подставить определение (2), то после преобразований можно получить соотношение [4]:

$$P_{\Omega_{ik}} = \text{tr} (A^T \cdot \Phi \cdot B \cdot \Phi^T) \quad (6)$$

где элементы матриц $A=(a_{i1i2})$ и $B=(b_{k1k2})$ вычисляются следующим образом:

$$a_{i_1 i_2} = \begin{cases} \frac{\sin(\alpha_2(i_1 - i_2)) - \sin(\alpha_1(i_1 - i_2))}{\pi(i_1 - i_2)}, & i_1 \neq i_2, \\ \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\pi}, & i_1 = i_2, \end{cases}$$

$$b_{k_1 k_2} = \begin{cases} \frac{\sin(\beta_2(k_1 - k_2)) - \sin(\beta_1(k_1 - k_2))}{\pi(k_1 - k_2)}, & k_1 \neq k_2, \\ \frac{\beta_2 - \beta_1}{\pi}, & k_1 = k_2. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь Φ – исходное изображение, trcs – след матрицы.

Возможность проведения анализа изображений на основе частотных представлений определяется тем, что в графических данных, зачастую, наблюдается квазипериодичность отображаемых процессов. На изображении могут присутствовать повторяющиеся объекты, которые задают некоторую периодичность изменения яркости изображения.

Предлагаемый метод фильтрации состоит в следующем:

На первом шаге производится обработка изображения с помощью порогового метода. Необходимость проведения этого шага обусловлена тем, что часть импульсного шума расположена в тех же частотных подобластях, что и само “чистое” изображение. Это особенно сильно проявляется, когда интенсивность пикселей помех отличается от интенсивности пикселей “чистого” изображения на большую величину. Пороговая функция помогает сгладить эту разницу интенсивностей, что даёт возможность эффективного использования частотного фильтра.

Введём следующую пороговую функцию:

$$f_{ik}^* = \begin{cases} f_{ik}, & \text{при } \frac{|\sigma - f_{ik}|}{\sigma} < \rho \\ \sigma, & \text{при } \frac{|\sigma - f_{ik}|}{\sigma} \geq \rho \end{cases}, \quad (8)$$

где f_{ik} – значение интенсивности в текущей точке, f_{ik}^* – новое значение интенсивности текущего пикселя, ρ – порог, σ – среднее значение интенсивности соседних пикселей:

$$\sigma = \frac{(f_{(i+1)(k-1)} + f_{i(k-1)} + f_{(i-1)(k-1)} + f_{(i-1)k} + f_{(i-1)(k+1)} + f_{i(k+1)} + f_{(i+1)(k+1)} + f_{(i+1)k})}{8}.$$

Порог ρ задаётся интерактивно.

На втором шаге используется фильтр, который был взят из работы [5]. Выражение для нахождения результата фильтрации Φ^* изображения Φ в частотной области Ω выглядит следующим образом:

$$\Phi^*_{\Omega} = A^T \Phi B, \quad (9)$$

где элементы матриц A и B вычисляются по формуле (7).

Недостатком такого решения является трудоемкость вычислений. Для того чтобы сократить вычисления прудельваются следующие процедуры, взятые из работы [3] (прудельвается то же самое для изображения, т.е. для двумерного случая):

1. Вычисляются собственные числа и собственные вектора матриц A и B ($\vec{q}_i^A = (q_{1i}^A, q_{2i}^A, \dots, q_{Mi}^A)$, $i = 1, 2, \dots, M$, $\vec{q}_j^B = (q_{1j}^B, q_{2j}^B, \dots, q_{Nj}^B)$, $j = 1, 2, \dots, N$).
2. После чего находятся матрицы QA и QB , столбцами которых являются собственные векторы субполосных матриц:
 $Q_A = (\vec{q}_{A1}, \vec{q}_{A2}, \dots, \vec{q}_{AM})$, $Q_B = (\vec{q}_{B1}, \vec{q}_{B2}, \dots, \vec{q}_{BN})$.
3. Из собственных чисел составляются квадратные диагональные матрицы:
 $L_A = \text{diag}(\lambda_{A1}, \lambda_{A2}, \dots, \lambda_{AM})$, $L_B = \text{diag}(\lambda_{B1}, \lambda_{B2}, \dots, \lambda_{BM})$.
4. Значения собственных чисел упорядочиваем по убыванию:
 $\lambda_{A1} \geq \lambda_{A2} \geq \dots \geq \lambda_{AM}$, $\lambda_{B1} \geq \lambda_{B2} \geq \dots \geq \lambda_{BM}$.

Соответственно меняется и порядок собственных векторов.

5. Находятся минимальные индексы собственных чисел матриц А и В:

$$J_a = 2 \left\lceil \frac{M}{2R_a} \right\rceil + 2, \quad J_b = 2 \left\lceil \frac{N}{2R_b} \right\rceil + 2,$$

где операция [выражение] означает операцию взятия целой части «выражения», а величины R_a и R_b находятся из следующих соотношений:

$$R_a = \frac{\pi}{\alpha_2 - \alpha_1}, \quad R_b = \frac{\pi}{\beta_2 - \beta_1}.$$

6. Игнорируются собственные числа, значение которых меньше заданного порога.

7. Фильтрация производится при помощи следующего выражения:

$$\Phi^*_{\Omega} = Q_A L_A Q_A^T \Phi Q_B L_B Q_B^T, \quad (10)$$

где Ω – двумерная частотная область (субинтервал), в которой осуществляется фильтрация. Ω разбивается на равные элементарные прямоугольные подобласти – частотные интервалы $\Omega(r1, r2)$, $r1=1, 2, \dots, Ra$, $r2=1, 2, \dots, Rb$.

Уменьшение трудоёмкости вычислений достигается игнорированием собственных чисел, значения которых меньше некоторого заданного порога. Таким образом, существенно сокращается количество итераций при программной реализации.

Исследования показали, что оставшиеся импульсные шумы и полосы расположены в области высоких частот. Для подавления высоких частот составляется матрица частотных интервалов C размерностью $Ra \times Rb$, элементы которой равны либо нулю (что соответствует подавлению соответствующих частот), либо единице (рис.2).

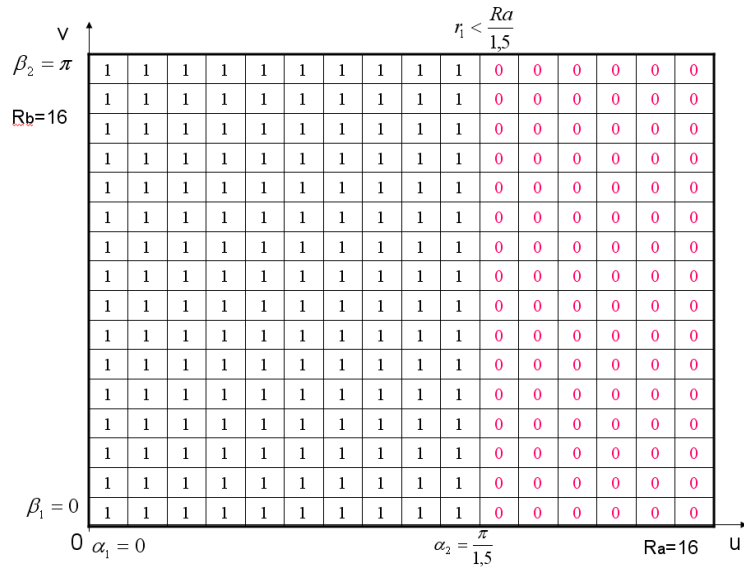


Рис.2. Подавление высоких частот с помощью матрицы частотных интервалов

Восстановление исходного изображения осуществляется по следующей формуле:

$$\tilde{\Phi} = \sum_{i=1}^{R_a} \sum_{k=1}^{R_b} \Phi^*_{\Omega_{ik}}. \quad (11)$$

Были проведены предварительные исследования и произведено сравнение с существующими современными программными средствами, которое показало, что предлагаемый алгоритм фильтрации меньше всего искажает “чистое” изображение (без помех). Была произведена фильтрация следующего изображения (рис.3).

Как видно из рисунков, ScanViewer с этой задачей не справился. Многие точки импульсного шума были объединены в более крупные объекты. Программа ENVI устранила почти все инородные пиксели. Но при этом изменилась интенсивность всего изображения (повысилась контрастность), а границы объектов были сильно размыты.

Относительная среднеквадратическая погрешность фильтров представлена в таблице 1 и вычислялась следующим образом:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum (f_{ik} - f^*_{ik})^2}{\sum f_{ik}^2}}, \quad (12)$$

где f – исходное изображение; f^* – отфильтрованное изображение.



а) Исходное изображение импульсным шумом



б) Результат фильтрации с помощью программы ScanViewer



в) Результат фильтрации с помощью программы ENVI



г) Результат фильтрации предлагаемым методом

Рис.3. Устранение импульсного шума программой ScanViewer, программой ENVI и предлагаемым методом

Таблица 1

Относительная среднеквадратическая погрешность

Способ фильтрации	Отн. сред. погрешность
Оптимальный фильтр	0,004241
ScanViewer	0,004323
ENVI	0,01734

Погрешность была рассчитана на той области изображения, где отсутствовали помехи. То есть, оценивалось, насколько фильтры искажают “чистый” снимок. Предлагаемый фильтр показал наилучшие результаты как в плане улучшения визуального представления снимка, так и в плане возможности проведения дальнейшего анализа изображения.

Также оценивалось, насколько искажается информация в зашумленной области изображения при применении предлагаемого фильтра. Для этого в чистой части изображения были искусственно созданы импульсный шум и полосы (рис. 4). Относительная среднеквадратическая погрешность зашумленного изображения составила:

$$h = \sqrt{\frac{\sum (f_{ik} - f_{ik}^*)^2}{\sum f_{ik}^2}} = 0,038567.$$

Относительная среднеквадратическая погрешность улучшенного изображения:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum (f_{ik} - f_{ik}^*)^2}{\sum f_{ik}^2}} = 0,0031895.$$

Соотношение сигнал/шум оказалось равным: $h / \delta = 12,1$.



а) Исходное изображение



б) Зашумленное изображение



в) Улучшенное изображение предлагаемым методом

Рис. 4. Оценка искажения информации в зашумленной области при фильтрации предлагаемым методом

То есть, при устранении помех вида импульсный шум и полосы изображение улучшилось в 12,1 раза.

Разработанный алгоритм позволяет получить мощный инструмент фильтрации изображений, который способен устранять шумы, подавляя те области частот, в которых расположены помехи. Он является оптимальным в том смысле, что спектр получаемого в результате фильтрации изображения имеет наименьшее среднеквадратическое отклонение от спектра фильтруемого изображения в заданном двумерном частотном интервале, а вне этого интервала имеет наименьшее отклонение от нуля. Таким образом, новый метод позволяет улучшать космические изображения с малой погрешностью, что даёт возможность проводить дальнейший их анализ.

Литература

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
2. Грузман И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах. Учебное пособие. – Новосибирск, 2000. – 166 с.
3. Жилияков, Е.Г. Вариационные методы анализа и построения функций по эмпирическим данным на основе частотных представлений. – Белгород: Изд-во БелГУ, 2007. – 160 с.
4. Жилияков, Е.Г. Метод определения точных значений долей энергии изображений в заданных частотных интервалах / Е.Г. Жилияков, А.А. Черноморец, И.В. Лысенко // Вопросы радиоэлектроники. – Сер. РЛТ, 2007. – Вып. 4. – С. 115-123.
5. Жилияков Е.Г. Оптимальная фильтрация изображений на основе частотных представлений / Е. Г. Жилияков, А.А. Черноморец // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. – 2008. – Вып.1. – С.118-132.

6. Ярославский Л.П. Введение в цифровую обработку изображений. – М.: Сов. радио, 1979. – 312 с.

PROCESSING OF SPACE IMAGES ON THE BASIS OF FREQUENCY REPRESENTATIONS

A.U. Likhosherstnyy

Belgorod state university

e-mail:
ozzy.osbourne.man@gmail.com

In work the new method of a filtration of space images is stated on the basis of frequency representations and results of experimental researches of efficiency of the developed algorithms are submitted.

Key words: the image, pulse noise, a filtration, frequency representations.