

УДК 621.397

А.А. ЧЕРНОМОРЕЦ

## МЕТОД УДАЛЕНИЯ ПОЛОСОВЫХ ПОМЕХ НА КОСМИЧЕСКИХ СНИМКАХ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*В работе представлены теоретические и экспериментальные исследования метода удаления полосовых помех на космических снимках земной поверхности на примере реальных изображений.*

*Ключевые слова:* изображение; полосовые помехи; оптимальная фильтрация; трансформанта Фурье; субинтервал.

*Using real images, the theoretical and experimental research results of band noise filtering method of Earth surface cosmic images are given in the work.*

*Keywords:* image, band noise; optimal filtering; Furie transformant; subinterval.

В настоящее время для обоснованного принятия управленческих решений, связанных с анализом информации о происходящих на поверхности Земли процессах, широко используются методы дистанционного зондирования планеты со спутников. При регистрации, передаче, обработке космических снимков, полученных в результате дистанционного зондирования Земли, часто встречаются изображения, искаженные помехами. Причиной появления искажений на изображениях могут быть естественные явления в атмосфере, несовершенство и сбои в электропитании аппаратуры, сбои в работе канала связи и др. Следствием наличия искажений на изображениях является ухудшение качества визуального восприятия и снижение достоверности решений, принимаемых на основе анализа таких изображений. Для успешного решения задач космического мониторинга земной поверхности на основе данных дистанционного зондирования, таких, как поиск и идентификация объектов, определение их различных количественных характеристик, необходимо, чтобы анализируемые изображения обладали высоким визуальным качеством. Одним из направлений достижения данной цели является разработка эффективных, оптимальных, в смысле минимума некоторого функционала качества, методов и алгоритмов фильтрации изображений на космических снимках земной поверхности.

В данной работе приведены теоретические основы и результаты вычислительных экспериментов по удалению аддитивных полосовых помех (рис. 1), возникающих на изображениях земной поверхности на космических снимках.

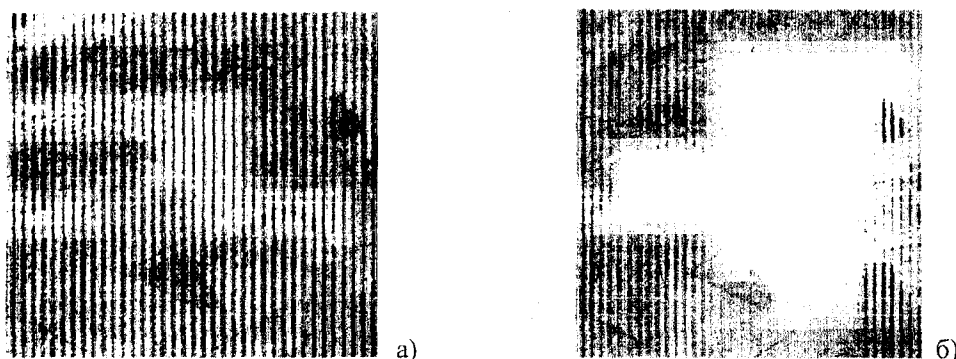


Рисунок 1 – Пример регулярных (а) и случайных (б) полосовых помех на снимках

### ВАРИАЦИОННЫЙ МЕТОД ОПТИМАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

Для решения задачи выделения и удаления полосовых помех на изображениях, заданных в цифровом виде с помощью матрицы яркости  $\Phi = (f_{ik})$ ,  $i = 1, 2, \dots, M$ ,  $k = 1, 2, \dots, N$ , использован метод оптимальной фильтрации изображений на основе частотных представлений [1,2]. О частотных представлениях при обработке изображений [3] можно говорить, поскольку изображение как функция с конечной или неограниченной областью определения может быть представлено в виде суммы синусов и косинусов различных частот, умноженных на некоторые весовые множители – коэффициенты Фурье. Метод оптимальной фильтрации изображений основан на следующем вариационном принципе: трансформанта Фурье  $Z(u, v)$  результата фильтрации  $Y_\Omega$  является оптимальной в смысле евклидовой нормы ее отклонения в заданном частотном интервале  $\Omega$  от трансформанты Фурье  $F(u, v)$  исходного изображения  $\Phi$  и от нуля – вне данного интервала.

На основании данного вариационного принципа разработана вычислительная процедура, которая позволяет находить результат фильтрации  $Y_\Omega$ , не вычисляя трансформанту Фурье:

$$Y_\Omega = A^T \cdot \Phi \cdot B, \quad (1)$$

где матрицы  $A = (a_{i_1 i_2})$ ,  $i_1, i_2 = 1, 2, \dots, M$ , и  $B = (b_{k_1 k_2})$ ,  $k_1, k_2 = 1, 2, \dots, N$  – субполосные матрицы [4], значения элементов которых определяются соотношениями

$$a_{i_1 i_2} = \begin{cases} \frac{\sin(\alpha_2(i_1 - i_2)) \cdot \sin(\alpha_1(i_1 + i_2))}{\pi(i_1 - i_2)}, & i_1 \neq i_2, \\ \frac{\alpha_2 \cdot \alpha_1}{\pi}, & i_1 = i_2, \end{cases} \quad b_{k_1 k_2} = \begin{cases} \frac{\sin(\beta_2(k_1 - k_2)) \cdot \sin(\beta_1(k_1 + k_2))}{\pi(k_1 - k_2)}, & k_1 \neq k_2, \\ \frac{\beta_2 \cdot \beta_1}{\pi}, & k_1 = k_2. \end{cases} \quad (2)$$

Значения

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

задают границы симметричной частотной области (частотного субинтервала)  $\Omega$ , которая имеет вид [1]

$$\Omega: \{ \Omega(u, v) | (u \in [\alpha_1, \alpha_2], v \in [\beta_1, \beta_2]) \cup (u \in [\alpha_1, \alpha_2], v \in [-\beta_2, -\beta_1]) \cup \\ \cup (u \in [-\alpha_2, -\alpha_1], v \in [-\beta_2, -\beta_1]) \cup (u \in [-\alpha_2, -\alpha_1], v \in [\beta_1, \beta_2]) \} \quad (3)$$

В работе [4] показано, что субполосные матрицы являются симметричными, положительно определенными. Учитывая это свойство и ненулевые собственные числа субполосных матриц  $A$  и  $B$  выражение для определения результата оптимальной фильтрации принимает вид

$$Y_\Omega = Q_{1A} L_{1A} Q_{1A}^T \Phi Q_{1B} L_{1B} Q_{1B}^T, \quad (4)$$

где

$$Q_{1A} = (q_{A1}, q_{A2}, \dots, q_{A_{M_1}}), \quad Q_{1B} = (q_{B1}, q_{B2}, \dots, q_{B_{N_1}}), \\ L_{1A} = \text{diag}(\lambda_{A1}, \lambda_{A2}, \dots, \lambda_{A_{M_1}}), \quad L_{1B} = \text{diag}(\lambda_{B1}, \lambda_{B2}, \dots, \lambda_{B_{N_1}})$$

это матрицы, построенные на основании ненулевых собственных чисел матриц  $A$  и  $B$  и соответствующих собственных векторов.

Для определения значения отдельного элемента результата фильтрации на основании соотношения (4) можно использовать следующее выражение

$$Y_{\Omega mn} = \sum_{i_a=1}^{M_a} \sum_{k_b=1}^{N_b} \lambda_{A i_a} \lambda_{B k_b} \cdot q_{A m i_a} q_{B n k_b} f_{i_a k_b}, \quad (5)$$

$$m = 1, 2, \dots, M, \quad n = 1, 2, \dots, N,$$

где

$$\Gamma_{i,k_h} = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N q_{A_{i,k}} f_{ik} q_{B_{k,k}},$$

$J_a$  и  $J_b$  – количество ненулевых собственных чисел матриц  $A$  и  $B$  соответственно.

Использование выражения (4) позволяет существенно сократить количество вычислительных операций по сравнению с выражением (1), не снижая точности вычислений.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что, используя соотношения (4, 5), вычисленный результат фильтрации не допускает растекания энергии двумерного сигнала за пределы заданной частотной области.

### ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основная цель экспериментальных исследований метода удаления полосовых помех на изображениях земной поверхности заключается в оценке доли энергии результата фильтрации (изображение  $Y_{opt}$ , получаемое на основании соотношения (1)), которая сосредоточена вне выбранного частотного субинтервала  $\Omega$ , а также оценке визуального качества результата фильтрации. Для вычисления указанной доли энергии используется соотношение

$$\delta_{\Omega opt} = \frac{\|Y_{opt}\|^2 - P_{\Omega}(Y_{opt})}{\|Y_{opt}\|^2} = 1 - \frac{P_{\Omega}(Y_{opt})}{\|Y_{opt}\|^2}, \quad (6)$$

где  $\|Y_{opt}\|^2$  – энергия изображения  $Y_{opt}$  в области определения трансформанты Фурье,

$P_{\Omega}(Y_{opt})$  – доля энергии изображения  $Y_{opt}$  в частотном субинтервале  $\Omega$ , определяемая на основании соотношения [5]

$$P_{\Omega}(Y_{opt}) = \text{trac}(A_{\Omega}^T Y_{opt} B_{\Omega} Y_{opt}^T). \quad (7)$$

В ходе вычислительных экспериментов проводился сравнительный анализ оценки (6) доли энергии изображения  $Y_{opt}$ , полученного в результате оптимальной фильтрации, с соответствующими характеристиками изображений, полученных при реализации известных частотных фильтров:

идеальный фильтр (результат фильтрации  $Y_{ideal}$ ),

фильтр Баттерворта (результат фильтрации  $Y_{Butterw}$ ),

Гауссов фильтр (результат фильтрации  $Y_{Gaussian}$ ).

Соответствующие оценки доли энергии результатов фильтрации (изображения  $Y_{ideal}$ ,  $Y_{Butterw}$ ,  $Y_{Gaussian}$ ), которая сосредоточена вне выбранного частотного субинтервала  $\Omega$ , имеют следующий вид

$$\delta_{\Omega ideal} = 1 - \frac{P_{\Omega}(Y_{ideal})}{\|Y_{ideal}\|^2}, \quad \delta_{\Omega Butterw} = 1 - \frac{P_{\Omega}(Y_{Butterw})}{\|Y_{Butterw}\|^2}, \quad (8)$$

$$\delta_{\Omega Gaussian} = 1 - \frac{P_{\Omega}(Y_{Gaussian})}{\|Y_{Gaussian}\|^2}.$$

Для проведения экспериментальных исследований использованы реально зарегистрированные изображения земной поверхности с наложенным аддитивным шумом в виде полос.

Параметры полосовых режекторных фильтров, соответствующих оптимальной фильтрации и другим известным фильтрам, определялись на основании параметров одного и того же частотного субинтервала.

Значения характеристики (6) разработанного метода оптимальной фильтрации были сопоставлены с аналогичными характеристиками (8) выходных последовательностей полосовых фильтров, которые часто используются в настоящее время для выделения шумов в изображениях.

Для получения большей наглядности при оценивании различий оптимальной фильтрации и фильтрации с помощью известных фильтров представляется естественным построить графики соответствующих характеристик выходных последовательностей фильтров.

Сравнительный анализ характеристик различных методов фильтрации в работе выполнен на основе исследования параметров фильтров и результатов их применения в различных подобластях двумерной частотной области, полученных при фиксированных значениях одной из независимых переменных частотного пространства. Однако данный факт не снижает важности полученных результатов ввиду известного свойства преобразования Фурье – преобразование Фурье можно записать так, что переменные в нем оказываются разделенными.

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Экспериментальные исследования были осуществлены на основе обработки реально зарегистрированных изображений земной поверхности.

Вычислительные эксперименты проводились над изображениями с наложенным аддитивным шумом в виде регулярно расположенных полос, например, изображение на рисунке 1а. В данном случае шум генерировался на основании следующей функции

$$z_{ik} = a_1 \sin(2\pi f_1 k), \quad i = 1, 2, \dots, 512, \quad k = 1, 2, \dots, 512, \quad (15)$$

где

$$f_1 = 0.0193; \quad a_1 = 3.2.$$

Выбор указанной функции шума позволяет осуществить исследование влияния энергии исходного сигнала за пределами узкого частотного субинтервала на результаты фильтрации.

На изображении, представленном на рисунке 1а, отчетливо выделяется шум в виде регулярно расположенных полос. Абсолютные значения трансформанты Фурье данного шума в частотном диапазоне  $u = 0.22\pi$ ,  $v \in [0.12\pi, 0.18\pi]$  частотной области  $O(u, v)$  приведены на рисунке 2а.

В таблице 1 представлены значения долей энергии выходных последовательностей оптимального и других анализируемых фильтров, находящихся вне заданного частотного интервала, вычисленные согласно (6), (8).

Таблица 1 – Оценка долей энергии результатов фильтрации вне частотного субинтервала  $\Omega$

№	Границы частотного субинтервала $\Omega$		$\delta_{\Omega_{opt}}$	$\delta_{\Omega_{ideal}}$	$\delta_{\Omega_{Butterw}}$	$\delta_{\Omega_{Gaussian}}$
	$\beta_1$	$\beta_2$				
1	$0.1225\pi$	$0.1275\pi$	0.45063	0.4934	0.49576	0.49498
2	$0.1275\pi$	$0.1325\pi$	0.39786	0.69633	0.52204	0.58376
3	$0.1325\pi$	$0.1375\pi$	0.14707	0.54203	0.54145	0.54166
4	$0.1375\pi$	$0.1425\pi$	0.45906	0.44559	0.48699	0.47405

Продолжение Таблицы 1

5	$0.1425\pi$	$0.1475\pi$	0.11868	0.17959	0.17851	0.17879
6	$0.1475\pi$	$0.1525\pi$	0.46702	0.965	0.94727	0.95544
7	$0.1525\pi$	$0.1575\pi$	0.14877	0.63893	0.63957	0.63766
8	$0.1575\pi$	$0.1625\pi$	0.4228	0.66264	0.66406	0.66342
9	$0.1625\pi$	$0.1675\pi$	0.47909	0.70685	0.48886	0.55977
10	$0.1675\pi$	$0.1725\pi$	0.20265	0.52652	0.52662	0.52654
11	$0.1725\pi$	$0.1775\pi$	0.23106	0.54215	0.54282	0.54261

Значения, приведенные в таблице 1, показывают, что относительные доли «просачивания» энергии за пределы заданного частотного субинтервала у выходных последовательностей идеального, Гауссова фильтров и фильтра Баттерворта существенно больше, чем у метода оптимальной фильтрации.

На рисунке 2б приведены абсолютные значения трансформант Фурье при  $u = -0.22\pi$ ,  $v \in [0.12\pi, 0.18\pi]$  исходного изображения и результатов фильтрации, полученных при применении оптимального и других фильтров в частотном субинтервале  $\Omega$ , параметры которого определяются величинами

$$\alpha_1 = 0, \alpha_2 = \pi, \beta_1 = 0.1425\pi, \beta_2 = 0.1475\pi,$$

и которому соответствуют максимальные абсолютные значения трансформанты Фурье присутствующего на изображении шума.

На рисунке 2б видно влияние на выходную последовательность идеального, Гауссова фильтров и фильтра Баттерворта энергии входного изображения, сосредоточенной вне выбранного частотного интервала.

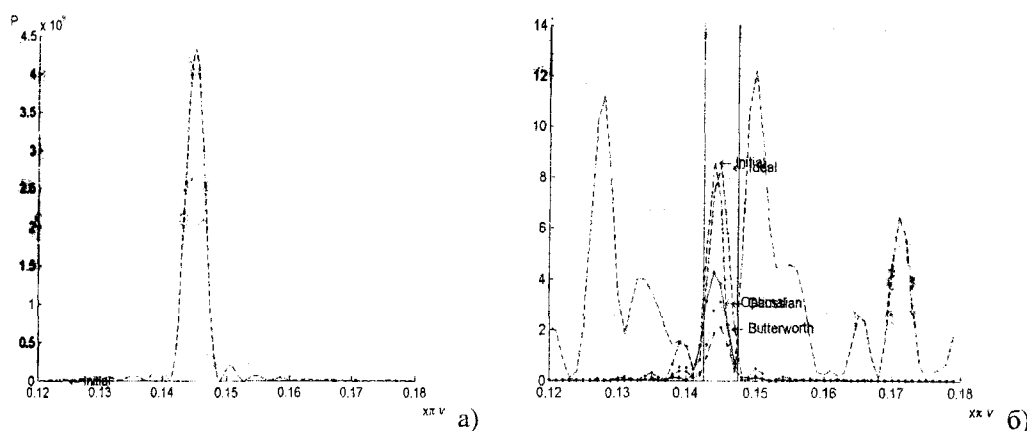


Рисунок 2 – Абсолютные значения трансформанта Фурье ( $u = -0.22\pi$ ):  
 а) шума, б) – исходного изображения и выходных последовательностей фильтров в частотном субинтервале  $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = \pi, \beta_1 = 0.1425\pi, \beta_2 = 0.1475\pi$ : — — — — — исходного изображения,  
 фильтров: —●—●— — оптимальный, —◆—◆— — идеальный,  
 —■—■— Баттерворта, —▲—▲— — Гауссов

На рисунке 3 различие в результатах фильтрации с помощью анализируемых фильтров вызвано влиянием энергии исходного изображения, сосредоточенной вне выбранного частотного субинтервала у его левой границы. С помощью оптимального фильтра шум в центральной части изображения удален в отличие от других фильтров.

При выполнении следующей группы вычислительных экспериментов было использовано изображение (рис.1б), которое отличается от изображения, представленного на рисунке 1а, видом аддитивного шума, задаваемого случайным образом.

В данном случае шум генерировался на основании следующей функции

$$f_{ik} = a_1 \sin(2\pi f_1 k) + a_2 \sin(2\pi f_2 k) + a_3 \sin(2\pi f_3 k) + a_4 \sin(2\pi f_4 k) + a_5 \sin(2\pi f_5 k), \quad (15)$$

$$i = 1, 2, \dots, 512, \quad k = 1, 2, \dots, 512,$$

где

$$f_1 = 0.0193; f_2 = 0.0208; f_3 = 0.0279, f_4 = 0.0295, f_5 = 0.0311,$$

$$a_1 = 3.2; a_2 = 2.9; a_3 = 3.5, a_4 = 2.1, a_5 = 2.2.$$

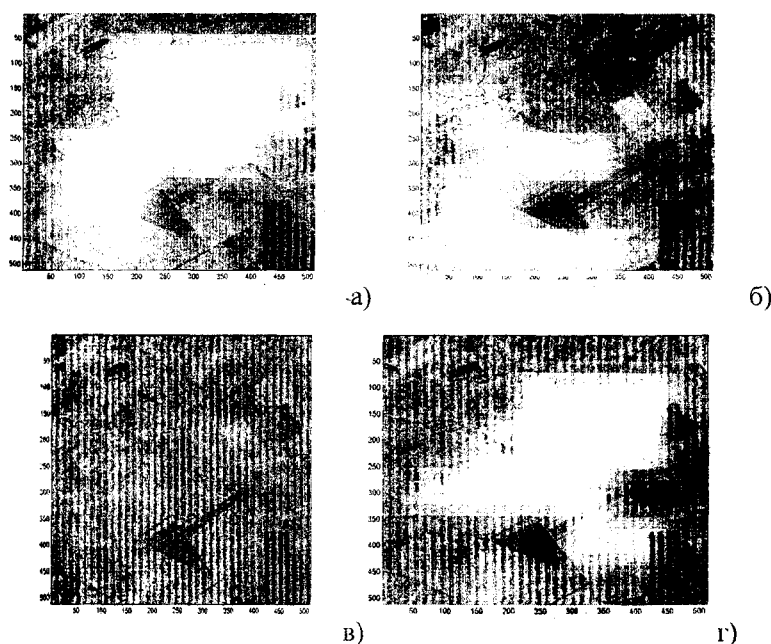


Рисунок 3 – Результаты фильтрации изображения (рисунок 1а) на основании фильтров: а) – оптимальный, б) – идеальный, в) – Баттлворта, г) – Гауссов

Такие значения частот позволяют осуществить исследование различных аспектов фильтрации и, прежде всего, влияния энергии исходного сигнала за пределами широкого частотного интервала на ее результаты.

На изображении (рис. 1б) отчетливо выделяется шум в виде нерегулярно расположенных полос. Абсолютные значения трансформанты Фурье данного шума в диапазоне  $u \in [0.22\pi, 0.24\pi]$ ,  $v \in [0.12\pi, 0.18\pi]$  приведены на рисунке 4а.

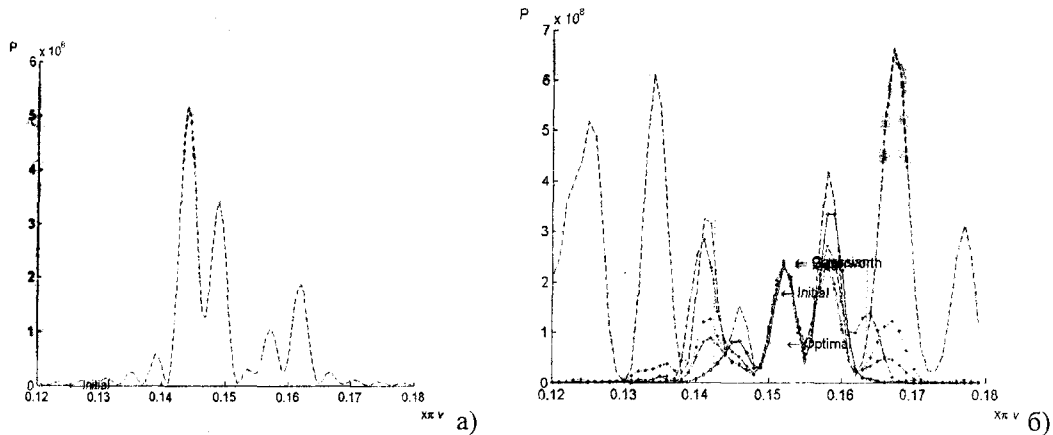
Рассмотрим частотный субинтервал:

$$\Omega: \{\alpha_1 = 0, \quad \alpha_2 = \pi, \quad \beta_1 = 0.1425\pi, \quad \beta_2 = 0.1635\pi\},$$

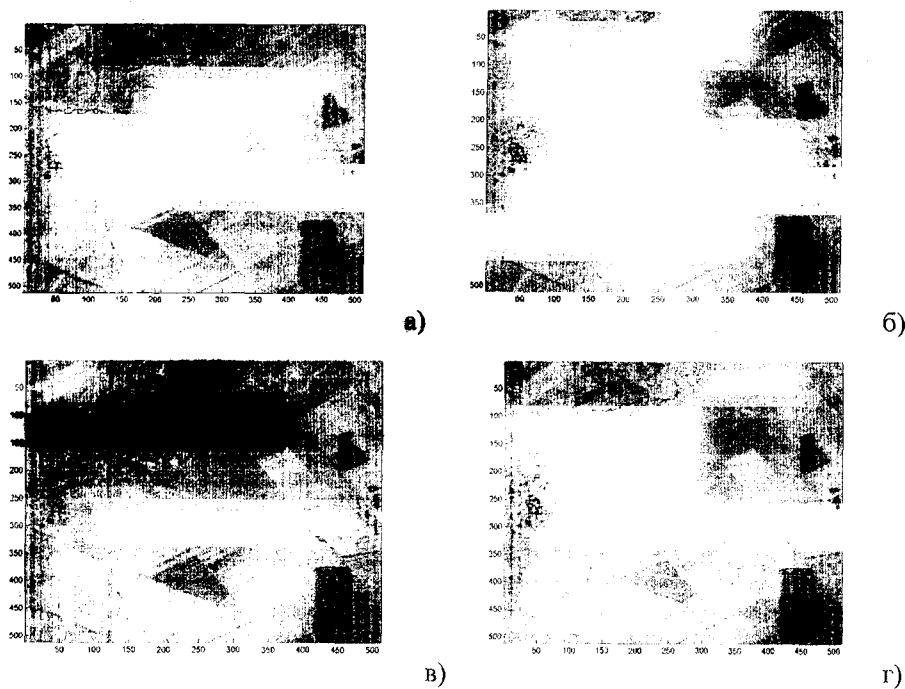
которому соответствуют максимальные абсолютные значения трансформанты Фурье присутствующего на изображении шума.

На рисунке 4б приведены абсолютные значения трансформант Фурье при  $u \in [0.18\pi, 0.24\pi]$ ,  $v \in [0.12\pi, 0.18\pi]$  исходного изображения и результатов фильтрации, полученных при применении оптимального и других фильтров в заданном частотном субинтервале  $\Omega$ .

На рисунке 4б различие в результатах фильтрации с помощью рассматриваемых фильтров вызвано влиянием энергии исходного изображения, сосредоточенной вне выбранного частотного субинтервала у его левой и правой границ, вследствие этого режекторные фильтры идеальной, Баттерворта и Гауссов не полностью удаляют шум на изображении (рис. 5). С помощью оптимального фильтра шум (полосы) в центральной части изображения удален (рис. 5а).



**Рисунок 4 – Абсолютные значения трансформанта Фурье ( $u=0.18\pi$ ):**  
 а - шума; б - исходного изображения и выходных последовательностей фильтров в частотном субинтервале  $\alpha_1=0$ ,  $\alpha_2=\pi$ ,  $\beta_1=0.1425\pi$ ,  $\beta_2=0.1635\pi$ : - - - - - исходного изображения, фильтров:  $\diamond$ - $\diamond$  - оптимальный,  $\cdot$ - $\cdot$  - идеальный,  $\cdot$ - $\cdot$ - $\cdot$  - Баттерворта,  $\cdot$ - $\cdot$ - $\cdot$ - $\cdot$  - Гауссов



**Рисунок 5 – Результаты фильтрации изображения (рисунок 1б) на основании фильтров**  
 а - оптимальный, б - идеальный, в - Баттерворта, г - Гауссов

## ВЫВОДЫ

Предложенный метод удаления полосовых помех на космических снимках земной поверхности (оптимальная фильтрация) обладает преимуществами перед используемыми в настоящее время частотными фильтрами: визуально очевидно, что с помощью предложенного метода шум удален, погрешности аппроксимации значений долей энергий исходного изображения при оптимальной фильтрации в заданном частотном субинтервале сравнимы с соответствующей погрешностью использования других исследованных фильтров, а «просачивание энергии» за пределы субинтервала, в котором выполнялась оптимальная фильтрация, значительно меньше. Эффективность предложенного метода фильтрации обусловлена лежащим в его основе вариационным принципом минимизации евклидовой нормы погрешности аппроксимации значений исходной трансформанты Фурье в пределах выбранного частотного субинтервала и нуля вне данного субинтервала. В частности это обуславливает меньшую, чем при КИХ-фильтрации, долю энергии результата, попадающую за пределы частотного субинтервала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жилияков Е.Г., Черноморец А.А. Вариационные алгоритмы анализа и обработки изображений на основе частотных представлений. – Белгород: Изд-во ООО ГИК, 2009. – 146 с.
2. Жилияков Е.Г., Черноморец А.А. Оптимальная фильтрация изображений на основе частотных представлений // Вопросы радиоэлектроники. – Сер. ЭВТ, 2008. – Вып. 1. – С. 118-131.
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
4. Жилияков Е.Г. Методы анализа и построения функций по эмпирическим данным на основе частотных представлений. – Белгород, изд-во БелГУ, 2007. – 160 с.
5. Жилияков Е.Г., Черноморец А.А., Лысенко И.В. Метод определения точных значений долей энергии изображений в заданных частотных интервалах // Вопросы радиоэлектроники. – Сер. РЛТ, 2007. – Вып. 4. – С. 115-123.

### **Черноморец Андрей Алексеевич**

Белгородский государственный университет, г. Белгород  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
информационно-телекоммуникационных систем и технологий  
Тел.: (4722)30-13-54  
E-mail: chernomoretcs@bsu.edu.ru