

УДК 528

А. Л. Макаров, Д. К. Мозговой, В. С. Хорошилов, В. Н. Балашов, Д. В. Маслей, В. М. Попель

¹ Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

² Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпропетровськ

ЭФФЕКТИВНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ПЕРИОДИЧНЫХ ПОМЕХ НА АРХИВНЫХ СНИМКАХ

Рассматривается эффективный метод коррекции приборных пространственно-периодичных помех на архивных спутниковых снимках, полученных с помощью оптико-механических сканеров. Показаны существенные преимущества фильтрации с использованием двумерного преобразования Фурье с применением комбинированных масок по сравнению с другими методами

Для оценки временных изменений земных покровов часто используются архивные спутниковые снимки [4, 7, 9, 10, 13], особенностью которых являются различные приборные геометрические и радиометрические искажения. Систематические приборные искажения в большинстве случаев могут быть устранены автоматически на борту с использованием радиометрической калибровки по эталонному излучателю либо на начальных этапах наземной обработки с использованием паспортных данных датчика, либо с применением статистических алгоритмов.

Одним из видов приборных искажений являются радиометрические помехи с пространственно-периодичной структурой, обусловленные в основном разбросами значений чувствительности и нелинейности фотоэлементов датчика, а также усиления и динамического диапазона элементов усилительного тракта. Такие помехи характерны как для оптико-механических сканеров [5, 14] (приборы типа МСУ-В, МСУ-С, МСУ-М спутников «Сич-1» и «Океан-О», приборы типа ТМ спутников «Landsat» и др.), так и для оптико-электронных сканеров [11, 12] (приборы типа МСУ-Э спутников «Метеор» и др.).

На снимках от оптико-механических сканеров эти помехи проявляются в виде постоянных в пределах строки отклонения уровня сигнала или в виде «выпавших» строк, принимающих крайние значения яркости (рис. 1).

Нестабильность во времени параметров бортового сканера (особенно при нештатном функционировании) не позволяет автоматически производить компенсацию приборных искажений данного класса непосредственно на борту спутника или на этапе предварительной обработки спутниковых снимков, а используемые алгоритмы статистического устранения приборных помех работают только с ненормализованными изображениями, сохраняющими исходную строчную структуру (т. е. не подвергнутыми ресэмплингу при геометрической коррекции и географической привязке).

Использование конволюционных фильтров [1, 2] для устранения помех с пространственно-периодичной структурой на ресэмплированных изображениях малоэффективно, так как медианные фильтры не обеспечивают достаточного подавления помех, сглаживающие фильтры снижают пространственное разрешение снимка, а направленные фильтры вносят значительные нелинейные радиометрические искажения (см. рис. 9).

На рис. 2 приведена геометрическая схема пространственно-периодичной помехи (а) и ее спектральный образ (б).

Снимок оптико-механического сканера, имеющего k элементов в линейке, представляет цифровое растровое изображение с линейными размерами $m \times n$ и пиксельными размерами $M \times N$, пиксели которого представляют собой дискретные отсчеты $F(x, y)$ с пространственными периодами L_x и L_y для непрерывной функции интенсивности $G(x, y)$, ограниченной пространственными частотами u_{\max} и v_{\max} (рис. 3).

Пространственная периодичность приборных помех от оптико-механических сканеров позво-

ляет производить их эффективную фильтрацию в области пространственных частот u, v с использованием математического аппарата спектрального анализа и синтеза, например двумерного преобразования Фурье [3, 15].

При использовании преобразования Фурье фильтрация заключается в выполнении следующих операций (рис. 4).

1. Производится переход от пространственно-представления $G(x, y)$ к пространственно-частотному $G(u, v)$ путем прямого преобразования Фурье:

$$G(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(x, y) \exp[-2\pi i(ux + vy)] dx dy .$$

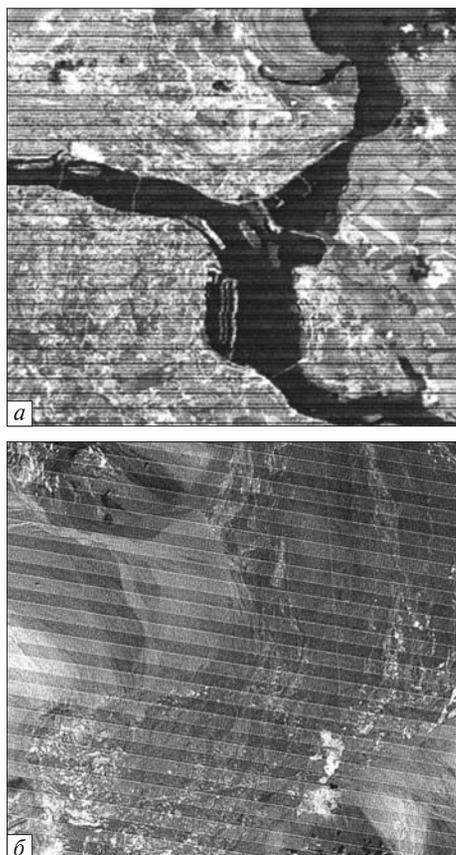


Рис. 1. Характерные помехи оптико-механических сканеров: а — негеореференцированное изображение (4-й канал МСУ-В, спутник «Океан-О»), б — геореференцированное изображение (1-й канал ТМ1, спутник «Landsat»)

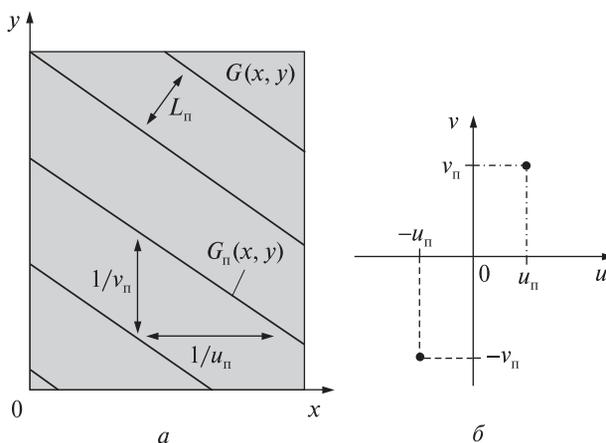


Рис. 2. Схема пространственно-периодичной помехи: а — изображение, описываемое функцией интенсивности $G(x, y)$, а также периодическая помеха $G_n(x, y)$ с пространственным периодом $L_n = (u_n^2 + v_n^2)^{-1/2}$; б — спектральный образ помехи

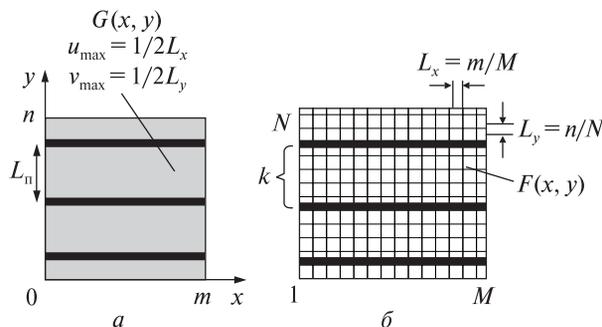


Рис. 3. Снимок сканера в виде цифрового растрового изображения

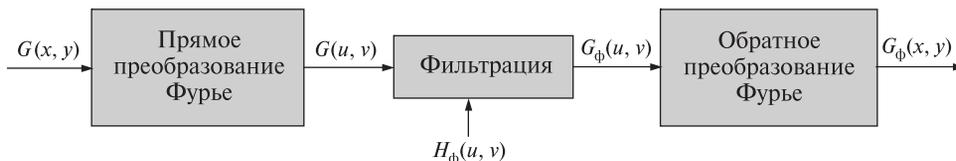


Рис. 4. Схема алгоритма фильтрации с использованием преобразования Фурье: $G(x, y)$ — исходное изображение, $G(u, v)$ — исходный пространственно-частотный спектр, $G_\phi(u, v)$ — фильтрованный пространственно-частотный спектр, $G_\phi(x, y)$ — фильтрованное изображение, $H_\phi(u, v)$ — передаточная функция фильтра

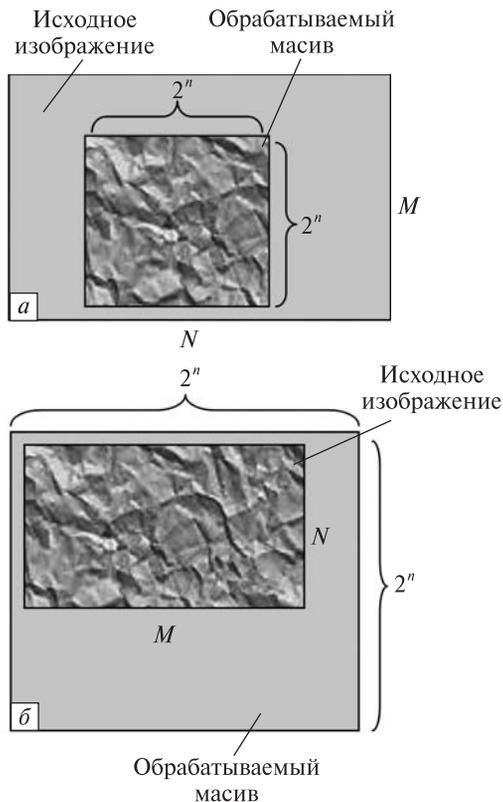


Рис. 5. Способы приведения изображения к размеру $2^n \times 2^n$ пкл

2. Производится фильтрация (удаление периодической помехи) в частотной области путем умножения исходного спектра $G(u, v)$ на передаточную функцию фильтра $H_\phi(u, v)$ (маску с нулевыми значениями в области пространственных частот помехи u_n, v_n и единичными в остальной области пространственных частот):

$$G_\phi(u, v) = G(u, v) \cdot H_\phi(u, v).$$

3. Производится обратное преобразование Фурье для возврата от пространственно-частот-

ного представления $G_\phi(u, v)$ к пространственному $G_\phi(x, y)$:

$$G_\phi(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_\phi(u, v) \exp[2\pi i(ux + vy)] dudv.$$

Параметры маски $H_\phi(u, v)$ определяются по известному пространственному периоду помехи или экспериментально по результатам фильтрации.

Для представления цифровых растровых изображений в области пространственных частот (построения фурье-образа $F(u, v)$) применяется дискретное двумерное прямое преобразование Фурье [14]:

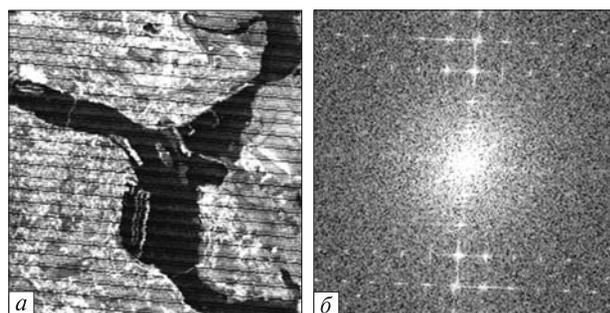
$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y) \exp(-i2\pi ux/M - i2\pi vy/N)],$$

где M и N — количество пикселей исходного изображения по горизонтали и вертикали соответственно, i — мнимая единица, u, v — переменные пространственных частот.

Для ускорения расчетов используется алгоритм Кули-Тьюки быстрого преобразования Фурье, который при N отсчетах уменьшает количество пар операций умножения/деления с $2N^2$ до $N \log_2 N$. Перед его использованием пиксельный размер изображения приводится к квадрату с пиксельным размером $2^n \times 2^n$ путем выделения части изображения (рис. 5, а) или дополнения пикселями с нулевыми значениями (рис. 5, б).

В данном случае применено пространственное выделение $2^8 \times 2^8$ пикселей (рис. 6, а) для снимка, показанного на рис. 1, а, подвергнутого ресэмплингу.

Полученный в результате двумерного прямого преобразования фурье-образ $F(u, v)$ для отобра-



$-u, -v$	$u, -v$
$-u, v$	u, v

в

Рис. 6. Фрагмент показанного на рис. 1, а изображения: а — пространственное выделение $2^8 \times 2^8$ для ресэмплированного снимка, б — плотность $F(u, v)$ распределения пространственных частот (фурье-образ снимка), в — знаки переменных пространственных частот на образе

жения в режиме 256 градаций серого подвергается нормализации (амплитудному масштабированию) [15]:

$$F_n(u, v) = 255 \ln \left[1 + (e - 1) \frac{|F(u, v)|}{|F_{\max}(u, v)|} \right],$$

где $F(u, v)$ — значение элемента образа после прямого преобразования Фурье, $F_{\max}(u, v)$ и $F_n(u, v)$ — максимальное и нормализованное (отображаемое) значения элемента образа.

Нормализованный образ $F_n(u, v)$ (рис. 6, б) отображает плотность распределения пространственных частот в обрабатываемом массиве. Переменные пространственных частот u, v принимают как положительные, так и отрицательные значения, которые располагаются на образе Фурье симметрично относительно начала координат (рис. 6, в), что требует соответствующей симметрии при наложении маски.

Для выполнения фильтрации на области пространственных частот, подлежащих удалению, накладываемая фильтрующая маска, состоящая из пикселей с нулевыми значениями (т. е. соот-

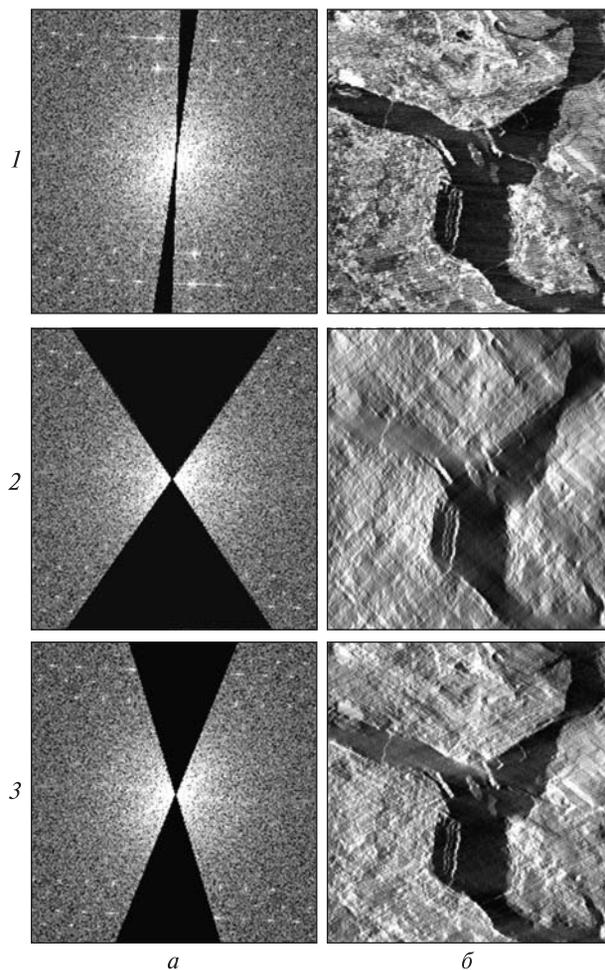


Рис. 7. Клиновидные маски трех типов: а — фурье-образы снимков $F(u, v)$ с наложенными масками $H(u, v)$, б — полученные фильтрованные изображения

ветствующим элементам образа Фурье присваивается нулевое значение).

На рис. 7 показаны клиновидные маски 1—3, наиболее эффективные для данного класса помех, и полученные фильтрованные изображения. На рис. 7, а приведены фурье-образы снимков $F(u, v)$ с наложенными масками $H(u, v)$, а на рис. 7, б — изображения после фильтрации (без выравнивания гистограммы). Видно, что для узкой маски 1 характерны слабое подавление высоких пространственных частот, недостаточное подавление помехи и незначительные радиометрические искажения; для широкой маски 2 — сильное подавление высоких простран-

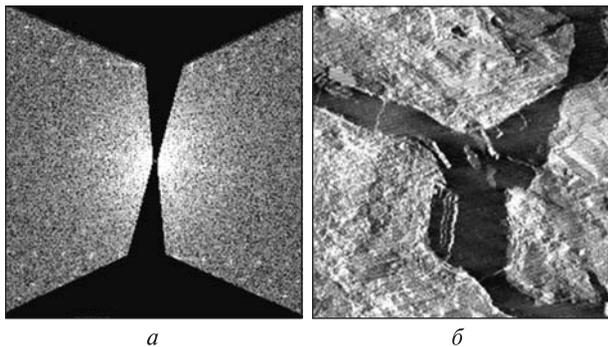


Рис. 8. Фурье-образ снимка на рис. 6, *a* с комбинированной маской (*a*) и полученное отфильтрованное изображение (без выравнивания гистограммы) (*б*)

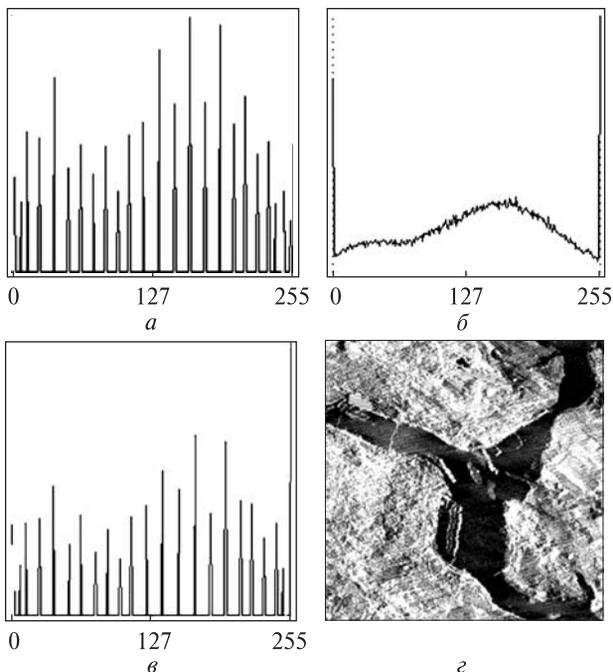


Рис. 9. Результат радиометрической коррекции путем выравнивания гистограммы: *a* — распределение яркости пикселей фильтрованного изображения до выравнивания гистограммы, *б* — распределение яркости пикселей исходного изображения, *в* — распределение яркости пикселей фильтрованного изображения после выравнивания гистограммы, *г* — изображение после выравнивания гистограммы

венных частот, достаточное подавление помехи и значительные радиометрические искажения, для средней маски \mathcal{Z} — умеренное подавление высоких пространственных частот, достаточное

подавление помехи и заметные радиометрические искажения.

При необходимости параллельно с фильтрацией пространственно-периодических помех можно выполнить низкочастотную или высокочастотную фильтрацию путем добавления соответствующих масок.

Для возврата к растровому изображению $f(x, y)$ выполняется обратное двумерное преобразование Фурье:

$$f(x, y) = (MN)^{-1} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} [F(u, v) \times \exp(i2\pi ux / M + i2\pi vy / N)],$$

где $x = \{1 \dots N\}$, $y = \{1 \dots M\}$ — пиксельные координаты элементов исходного цифрового изображения по горизонтали и вертикали соответственно.

В отфильтрованном изображении будут удалены периодические компоненты, пространственный период которых соответствует отфильтрованным на фурье-образе пространственным частотам. Качество фильтрации определяется используемой маской. Как видно из рис. 7, при фильтрации с использованием преобразования Фурье подавление помехи также связано со снижением пространственного разрешения и радиометрическими искажениями, но существенно в меньшей степени, чем при использовании convolutionных фильтров.

Для повышения четкости отфильтрованного изображения используется подобранная опытным путем комбинация из клиновидной и треугольной масок (рис. 8).

Для коррекции радиометрических искажений, вносимых непосредственно преобразованием Фурье, выполняется операция выравнивания гистограммы с использованием в качестве эталона исходного снимка (рис. 6, *a*). Результат радиометрической коррекции путем выравнивания гистограммы показан на рис. 9.

Достоинством фильтрации с использованием двумерного преобразования Фурье по сравнению со стандартной convolutionной фильтрацией на основе «скользящих» масок является возможность выполнения улучшающих операций радиометрической коррекции (эквализация

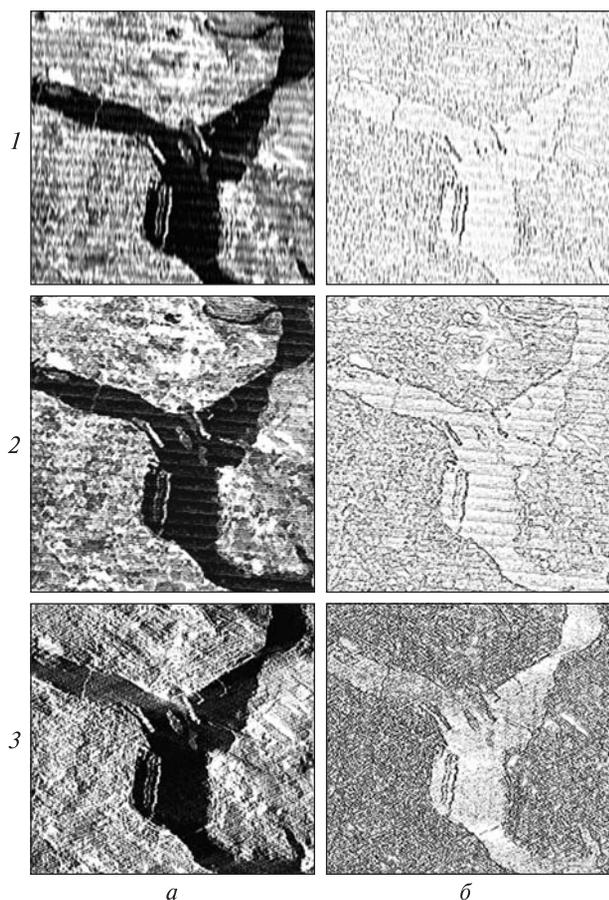


Рис. 10. Результаты выполнения улучшающих операций повышения четкости (а) и выделения контуров (б) в комбинации с разными методами фильтрации: 1 — конволюционная низкочастотная фильтрация, 2 — конволюционная медианная фильтрация, 3 — фурье-фильтрация

гистограммы, локальное контрастирование и др.) и преддиффрочной обработки (повышение четкости, выделение контуров и др.) без заметного проявления компонентов помех, оставшихся после фильтрации (см. рис. 10). Кроме того, такая фильтрация может применяться в одном технологическом цикле обработки совместно с гомоморфной фильтрацией, также использующей прямое и обратное преобразования Фурье.

Для сравнительной оценки качества фильтрации радиометрических помех с пространственно-периодической структурой на рис. 11 по-

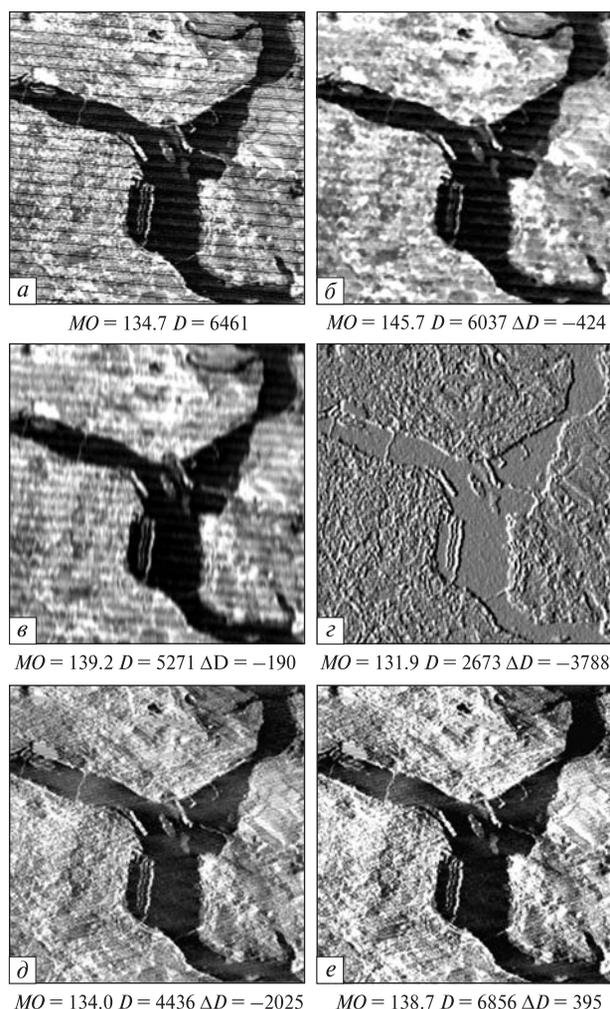


Рис. 11. Результаты фильтрации различными фильтрами: а — исходное изображение с помехами, б — изображение после медианной фильтрации (размер ядра 3×3), в — изображение после низкочастотной фильтрации (размер ядра 3×9), г — изображение после направленной фильтрации (размер ядра 3×3 , угол 5°), д — изображение после фурье-фильтрации (комбинированная маска на рис. 6), е — изображение после выравнивания гистограммы

казаны результаты фильтрации одного и того же участка изображения, выполненные различными фильтрами, а также соответствующие исходному и отфильтрованным изображениям статистические моменты (математическое ожидание MO и дисперсия D), рассчитанные по формулам:

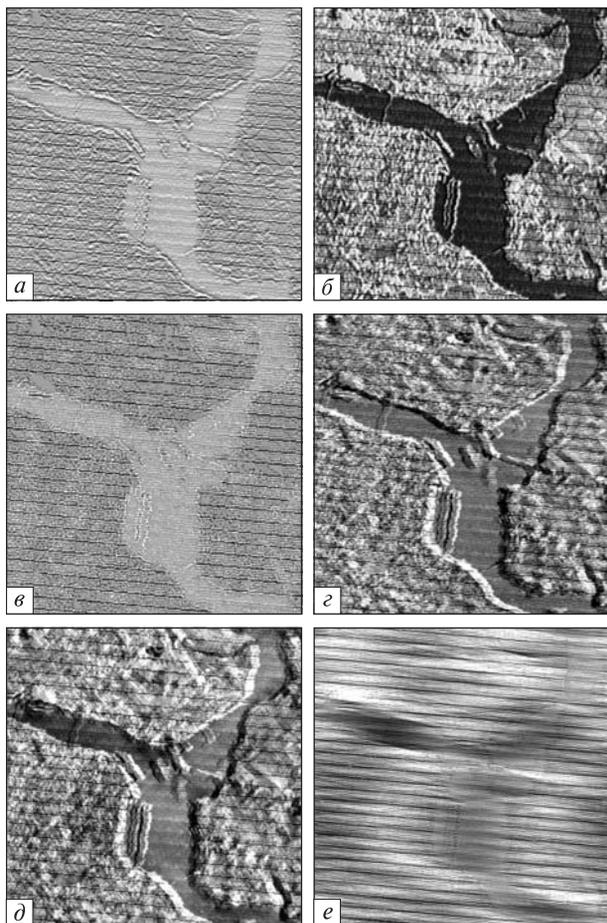


Рис. 12. Компоненты, удаленные в процессе фильтрации: *a* — низкочастотная фильтрация, *б* — направленная фильтрация, *в* — медианная фильтрация, *г* — фурье-фильтрация (узкая маска), *д* — фурье-фильтрация (широкая маска), *е* — фурье-фильтрация (комбинированная маска)

$$MO = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f(x, y) \cdot P(x, y)],$$

$$D = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (P(x, y) \cdot [f(x, y) - M]^2),$$

где $P(x, y)$ — вероятность появления пиксела со значением $f(x, y)$.

На рис. 12 показаны компоненты, удаленные в процессе фильтрации.

Результаты обработки других снимков также подтвердили высокую эффективность предложенного метода фильтрации по сравнению с традиционными.

ВЫВОДЫ

Предложен эффективный метод фильтрации приборных пространственно-периодических помех с применением комбинированных масок, обеспечивающий существенные преимущества по сравнению с другими методами.

1. Грузман И. С., Киричук В. С., Косых В. П. и др. Цифровая обработка изображений в информационных системах. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. — 351 с.
2. Мозговой Д. К. Підвищення інформативності супутникової зйомки малорозмірних об'єктів земної поверхні // Програма наук. конф. за підсумками науково-дослідної роботи ун-ту за 2012 рік. — Дніпропетровськ: ДНУ, 2012. — С. 92.
3. Мозговой Д., Волошин В. Фільтрація просторово-періодичних приладових завод на супутникових знімках // 36. праць Таврійської державної агротехнічної академії. — 2003. — 20, вип. 4.
4. Мозговой Д. К., Корчинський В. М., Кравець О. В. Використання вейвлетів в обробці супутникових знімків високого просторового розрізнення // Вісник ДНУ. Ракетно-космічна техніка. — 2009. — Вип. 13, т. 1, № 17/4. — С. 65—71.
5. Мозговой Д. К. Фільтрація приборних періодических помех // VIII Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос», 13–14 квітня 2006 р, Дніпропетровськ, Національний центр аерокосмічної освіти молоді України: 36. тез. — Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2006. — С. 397.
6. Мозговой Д. К. Применение комбинированных масок для фильтрации периодических помех // Прикладна геометрія та інженерна графіка. — К.: Укр. асоціація з прикладної геометрії, 2008. — С. 175—179.
7. Мозговой Д. К. Использование данных MODIS и ASTER для решения актуальных прикладных задач // Междунар. научно-практическая конф. «Стратегические решения информационного развития экономики, общества и бизнеса на современном этапе», 17–19 июля 2013 г., п. Научный, Крым. — Тезисы докладов. — С. 113—114.
8. Мозговой Д. К., Волошин В. И., Бушуев Е. И. Фільтрація радіометрических помех с пространственно-периодической структурой // Проблемы управления и информатики. — 2004. — № 3. — С. 97—106.
9. Мозговой Д. К., Кравець О. В. Класифікація малорозмерних об'єктів на спутникових снимках // Екологія та ноосферологія. — 2009. — 20, № 3-4. — С. 26—30.
10. Мозговой Д. К., Кравець О. В. Распознавание мало-размерных объектов с использованием библиотеки классов // Вісник ДНУ. Ракетно-космічна техніка. — 2009. — Вип. 13, т. 1, № 17/4. — С. 71—75.

11. *Отчеты* о приеме информации с космического аппарата «Океан-О» по радиолинии 8.2 ГГц. — Чернигов: ГНПП «Обрій», 1999...2001 гг.
12. Dolinets Y., Mozgovoy D. Specialists training in ERS // Advanced space technologies for the humankind prosperity: International Conf. — Dnepropetrovsk: Yuzhnoe State Design Office, 2007. — P. 123.
13. Mozgoviy D. K., Parshina O. I., Voloshin V. I., Bushuev Y. I. Remote sensing and GIS application for environmental monitoring and accidents control in Ukraine. Geographic uncertainty in environmental security / Ed. by A. Morris, S. Kokhan. — Dordrecht: Springer, Published with NATO Public Diplomacy Division, 2007. — P. 259—270.
14. Mozgovoy D. Method of programm's control of angle motion of remote sensing satellite during the shooting // Technologies: Present and Future. International Conference. — Dnepropetrovsk: Yuzhnoe State Design Office, 2013. — P. 158—159.
15. Mozgovoy D. K., Voloshin V. I., Bushuev E. I. Filtration of radiometric interference with a space-periodic structure // J. Automation and Inform. Sci. — 2004. — 36, N. 6. — P. 14—22.

Стаття надійшла до редакції 14.07.14

*О. Л. Макаров, Д. К. Мозговий, В. С. Хорошилов,
В. М. Балашов, Д. В. Маслей, В. М. Попель*

ЕФЕКТИВНА ФІЛЬТРАЦІЯ ПРОСТОРОВО-ПЕРІОДИЧНИХ ЗАВАД НА АРХІВНИХ ЗНІМКАХ

Розглядається ефективний метод корекції приладових просторово-періодичних завад на архівних супутникових знімках, отриманих за допомогою оптико-механічних сканерів. Показано істотні переваги фільтрації з використанням двовимірного перетворення Фур'є із застосуванням комбінованих масок у порівнянні з іншими методами.

*A. L. Makarov, D. K. Mozgovoy, V. S. Horoshilov,
V. N. Balashov, D. V. Maslyey, V. M. Popel'*

EFFICIENT FILTERING OF SPACE-PERIODIC DISTORTIONS ON ARCHIVE IMAGES

We consider an efficient method to correct instrument spatial-periodic distortion on the archive satellite images obtained with the optometrist-mechanical scanner. Some essential advantages of filtering with the use of the Furie two-dimensional transformation with combine masks are shown to take place as compared with other methods.