

DOI: 10.18698/1812-3368-2016-2-91-102

УДК 004.932.4:519.652

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕТОДОМ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СПЕКТРОВ

А.А. Гурченков¹, В.Г. Бочкарева², А.Б. Мурынин^{1,3}, А.Н. Трёкин^{2,3}

¹Федеральный исследовательский центр “Информатика и управление” РАН, Москва, Российская Федерация
e-mail: challenge2005@mail.ru

²МФТИ (государственный университет), Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация

³НИИ аэрокосмического мониторинга “Аэрокосмос”, Москва, Российская Федерация

Рассмотрены методы повышения качества изображения с использованием пространственных спектральных представлений. Описаны две постановки задачи. В первой постановке доступна информация о деталях высокого разрешения, задаваемая дополнительным опорным изображением. Изображение высокого разрешения получено комбинацией спектров основного и опорного изображений. Во второй постановке дополнительной информации нет. Изображение высокого разрешения синтезировано по аналитически продолженному спектру исходного. Представлены результаты работы рассмотренных методов.

Ключевые слова: качество изображения, спектральное преобразование, пространственный спектр.

IMAGE QUALITY IMPROVEMENT BY METHOD OF SPATIAL SPECTRUM EXTRAPOLATION

A.A. Gurchenkov¹, V.G. Bochkareva², A.B. Murynin^{1,3}, A.N. Trekin^{2,3}

¹The Institute of Informatics Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
e-mail: challenge2005@mail.ru

²Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudnyy, Moscow Region, Russian Federation

³Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring Aerocosmos, Moscow, Russian Federation

In this research we explore methods of image quality improvement using spatial spectral representation and describe two formulations of the problem. In the first one the information on high-resolution details is available from the additional reference image. High-resolution image is obtained by combining the spectra of the source and reference images. In the second formulation additional information is not available. High-resolution image is synthesized by analytic continuation of the source image spectrum. The findings of the research are given.

Keywords: image quality improvement, spectral transformation, spatial spectrum.

Введение. Важная задача обработки изображений — улучшение качества изображения, в том числе изменение его пространственного разрешения. В случае цифровых растровых изображений эта задача формулируется как изменение числа пикселей раstra, называемое также *передискретизацией*, или *интерполяцией* (upsampling). В основе алгебраического подхода к интерполяции лежит известная теорема Котельникова, согласно которой любой непрерывный сигнал $\tilde{I}(x)$ с финитным спектром (нулевым при частотах, больших некоторой частоты ω_0) может быть представлен в виде отсчетов дискретного сигнала с частотой дискретизации $\omega_d > 2\omega_0$. При этом такое преобразование взаимно однозначно, т.е. по дискретному сигналу $I(x_m)$ можно восстановить исходный сигнал $\tilde{I}(x)$ [1]:

$$\tilde{I}(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} I(x_m) \text{sinc}(\omega_d(x - x_m)), \quad (1)$$

где $\text{sinc}(x) \equiv \sin(\pi x)/(\pi x)$ — нормированный кардинальный синус; здесь и далее для непрерывного сигнала использовано обозначение \tilde{I} , а для его дискретного представления — обозначение I . Интерполяцию можно представить как восстановление непрерывного сигнала по дискретным отсчетам с последующей дискретизацией на новой частоте. Согласно (1), необходимо обработать бесконечное число отсчетов, поэтому на практике интерполяция осуществляется приближенно с помощью сумм с конечным числом слагаемых:

$$\tilde{I}(x) \approx \sum_{m=[x-w]}^{[x+w]} I(x_m) h(x - x_m), \quad (2)$$

где $h(x)$ — импульсная характеристика фильтра; $[x]$ — целая часть x ; w — *апертура* фильтра. Разработано большое число различных фильтров $h(x)$, в обработке изображений в основном используются такие полиномиальные методы, как методы ближайшего соседа, билинейный и бикубический методы, а также метод Ланцоша [2, 3]:

$$h(x) = \begin{cases} \text{sinc}(x) \text{sinc}(x/a), & x \in [-a; a] \setminus 0; \\ 1, & x = 0; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (3)$$

где $a = 1, 2, \dots$ — целое число, называемое *порядком* фильтра Ланцоша. Разработано несколько нелинейных моделей, существенно зависящих от области применения [4–8]. В прикладных задачах, например при обработке мультиспектральных данных дистанционного зондирования, может быть доступно не единственное исходное изображение, а несколько [9–11]. Типичная задача такого класса — создание изображения высокого разрешения по набору двух изображений, одно

из которых имеет низкое разрешение и должно быть увеличено (*исходное* изображение), а второе — представляет собой ту же сцену, зарегистрированную в высоком разрешении, но в ином спектральном диапазоне (*опорное* изображение), поэтому имеет ту же форму деталей, но другие значения интенсивностей. В некотором смысле необходимо совместить яркости исходного изображения и структуру опорного изображения. В настоящей работе эта задача решается методом пространственно-спектрального синтеза, описанным в работах [15, 16]. Особенность разработанного метода — предложенный способ продолжения спектра в область высоких частот, позволяющий модифицировать его для работы без опорного изображения.

Улучшение качества изображений с привлечением опорных изображений. В методе решается задача, аналогичная паншарпенингу — повышению разрешения мультиспектрального изображения с использованием панхроматического изображения более высокого разрешения. Как правило, паншарпенинг выполняется заменой цветового компонента, зачастую в пространстве IHS или аналогичном пространстве, также применяются вейвлет-преобразования и другие методы [17]. Предложенный подход основан на моделировании пространственного спектра изображения в области высоких частот. Для этого используется дополнительная информация, извлекаемая из опорного изображения высокого разрешения. Выполняется несколько этапов обработки (рис. 1, а).

Предобработка и приведение изображений. Передискретизация исходного изображения проводится методом Ланцоша (2), (3). Взаимная привязка необходима для устранения относительных пространственных сдвигов и заключается в установлении соответствия между точками двух изображений. Процедура приведения гистограммы одного изображения к гистограмме другого (или некоторой априорной) необходима для нормализации яркости и контраста изображений. Используемые методы описаны в работе [12].

Спектральное преобразование. Для вычисления спектра применяется *дискретное косинусное преобразование* (ДКП) следующего вида [13]:

$$A(u, v) = \frac{2}{\sqrt{MN}} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I(m, n) \cos \left[\frac{\pi}{M} \left(m + \frac{1}{2} \right) \left(u + \frac{1}{2} \right) \right] \times \\ \times \cos \left[\frac{\pi}{N} \left(n + \frac{1}{2} \right) \left(v + \frac{1}{2} \right) \right], \\ u = 0, \dots, M - 1, \quad v = 0, \dots, N - 1. \quad (4)$$

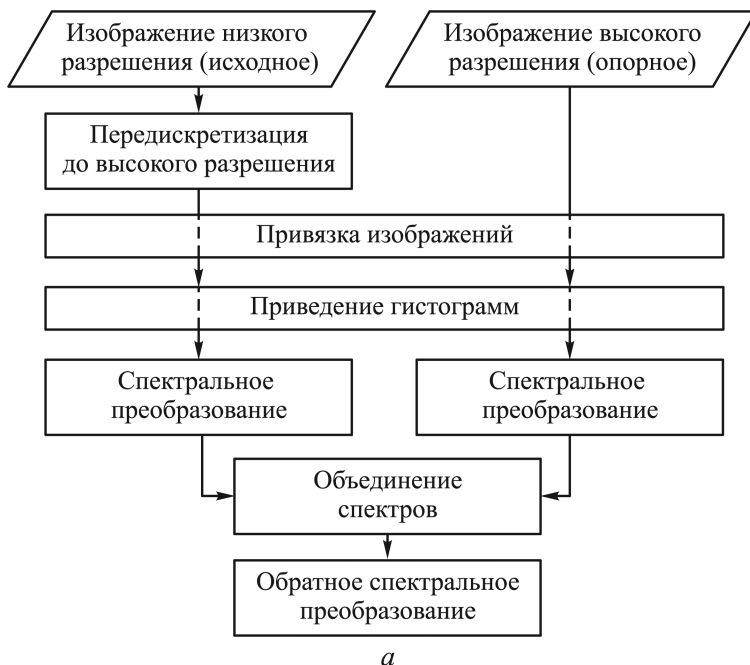


Рис. 1. Схемы методов пространственно-спектрального синтеза с привлечением опорного оптического изображения (а) и синтеза спектров с интерполяцией данных (б)

Изображение $I(m, n)$ и его спектр $A(u, v)$ представляют собой растры размером $M \times N$.

Объединение спектров. Далее происходит процедура слияния фурье-образов исходного и опорного изображений. На исходном изображении наиболее значимыми являются низкие частоты, с опорного изображения снимаются высокие частоты

$$A_{enh}(m, n) = G(m, n)A_{src}(m, n) + (1 - G(m, n)) A_{sup}(m, n), \quad (5)$$

где A_{src} — двумерный косинусный спектр исходного изображения; A_{sup} — двумерный косинусный спектр опорного изображения; $G(m, n)$ — весовая функция, близкая к единице в области малых значений m, n и уменьшающаяся в области высоких значений, например, гауссиан. К синтезированному спектру A_{enh} впоследствии применяется обратное косинусное преобразование, совпадающее с прямым преобразованием (4), которое и дает изображение повышенного разрешения.

Улучшение качества изображений без привлечения опорного изображения. Опишем метод улучшения качества изображений без применения опорного изображения, получаемого с реального датчика. В методе использовано двумерное дискретное спектральное преобразование Фурье

$$F(u, v) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I(m, n) \exp \left[-2\pi i \left(\frac{mu}{M} + \frac{nv}{N} \right) \right], \quad (6)$$

с амплитудным спектром

$$A(u, v) = |F(u, v)| \equiv \left[\text{Re}^2(F(u, v)) + \text{Im}^2(F(u, v)) \right]^{1/2} \quad (7)$$

и фазовым спектром

$$\Phi(u, v) = \text{Arg}(F(u, v)) \equiv \text{arctg} \frac{\text{Im}(F(u, v))}{\text{Re}(F(u, v))}. \quad (8)$$

Амплитудный спектр (7) изображения убывает по экспоненциальному закону, при представлении изображения фурье-образом большее значение для сохранения деталей и текстуры имеют компоненты фазового спектра, а компоненты амплитуды допустимо изменять [9]. Следовательно, при экспоненциальной экстраполяции значений амплитуд низких частот на высокие частоты можно получить моделированный амплитудный спектр искомого улучшенного изображения. Фазовый спектр моделированного изображения извлекается с искусственно синтезируемого вспомогательного изображения I_{help} . Оно получается в результате применения одного из методов повышения пространственного разрешения к исходному изображению. Процедура улучшения разрешения разделена на несколько этапов (рис. 1, б).

Для получения вспомогательного изображения применялся фильтр Ланцоша. Продолжение амплитудного спектра, т.е. его экстраполяция в область высоких частот, осуществляется с помощью разрезов спектра. *Разрезом* $s(k)$ амплитудного спектра $A(m, n)$, $m, n \in [0; N-1]$, построенным для угла α , назовем последовательность чисел $s(0), \dots, s(N-1)$, $s(k) = \tilde{A}(k \cos \alpha, k \sin \alpha)$. Значения разреза в точках с нецелыми координатами вычисляются интерполяцией (2). Строится набор разрезов для углов $\alpha \in [0; \pi)$, в силу симметрии амплитудного спектра значения разреза при $\alpha \in [\pi; 2\pi)$ не рассчитываются. Число разрезов S задается равным разрешению результирующего изображения. Таким образом, период углов, с которым получают разрезы матрицы амплитудного спектра, равен $\Delta\alpha \approx \arctg(1/(qN))$, где q – коэффициент масштабирования; N – размер исходного изображения. Каждый разрез, состоящий из N чисел, пополняется до числа pN путем экстраполяции. Для экстраполяции применяется не весь разрез, а только некоторая его часть при значениях k от N_0 до N (рис. 2). Зависимость амплитудного спектра пространственных волн от волнового числа k может быть описана степенной функцией с показателем степени p . С учетом этого все разрезы линейризуются путем логарифмирования. Получается линейная зависимость с некоторым углом наклона $\text{tg } p$, которая продолжается в область высоких частот. Затем проводится экспоненцирование и получается набор из разрезов, имеющих продолжение в область высоких частот. На следующем этапе совершается обратный переход от набора разрезов к амплитудному спектру изображения. Для этого так же, как и на этапе построения разрезов, вычисляются значения в точках дискретного

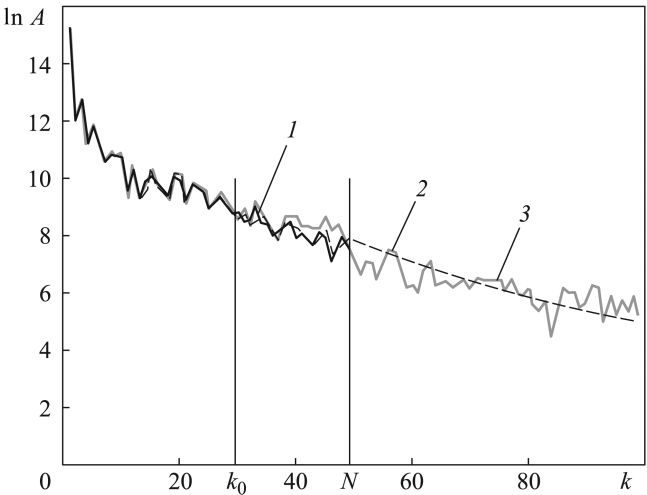


Рис. 2. Зависимость амплитудного спектра пространственных волн от волнового числа для исходного (1), эталонного (2) и продолженного (3) спектров

спектра изображения. На последнем этапе подготовленные отдельно амплитудный и фазовый спектры объединяются в фурье-образ, к которому применяется обратное фурье-преобразование.

Вычислительные эксперименты. Такие эксперименты были проведены на реальных космических изображениях, прошедших стандартную процедуру предварительной обработки, которая включает в себя атмосферную и радиометрическую коррекцию, специальные методы подавления шумов и улучшения качества изображения не использовались. Проверка подходов осуществлялась следующим образом. *Эталонное* изображение высокого разрешения T передискретизовывалось в исходное изображение низкого разрешения I . Этим моделировалось изображение низкого разрешения при известном лучшем. В качестве опорного изображения принималось изображение высокого разрешения с другого датчика (панхроматическое). Затем к изображению I применялись методы повышения разрешения для получения исходного изображения высокого разрешения J . Качество результатов методов проверялось при сравнении изображений T и J различными метриками.

1. Среднеквадратичное отклонение (Mean Square Error, MSE):

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |T(m, n) - J(m, n)|^2. \quad (9)$$

2. Максимальное отношение сигнал-шум (Peak Signal-to-noise Ratio, PSNR), приемлемыми принимаются значения, близкие к 30:

$$PSNR = 20 \lg \left(\frac{\max T(m, n)}{\sqrt{MSE}} \right). \quad (10)$$

3. Индекс структурного сходства (Structural Similarity, SSIM), принимаются значения 0 (несовпадение) ... 1 (полное совпадение):

$$SSIM = \frac{(2\mu_I\mu_K + c_1)(2\sigma_{IK} + c_2)}{(\mu_I^2 + \mu_K^2 + c_1)(\sigma_I^2 + \sigma_K^2 + c_2)}, \quad (11)$$

где μ_I, μ_K — средние значения I и K ; σ_I^2, σ_K^2 — дисперсии; σ_{IK} — ковариация I и K ; $c_1 = (k_1L)^2, c_2 = (k_2L)^2, L = 2^p - 1$ — динамический диапазон пикселей; p — число бит на пиксель, $k_1 = 0,01, k_2 = 0,03$.

Метрики MSE и $PSNR$ — классические характеристики общего отклонения результата от эталона, а метрика $SSIM$ выбрана, поскольку хорошо коррелирует с экспертной оценкой схожести изображений. Ее чувствительность к сдвигу, повороту и масштабированию, полагающаяся недостатком, не проявляется в рассматриваемой постановке задачи [14].

Для тестирования метода улучшения качества изображения без использования опорного изображения при различных масштабах были применены изображения различных сцен:

- космический снимок городской застройки “Город1”;
- космический снимок леса “Лес1”;
- авиационный снимок городской застройки “Город2”;
- авиационный снимок леса “Лес2”.

Результаты сравнения работы методов приведены в таблице.

Результаты сравнения работы методов

| Сцена | Фильтр Ланцоша | | | Метод пространственно-спектрального синтеза с привлечением опорного оптического изображения | | | Метод синтеза спектров с интерполяцией данных | | |
|----------|----------------|-------------|-------------|---|-------------|-------------|---|-------------|-------------|
| | <i>MSE</i> | <i>PSNR</i> | <i>SSIM</i> | <i>MSE</i> | <i>PSNR</i> | <i>SSIM</i> | <i>MSE</i> | <i>PSNR</i> | <i>SSIM</i> |
| “Город1” | 15,71 | 26,17 | 0,747 | 12,81 | 37,38 | 0,989 | 14,01 | 26,67 | 0,779 |
| “Лес1” | 6,72 | 29,86 | 0,670 | 6,90 | 39,89 | 0,985 | 6,56 | 29,96 | 0,697 |
| “Город2” | 10,30 | 38,00 | 0,971 | 4,80 | 38,32 | 0,998 | 10,02 | 41,32 | 0,986 |
| “Лес2” | 4,59 | 41,51 | 0,987 | 3,32 | 39,66 | 0,991 | 7,67 | 42,92 | 0,987 |

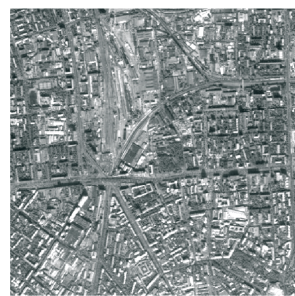
Результаты, полученные методом улучшения качества изображения с привлечением опорного изображения, оказываются значительно лучше результатов, получаемых при повышении разрешения без опорного изображения. Визуальный анализ изображений повышенного разрешения показывает, что основными артефактами повышения разрешения в случае метода улучшения качества изображения с привлечением опорного изображения являются размытие (в большей степени) и ступенчатость (в меньшей), эффект Гиббса не наблюдается. Для метода улучшения качества изображения с привлечением опорного изображения опорных изображений значение оценки *SSIM* оказывается стабильно лучше оценки, определяемой при применении фильтра Ланцоша. Метод улучшения качества изображения с привлечением опорного изображения показывает сравнимо хорошие результаты не только при повышении разрешения в 2 раза, но и при повышении разрешения в 16 раз, что позволяет утверждать о его хорошей применимости. Тем не менее значение среднеквадратичной ошибки и индекса структурного сходства для сцены “Лес2”, полученных методом улучшения качества изображения с привлечением опорного изображения, означают следующее: при использовании входных изображений низкого разрешения для указанного метода отсутствует источник “хороших” данных, которые могут быть использованы для совмещения с “плохими”. Результаты работы методов с привлечением и без привлечения опорного изображения для сцены “Город1” приведены на рис. 3.



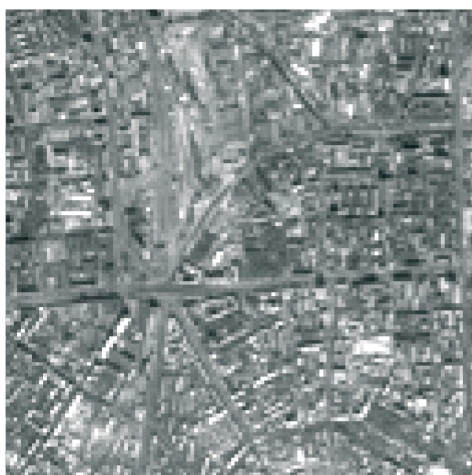
a



б



в



г



д

Рис. 3. Результаты методов улучшения качества изображения с привлечением опорного изображения (*a–в*) и без опорного изображения (*г, д*) для сцены “Город1”:

a — мультиспектральное изображение; *б* — панхроматическое опорное изображение; *в* — результирующее изображение; *г* — исходное изображение; *д* — изображение повышенного разрешения

Заключение. Описаны два метода повышения качества изображения: использующий одно входное изображение низкого разрешения, основанный на экстраполяции спектров, и использующий опорное изображение высокого разрешения, основанный на объединении спектров. Методы протестированы на различных реальных входных

данных, при увеличении в разное число раз, на изображениях разного разрешения. Полученные результаты могут быть применены в дальнейшем для повышения разрешения не только изображений со спутника, но и на обычных изображениях. Задача повышения разрешения RGB-изображения на основе панхроматического, возникает, например, при необходимости создания карт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биккенин Р.Р., Чесноков М.Н. Теория электрической связи. М.: Академия, 2010. 329 с.
2. Getreuer P. Linear Methods for Image Interpolation // Image Processing On Line. 2011.
3. Turkowski K., Gabriel S. Filters for Common Resampling Tasks. Boston: Graphics Gems I. Academic Press, 1990. P. 147–165.
4. Tsurkov V.I. An analytical model of edge protection under noise suppression by anisotropic diffusion // J. Computer and Systems Sciences International. 2000. Vol. 39. No. 3. P. 437–440.
5. Цурков В.И., Ковков Д.В. Способ удаления шума в изображении. Пат. RUS 2316816 25.08.2005.
6. Mironov A.A., Tsurkov V.I. Approximation and decomposition by extremal graphs // Zh. Vychisl. Mat. Mat. Fiz. 1993. Vol. 33. No. 2. С. 283–298.
7. Mironov A.A., Tsurkov V.I. Network models with fixed parameters at the communication nodes. II // J. Computer and Systems Sciences International. 1994. Vol. 32. No. 6. P. 1–11.
8. Миронов А.А., Цурков В.И. Транспортные и сетевые задачи с минимаксным критерием // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1995. Т. 35. № 1. С. 24–45.
9. Бондур В.Г. Моделирование двумерных случайных полей яркости на входе аэрокосмической аппаратуры методом фазового спектра // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 5. С. 28–44.
10. Zomet A., Peleg S. Multi-sensor super-resolution // Proc. 6th IEEE Workshop Applications of Computer Vision. 2002. P. 27–31.
11. Матвеев И.А., Мурынин А.Б. Принципы построения системы стереоскопического зрения для управления движением робота // Известия РАН. Теория и системы управления. 2003. № 3. С. 184–192.
12. Матвеев И.А., Мурынин А.Б. Идентификация объектов по стереоизображениям. Оптимизация алгоритмов восстановления поверхности // Известия РАН. Теория и системы управления. 1998. № 3. С. 149–155.
13. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. М.: Физматлит, 2003.
14. Gao Y, Rehman A., Wang Z. CW-SSIM Based image classification // 18th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2011. IEEE. 2011. P. 1249–1252.
15. Greenspan H., Anderson C.H., Akber S. Image enhancement by nonlinear extrapolation in frequency space // IEEE Transactions on Image Processing. 2000. Vol. 9. No. 6. P. 1035–1048.
16. Хонина С.Н., Баранов В.Г., Котляр В.В. Спектральный метод увеличения фрагментов цифровых изображений // Компьютерная оптика. 1999. Т. 19. С. 165–173.
17. Comparison of pansharpening algorithms: Outcome of the 2006 GRS-S data-fusion contest / L. Alparone et al. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2007. Vol. 45. No. 10. P. 3012–3021.

REFERENCES

- [1] Bikkenin R.R., Chesnokov M.N. Teoriya elektricheskoy svyazi [Theory of Electrical Communication]. Moscow, Akademiya Publ., 2010. 329 p.
- [2] Getreuer P. Linear Methods for Image Interpolation. *Image Processing On Line*, 2011.
- [3] Turkowski K., Gabriel S. Filters for Common Resampling Tasks. Boston, Graphics Gems I. Academic Press, 1990, pp. 147–165.
- [4] Tsurkov V.I. An analytical model of edge protection under noise suppression by anisotropic diffusion. *J. Computer and Systems Sciences International*, 2000, vol. 39, no. 3, pp. 437–440.
- [5] Tsurkov V.I., Kovkov D.V. Sposob udaleniya shuma v izobrazhenii [Method of Removing Noise in the Image]. Patent RF no. RUS 2316816, 25.08.2005.
- [6] Mironov A.A., Tsurkov V.I. Approximation and decomposition by extremal graphs. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1993, vol. 33, no. 2, pp. 251–262.
- [7] Mironov A.A., Tsurkov V.I. Network models with fixed parameters at the communication nodes. II. *J. Computer and Systems Sciences International*, 1994, vol. 32, no. 6, pp. 1–11.
- [8] Mironov A.A., Tsurkov V.I. Transport and network problems with the minimax criterion. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1995, vol. 35, no. 1, pp. 15–30.
- [9] Bondur V.G. Phase-Spectral Method's Modeling of Two-Dimension Stochastic Brightness Field, Formed at the Airspace Apparatus Entrance. *Issled. Zemli iz kosmosa* [Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics Earth Observation and Remote Sensing], 2000, no. 5, pp. 28–44 (in Russ.).
- [10] Zomet A., Peleg S. Multi-sensor super-resolution. *Proc. 6th IEEE Workshop Applications of Computer Vision*, 2002, pp. 27–31.
- [11] Matveev I.A., Muryinin A.B. Principles of Development of a Stereovision System for Motion Control of a Robot. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2003, vol. 42, no. 3, p. 490.
- [12] Matveev I.A., Muryinin A.B. Identification of Objects on the Basis of Stereo Images: Optimization of Algorithms for Reconstruction of a Surface. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 1998, vol. 37, no. 3, p. 487.
- [13] Soyfer V.A., ed. Metody komp'yuternoy obrabotki izobrazheniy [Methods of Computer Image Processing]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003.
- [14] Gao Y., Rehman A., Wang Z. CW-SSIM Based image classification. *18th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. 2011. IEEE, 2011, pp. 1249–1252.
- [15] Greenspan H., Anderson C.H., Akber S. Image enhancement by nonlinear extrapolation in frequency space. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, vol. 9, no. 6, pp. 1035–1048.
- [16] Khonina S.N., Baranov V.G., Kotlyar V.V. Spectral Method for the Digital Image Fragment Increasing. *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 1999, vol. 19, pp. 165–173 (in Russ.).
- [17] Alparone L. et al. Comparison of pansharpening algorithms: Outcome of the 2006 GRS-S data-fusion contest. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, vol. 45, no. 10, pp. 3012–3021.

Статья поступила в редакцию 02.07.2015

Гурченков Анатолий Андреевич — сотрудник Федерального исследовательского центра “Информатика и управление” РАН (Российская Федерация, 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 40).

Gurchenkov A.A. — officer of the Institute of Informatics Problems, Russian Academy of Sciences (Vavilova ul. 40, Moscow, 119333 Russian Federation).

Бочкарева Валерия Георгиевна — аспирантка МФТИ (государственного университета) (Российская Федерация, 141700, Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер., д. 9).

Bochkareva V.G. — post-graduate student of Moscow Institute of Physics and Technology (State University) (Institutskiy pereulok 9, Dolgoprudnyy, Moscow Region, 141700 Russian Federation).

Мурынин Александр Борисович — сотрудник Федерального исследовательского центра “Информатика и управление” РАН (Российская Федерация, 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 40), НИИ аэрокосмического мониторинга “Аэрокосмос” (Российская Федерация, 105064, Москва, Гороховский пер., д. 4).

Murynin A.B. — officer of the Institute of Informatics Problems, Russian Academy of Sciences (Vavilova ul. 40, Moscow, 119333 Russian Federation), Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring Aerocosmos (Gorokhovskiy pereulok 4, Moscow, 105064 Russian Federation).

Трёкин Алексей Николаевич — аспирант МФТИ (государственного университета) (Российская Федерация, 141700, Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер., д. 9), НИИ аэрокосмического мониторинга “Аэрокосмос” (Российская Федерация, 105064, Москва, Гороховский пер., д. 4).

Trekin A.N. — post-graduate student of Moscow Institute of Physics and Technology (State University) (Institutskiy pereulok 9, Dolgoprudnyy, Moscow Region, 141700 Russian Federation), Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring Aerocosmos (Gorokhovskiy pereulok 4, Moscow, 105064 Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гурченков А.А., Бочкарева В.Г., Мурынин А.Б., Трёкин А.Н. Улучшение качества изображений методом экстраполяции пространственных спектров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2016. № 2. С. 91–102.
DOI: 10.18698/1812-3368-2016-2-91-102

Please cite this article in English as:

Gurchenkov A.A., Bochkareva V.G., Murynin A.B., Trekin A.N. Image quality improvement by method of spatial spectrum extrapolation. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2016, no. 2, pp. 91–102. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-2-91-102