

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ НАБЛЮДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ГИС В УСЛОВИЯХ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАССОГЛАСОВАНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

А.Ю. Денисова, В.В. Сергеев

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва (национально исследовательский университет), Самара, Россия,  
Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия

Статья посвящена исследованию качества работы спектрально-энергетического метода идентификации линейной модели наблюдения с использованием данных геоинформационных систем в зависимости от двух факторов, характеризующих пространственное согласование исходных данных: точность географической привязки наблюдаемого изображения и точность соответствия границ объектов векторной карты границам объектов на снимке. В предыдущих работах авторов описан спектрально-энергетический метод идентификации с использованием векторной карты в качестве источника априорной информации. При этом предполагалось, что изображение и карта геометрически точно согласованы друг с другом. В настоящей работе исследуется вопрос качества работы метода идентификации импульсной характеристики при наличии сдвига наблюдаемого изображения относительно карты и в условиях присутствия искажений границ объектов карты.

**Ключевые слова:** идентификация линейной модели наблюдения, импульсная характеристика, спектрально-энергетический метод, геоинформационные системы, географическая привязка.

## Введение

Процесс формирования изображений в системах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) традиционно описывается с помощью линейной модели наблюдений [1]. Для различных приложений, например, для коррекции искажений, важно иметь возможность оценивать параметры модели наблюдения по наблюдаемому изображению. Классические решения задачи идентификации импульсной характеристики (ИХ) линейной искажающей системы [2-4], либо представляют собой одномерные методы, либо имеют высокую вычислительную сложность, что существенно затрудняет их применение для оценки модели наблюдения по изображениям ДЗЗ.

В работах [5-6] авторами описан подход к идентификации ИХ на основе энергетического спектра (ЭС) наблюдаемого изображения и конструируемой оценки ЭС ненаблюдаемого неискаженного изображения. Метод позволяет выполнить идентификацию двумерной симметричной неотрицательной ИХ.

Широкое распространение геоинформационных систем (ГИС) и картографических сервисов открывает возможности для совместной обработки накопленных в векторном формате картографических данных и изображений ДЗЗ. Авторами в работе [7] была предложена модификация спектрально-энергетического метода идентификации ИХ с использованием данных ГИС. Метод был рассмотрен для случая точного геометрического согласования наблюдаемого изображения и векторной карты. Однако на практике условие идеальной привязки снимка к карте может не выполняться. Кроме того возможно присутствие изменений на изображении, которые еще не были отражены в векторных дан-

ных, т.е. границы объектов растровой маски не полностью соответствуют рассматриваемому наблюдаемому изображению.

В настоящей работе описываются результаты экспериментальных исследований влияния описанных выше пространственных рассогласований исходных растровых и векторных данных на результат идентификации ИХ.

## 1. Спектрально-энергетический метод идентификации ИХ с использованием данных ГИС

Пусть наблюдаемое дискретное изображение  $y_o(n_1, n_2)$  имеет шаг дискретизации  $T$  и размер  $N \times N$ , т.е.  $n_1, n_2 = \overline{0, N-1}$ , а неизвестному исходному изображению соответствует квазинепрерывное, т.е. дискретизованное с некоторым мелким шагом  $T_1 < T$ , изображение  $x(m_1, m_2)$ ,  $m_1, m_2 = \overline{0, M-1}$ .

Далее для простоты изложения будем полагать, что  $M$  и  $N$  – чётные, и обозначим отношение шагов дискретизации квазинепрерывного и наблюдаемого изображений как  $\gamma = T/T_1$

При наличии известной оценки дисперсии шума  $\hat{D}_v$  вычисление оценки неизвестной ИХ  $h(k_1, k_2)$ ,  $k_1, k_2 = \overline{-K, K}$ , где  $2K+1 \ll M$  с использованием данных ГИС кратко может быть описано следующим образом:

1. Сформировать растровую маску  $D(m_1, m_2)$ ,  $m_1, m_2 = \overline{0, M-1}$  областей по векторной карте с шагом дискретизации  $T_1$ . Каждой области  $D_i$  на маске соответствуют пиксели со значением  $i$ ,  $i = \overline{1, I}$ , где  $I$  – количество объектов на изображении.
2. Интерполировать наблюдаемое изображение  $y_o(n_1, n_2)$  с шагом  $1/\gamma$  до размера  $M \times M$ . Полученное квазинепрерывное изображение обозначим –  $y_{in}(m_1, m_2)$ ,  $m_1, m_2 = \overline{0, M-1}$ .
3. Построить квазинепрерывное кусочно-постоянное изображение с чёткими границами  $\hat{x}(m_1, m_2)$ ,  $m_1, m_2 = \overline{0, \dots, M-1}$  путём усреднения значений в каждой области маски:

$$\begin{aligned} \hat{x}(m_1, m_2) &= y_i, \quad m_1, m_2 \in D_i, \quad i = \overline{1, I}, \\ y_i &= \frac{1}{|D_i|} \sum_{m_1, m_2 \in D_i} y_{in}(m_1, m_2), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $|D_i|$  – количество отсчётов изображения, соответствующих  $i$ -ой области маски.

4. Оценить ЭС  $\Phi_X(l_1, l_2)$ ,  $l_1, l_2 = \overline{-\frac{M}{2}, \dots, \frac{M}{2}-1}$  по изображению  $\hat{x}(m_1, m_2)$ ,  $m_1, m_2 = \overline{0, \dots, M-1}$  с использованием ДПФ длины  $M$ , отсчёты с индексами  $l_1, l_2 = \overline{-\frac{M}{2}, \dots, \frac{M}{2}-1}$  соответствуют частотам  $\Omega_1 = \frac{2\pi l_1}{M}, \Omega_2 = \frac{2\pi l_2}{M}$ .

5. Оценить ЭС  $\Phi_Y^{(D)}(p_1, p_2)$ ,  $p_1, p_2 = -\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2}-1$  по наблюдаемому изображению  $y_\theta(n_1, n_2)$ ,  $n_1, n_2 = \overline{0, \dots, N-1}$  с использованием ДПФ длины  $N$ . Отсчёты с индексами  $p_1, p_2 = -\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2}-1$  соответствуют частотам  $\Omega_1 = \frac{2\pi p_1}{N}$ ,  $\Omega_2 = \frac{2\pi p_2}{N}$ .

6. Оценить ЭС  $\Phi_Y(l_1, l_2)$  путём дополнения нулями ЭС  $\Phi_Y^{(D)}(p_1, p_2)$  по формуле:

$$\Phi_Y(l_1, l_2) = \begin{cases} \gamma^2 \Phi_Y^{(D)}(l_1, l_2) - D_V, & \text{при } -\frac{N}{2} \leq l_1 < \frac{N}{2} \text{ и } -\frac{N}{2} \leq l_2 < \frac{N}{2}; \\ 0, & \\ \text{при } -\frac{M}{2} \leq l_1 < -\frac{N}{2} \text{ и } -\frac{M}{2} \leq l_2 < \frac{M}{2}, & \\ \quad \frac{N}{2} \leq l_1 < \frac{M}{2} \text{ и } -\frac{M}{2} \leq l_2 < \frac{M}{2}, & \\ \quad -\frac{N}{2} \leq l_1 < \frac{N}{2} \text{ и } -\frac{M}{2} \leq l_2 < -\frac{N}{2}, & \\ \quad -\frac{N}{2} \leq l_1 < \frac{N}{2} \text{ и } \frac{N}{2} \leq l_2 < \frac{M}{2}. & \end{cases} \quad (2)$$

7. Получить оценку ЧХ  $\hat{H}(l_1, l_2)$ ,  $l_1, l_2 = -\frac{M}{2}, \dots, \frac{M}{2}-1$  по формуле:

$$\hat{H}(l_1, l_2) = \sqrt{\frac{\Phi_Y(l_1, l_2)}{\Phi_X(l_1, l_2)}}. \quad (3)$$

8. Найти ИХ  $\hat{h}(k_1, k_2)$  с использованием обратного ДПФ длины  $M$ . Избыточные отсчёты с  $|k_1|, |k_2| \geq K$  полагаются равными нулю.

Оценки ЭС на шаге 4 и 5 могут быть получены с помощью известных в цифровом спектральном анализе методов. Более подробное описание метода можно найти в [7].

## 2. Экспериментальное исследование

### Постановка эксперимента.

Процедура исходных данных для экспериментов включала следующие этапы:

1. Формирование идеального квазинепрерывного изображения и соответствующей ему маски областей с шагом дискретизации  $T_1$  и размером  $M \times M$  точек. Коэффициент корреляции между соседними пикселями идеального квазинепрерывного изображения обозначим  $\rho$ .
2. Искажение изображения: его свёртка с ИХ, сформированной с шагом дискретизации  $T_1$ . Далее эта ИХ использовалась в качестве эталона для сравнения с восстановленными ИХ.
3. Дискретизация искажённого квазинепрерывного изображения в  $\gamma = 8$  раз. Полученное изображение имело размер  $N \times N$  пикселей, шаг дискретизации  $T$  и интерпретировалось как *наблюдаемое изображение* с точными геометрическими параметрами.

4. Внесение, соответствующих цели эксперимента, геометрических искажений в наблюдаемое изображение или маску областей.

Во всех экспериментах шаги дискретизации изображений, а также вид идеальной ИХ определялись типом моделируемой съемочной системы. В данной работе приведены результаты моделирования для:

1) датчика MODIS (Terra\Aqua) [1] с параметрами дискретизации  $T_1 = 31,25$  м,  $T = 250$  м и ИХ вида:

$$h_M(m_1, m_2) = h_1(m_1, m_2) ** h_2(m_1, m_2) ** h_3(m_1, m_2),$$

2) датчик ETM+ (Landsat-7) [1] с параметрами дискретизации  $T_1 = 3,75$  м,  $T = 30$  м и ИХ вида:

$$h_L(m_1, m_2) = h_1(m_1, m_2) ** h_2(m_1, m_2),$$

где  $**$  – операция свёртки,  $h_1(k_1, k_2) = A \exp\{-0.5(k_1^2 + k_2^2)/\sigma^2\}$  моделирует размытие изображения вследствие расфокусировки;  $h_2(k_1, k_2) = \text{rect}(k_1/w) \cdot \text{rect}(k_2/w)$  отражает усреднение по апертуре детекторного элемента;  $h_3(k_1, k_2) = \text{rect}(k_1/s)$  соответствует смазу в процессе съёмки,  $k_1, k_2 = \overline{-K, K}$ . В первом случае параметры ИХ имели значения  $\sigma = 123,5$  м [10],  $w = s = 250$  м [1] и  $K = 20$ , во втором –  $\sigma \approx 30$  м,  $w = 30$  м [9],  $K = 30$ .

Оценка качества восстановления ИХ производилась по среднеквадратичной ошибке, нормированной на центральный максимальный отсчёт эталонной ИХ:

$$\varepsilon = \frac{1}{(2K+1)h(0,0)} \sqrt{\sum_{k_1, k_2 = -K}^K (h(k_1, k_2) - \hat{h}(k_1, k_2))^2}, \quad (4)$$

где  $h(k_1, k_2)$  – эталонная импульсная характеристика,  $\hat{h}(k_1, k_2)$  – полученная оценка ИХ. Величина (4) может интерпретироваться как относительная ошибка восстановления ИХ.

Экспериментальные исследования были произведены в условиях отсутствия шума.

*Исследование качества восстановления ИХ в зависимости от точности геометрического согласования растровых и векторных данных*

Зависимость качества работы метода от точности привязки *наблюдаемого изображения* производилось на наборе модельных мозаичных изображений, полученных в результате описанной выше процедуры с параметрами  $M = 4096$ ,  $\rho = 0,99$ ,  $N = 512$ . Пример наблюдаемого изображения приведён на рис. 1.

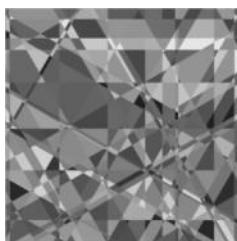
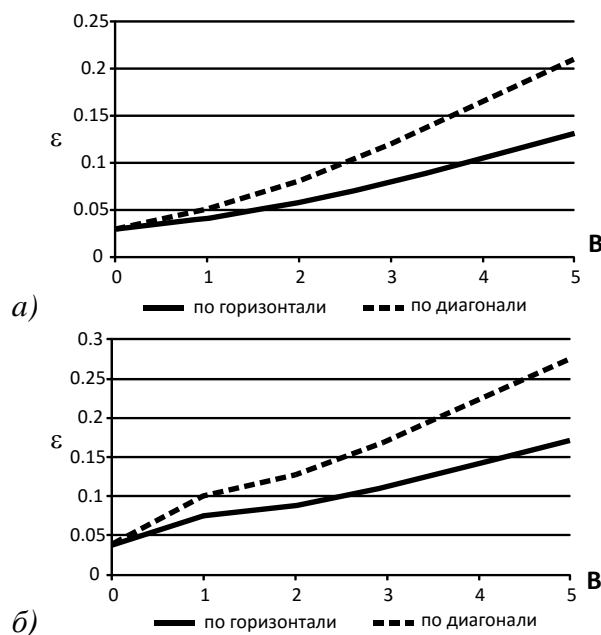


Рис. 1. Пример тестового мозаичного изображения

На шаге 4 *наблюдаемое изображение* сдвигалось по горизонтали (диагонали) относительно начального точного положения. Величина сдвига составляла  $B=1,\dots,5$  пикселей *наблюдаемого изображения*. Результаты эксперимента приведены на рис. 2.



**Рис. 2.** Ошибка восстановления ИХ, моделирующей датчик: а) MODIS, б) ETM+, – в зависимости от величины сдвига наблюдаемого изображения на  $B$  пикселей относительно точного положения

Из графиков видно, что погрешность восстановления ИХ в среднем не превосходит 10% для ИХ, моделирующей действие датчика MODIS, при сдвиге наблюдаемого изображения на 2-3 пикселя. Следует отметить, что такая точность привязки соответствует требованиям большинства методов обработки данных ДЗЗ и может быть обеспечена стандартными средствами.

Для ИХ, моделирующей датчик ETM+, сдвиг привязки является существенной проблемой и не позволяет восстановить ИХ с необходимой точностью. Причина заключается в том, что во втором случае ИХ является более широкой и имеет более выраженные сглаживающие свойства.

#### *Исследование качества восстановления ИХ в зависимости от точности используемых векторных границ*

Для оценки качества восстановления ИХ в случае неточной векторной карты был проведён эксперимент, в котором идеальные квазинепрерывные изображения формировались путём усреднения каналов космического снимка Landsat-7 в границах векторной карты сельскохозяйственных полей за соответствующий снимку посевной год. Идеальная маска областей являлась результатом растеризации использованной для формирования *квазинепрерывного изображения* векторной карты с шагом дискретизации, определяемым параметрами моделируемого датчика. Изображения, использованные в эксперименте, имели следующие параметры  $M = 2048$ ,  $\rho = 0,95$ ,  $N = 256$ .

«Искажённые» векторные границы представляли собой результат частичного замещения границ объектов-полей идеальной векторной карты границами тех же объектов за предыдущий посевной сезон.

В качестве количественной характеристики несоответствия используемых масок областей применялась величина отношения  $\Delta S = \tilde{S}/S$  площади  $\tilde{S}$  расхождений идеальной и искажённой маски границ к общей площади  $S$  границ областей на идеальной маске. Величины  $S$  и  $\tilde{S}$  выражаются в пикселях квазинепрерывного изображения.

Пример наблюдаемого изображения и бинарного изображения областей несоответствия векторных границ для одной из «искажённых» масок представлены на рис. 3. Величина  $\Delta S$  для представленного на рис. 3 примера составляет 0,025.

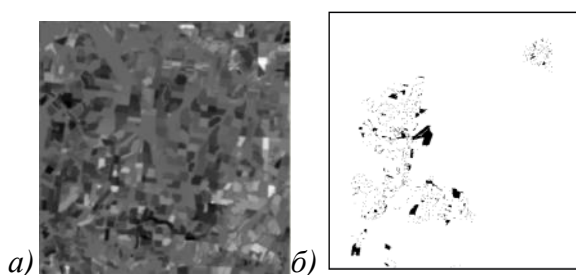


Рис. 3. Примеры а) наблюдаемого изображения и б) бинарного изображения областей несоответствия границ (черный цвет)

Полученная зависимость ошибки восстановления ИХ от величины  $\Delta S$  представлена на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что незначительные изменения площади объектов до 2% их общей площади практически не оказывают влияния на результаты восстановления ИХ.

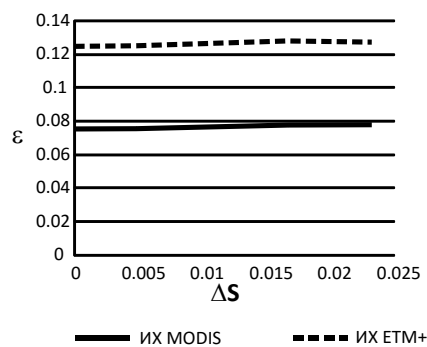


Рис.4. Ошибка восстановления ИХ в зависимости от площади несоответствия границ областей маски

Однако, ошибка восстановления ИХ на изображении с реалистичными границами объектов существенно выше, чем для мозаичных изображений. Влияние геометрии границ областей на качество работы метода является вопросом дальнейших исследований.

## Заключение

Представленные в статье экспериментальные исследования показывают, что спектрально-энергетический метод идентификации ИХ с использованием данных ГИС может применяться в условиях неточной привязки наблюдаемого дискретного изображения. В ре-

зультате моделирования искажений ИХ датчика MODIS допустимая погрешность привязки была определена как 2-3 пикселя наблюдаемого цифрового изображения. Эксперименты также показали, что при восстановлении ИХ допустимо расхождение границ векторной карты с идеальными границами не более чем на 2% от общей площади границ.

Дальнейшая работа предполагает исследование влияния геометрии границ областей карты на результаты идентификации ИХ и разработку модификации метода восстановления ИХ устойчивого к геометрическим рассогласованиям исходных растровых и векторных данных.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 16-37-00043\_мол\_а «Разработка методов использования данных геоинформационных систем для обработки данных дистанционного зондирования Земли».

## Литература

1. Шовенгердт, Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений/ Р. А. Шовенгердт – М.: Техносфера, 2010.–560 с.
2. Фурсов, В. А. Восстановление изображений КИХ-фильтрами, построенными путем непосредственной идентификации инверсного тракта/ В. А. Фурсов //Компьютерная оптика. – 1996. – №. 16. – С.103-108.
3. Горячкин, О. В. Слепая идентификация информационного канала по многообразиям заданной корреляции, порожденным случайными полиномами/ О.В. Горячкин, Е.И. Эрина//Успехи современной радиоэлектроники. – 2008. – №. 8. – С. 70-77.
4. Баврина, А. Ю. Метод параметрического оценивания оптико-электронного тракта системы дистанционного формирования оптического изображения/ А.Ю. Баврина, В.В. Мясников, А.В. Сергеев // Компьютерная оптика. – 2011. – Т.35. – №. 4. – С. 500-507.
5. Sergeyev, V.V. Spectral-Energy Identification Method of the Linear Observation Model for Remote Sensing of the Earth / V.V. Sergeyev, A.Yu. Denisova, // Pattern Recognition and Image Analysis, 2011, Vol.21, No.2, pp. 321-323.
6. Sergeyev, V.V. Spectral energy identification method of the linear observation model in the absence of a covariance function model./ V.V. Sergeyev, A.Yu. Denisova, // Pattern Recognition and Image Analysis – 2014. – V24(4). – P. 561-565.
7. Денисова, А.Ю. Идентификация линейной модели наблюдения изображений, получаемых при дистанционном зондировании Земли, с использованием геоинформационных данных/ А.Ю. Денисова, В.В. Сергеев // Компьютерная оптика. – 2015. – Том 39(4). – Самара. – С.557-563.
8. Сергеев, В.В. Итерационный метод восстановления кусочно-постоянных изображений при известных границах областей. / В.В. Сергеев, А.Ю. Денисова // Компьютерная оптика. – 2013. – Том 37(2). – Самара. – С. 239-243.
9. Storey, J.C. Landsat 7 on-orbit modulation transfer function estimation / J.C. Storey //International Symposium on Remote Sensing. – 2001. – pp. 50-61.
10. Huang, C. Impact of sensor's point spread function on land cover characterization: assessment and deconvolution / C.Huang, J.R.G. Townshend, S. Liang, S.N.V. Kalluri, R.S. DeFries //Remote Sensing of Environment. – 2002. – V80(2). – pp. 203-212.