

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ НАБЛЮДЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ЗЕМЛИ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ДАННЫХ

А.Ю. Денисова, В.В. Сергеев

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

Аннотация

В статье описывается модификация метода идентификации линейной модели наблюдения, использующего соотношение между энергетическими спектрами входного и выходного изображений. Входное неискажённое изображение полагается неизвестным. В разработанной модификации метода используются известные границы объектов на изображении для построения изображения, энергетически эквивалентного (имеющего близкий энергетический спектр) исходному неискажённому изображению.

Ключевые слова: идентификация, линейная модель наблюдения, импульсная характеристика, энергетический спектр, частотная характеристика, спектрально-энергетический метод, геоинформационные данные.

Цитирование: 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. – Т. 39, № 4. – С. 557-563. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-557-563.

Введение

Формирование изображений в системах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обычно описывается с помощью линейной модели наблюдения [1]. Для решения многих задач обработки данных ДЗЗ, например, для коррекции искажений, необходимо знать импульсную характеристику (ИХ) искажающей системы.

При отсутствии априорных данных об искажающей системе и входном сигнале задача оценки импульсной характеристики представляет собой так называемую задачу «слепого» оценивания, когда оценка неизвестной ИХ производится только по наблюдаемому выходному изображению [2]. Многие существующие алгоритмы слепой идентификации используют предположения о свойствах статистических характеристик восстанавливаемого сигнала или его статистические модели, например, алгоритмы, описанные в [2–5]. Однако необходимость расчёта статистик высших порядков делает невозможным или очень трудоёмким применение подобных алгоритмов в двумерном случае в связи со сложностью оценок соответствующих статистических характеристик.

Для данных ДЗЗ перспективным представляется предложенный в [6–7] спектрально-энергетический метод идентификации импульсной характеристики. Он позволяет выполнить идентификацию сглаживающей ИХ по автокорреляционной функции (АКФ) и/или энергетическому спектру (ЭС) наблюдаемого изображения. Для больших объёмов данных, которые характерны для изображений дистанционного зондирования, требуемые оценки статистических характеристик изображения устойчивы и допускают эффективную реализацию на основе быстрого преобразования Фурье.

Разработанные ранее варианты спектрально-энергетического метода и его версия, описываемая в данной статье, различаются используемыми способами

необходимой оценки энергетического спектра неискажённого изображения. В случае, рассмотренном в работе [6], оценка неизвестного ЭС исходного изображения строилась с использованием экспоненциальной модели АКФ. В [7] требуемая оценка неискажённого ЭС была получена по изображению, АКФ которого была близка к АКФ исходного неискажённого изображения. Для построения такого изображения использовалась фильтрация наблюдаемого изображения с восстановлением контуров.

В настоящей статье рассматривается случай, когда требуемые корреляционные свойства изображения могут быть восстановлены путём применения известной маски границ. Такой подход представляется оправданным, поскольку для изображений ДЗЗ часто удаётся подобрать соответствующие им векторные карты из геоинформационных систем, описывающие границы объектов на изображении.

1. Спектрально-энергетический метод с использованием геоинформационных данных

Рассмотрим следующую модель наблюдения (для простоты изложения будем полагать, что размеры изображения не ограничены):

$$y(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_1, \tau_2) x(t_1 - \tau_1, t_2 - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2, \quad (1)$$

$$y_\delta(n_1, n_2) = y(t_1, t_2) \Big|_{\substack{t_1=n_1T \\ t_2=n_2T}} + v(n_1, n_2), \quad (2)$$

где $x(t_1, t_2)$ – исходное непрерывное поле яркости (изображение), $h(\tau_1, \tau_2)$ – импульсная характеристика линейной искажающей системы, $y(n_1, n_2)$ – непрерывное изображение на выходе искажающей системы, $y_\delta(n_1, n_2)$ – наблюдаемое дискретное изображение, $v(n_1, n_2)$ – «белый» шум, статистически независимый от полезного изображения, (t_1, t_2) и (n_1, n_2) – непрерывные и дискретные (целочисленные) простран-

венные координаты соответственно, T – шаг дискретизации наблюдаемого дискретного изображения.

Будем считать, что изображения представляют собой двумерные случайные стационарные (пространственно-однородные) поля, для которых определены АКФ и, соответственно, ЭС. Тогда справедливо следующее соотношение, известное в цифровой обработке сигналов [8, 9]:

$$\Phi_Y(\Omega_1, \Omega_2) = |H(\Omega_1, \Omega_2)|^2 \Phi_X(\Omega_1, \Omega_2), \quad (3)$$

где $\Phi_X(\Omega_1, \Omega_2)$, $\Phi_Y(\Omega_1, \Omega_2)$, – ЭС непрерывных изображений на входе и выходе линейной искажающей системы соответственно, $H(\Omega_1, \Omega_2)$ – частотная характеристика этой системы (преобразование Фурье от ИХ).

Если ЧХ – неотрицательная вещественная функция, то из (3) следует:

$$H(\Omega_1, \Omega_2) = \sqrt{\frac{\Phi_Y(\Omega_1, \Omega_2)}{\Phi_X(\Omega_1, \Omega_2)}}. \quad (4)$$

Воспользоваться выражением (4) для вычисления ЧХ (а далее и ИХ) невозможно, так как ни одна из функций, стоящих под знаком радикала, не является наблюдаемой. Однако наблюдаемым является дискретное зашумлённое изображение (2), энергетический спектр которого связан с функцией $\Phi_Y(\Omega_1, \Omega_2)$ следующим соотношением:

$$\begin{aligned} \Phi_Y^{(D)}(e^{i\Omega_1 T}, e^{i\Omega_2 T}) &= \\ &= \frac{1}{T^2} \sum \Phi_Y\left(\Omega_1 + \frac{2\pi k_1}{T}, \Omega_2 + \frac{2\pi k_2}{T}\right) + \Phi_V(e^{i\Omega_1 T}, e^{i\Omega_2 T}), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Phi_Y^{(D)}(e^{i\Omega_1 T}, e^{i\Omega_2 T})$ – ЭС дискретного изображения, зависящий от циклических аргументов (периодичный с периодом $2\pi/T$ по переменным Ω_1, Ω_2), $\Phi_V(e^{i\Omega_1 T}, e^{i\Omega_2 T})$ – ЭС шума, T – шаг дискретизации. Поскольку по предположению рассматриваемый в модели наблюдения (1)–(2) шум является «белым», то его значения не зависят от частоты и равны дисперсии шума D_V :

$$\Phi_V(e^{i\Omega_1 T}, e^{i\Omega_2 T}) = D_V. \quad (6)$$

Будем считать, что шаг дискретизации выбран по теореме Котельникова, т.е. согласован с ЧХ искажающей системы:

$$H(\Omega_1, \Omega_2) = 0, \quad \text{при } |\Omega_1|, |\Omega_2| \geq \frac{\pi}{T}. \quad (7)$$

Тогда, учитывая (3), легко заметить, что суммирование в (5) не порождает эффектов наложения сдвинутых спектров (разные слагаемые отличны от нуля на разных двумерных интервалах частотных аргументов), и получить, что:

$$\Phi_Y(\Omega_1, \Omega_2) = \begin{cases} T^2 \Phi_Y^{(D)}(e^{i\Omega_1 T}, e^{i\Omega_2 T}) - D_V, & \text{при } |\Omega_1|, |\Omega_2| < \frac{\pi}{T}; \\ 0, & \text{при } |\Omega_1|, |\Omega_2| \geq \frac{\pi}{T}. \end{cases} \quad (8)$$

Для оценки ЭС наблюдаемого дискретного изображения можно использовать стандартные методы цифрового спектрального анализа [10]. Энергетический спектр по предположению «белого» шума не зависит от частоты и имеет значения, равные дисперсии шума в каждой точке, которая может быть оценена различными простыми способами, в настоящей работе для этого применялось усреднение высокочастотной части ЭС наблюдаемого изображения [6].

Вторую ненаблюдаемую функцию в (4) – $\Phi_X(\Omega_1, \Omega_2)$ – будем оценивать при следующих общих предположениях о характере исходного изображения и ИХ искажающей системы:

1. Двумерная функция яркости неискажённого изображения в любом сечении представляет собой ступенчатую (кусочно-постоянную) функцию. Данное предположение, как правило, выполняется для изображений ДЗЗ, так как объекты на поверхности земли имеют чёткие границы.

2. ИХ линейной системы является сглаживающей, т.е. её влияние ограничивается «размытием» ступенек яркости на границах областей постоянных значений.

Значения автоковариационной функции (АКФ) кусочно-постоянного изображения определяются главным образом интенсивностью перепадов яркости. Поэтому, выполнив восстановление положения «ступенек» яркости, можно получить изображение с АКФ, близкой к АКФ неискажённого изображения. Далее полученная АКФ – через преобразование Фурье – может быть преобразована в оценку ЭС спектра исходного изображения.

«Идеальное» положение границ областей (перепадов яркости) мы предлагаем брать из векторных картографических данных геоинформационной системы. При этом будет использоваться следующая последовательность действий. Наблюдаемое дискретное изображение с помощью какого-либо известного метода интерполяции преобразуется в непрерывную форму. Векторная карта, на которой выделены области постоянной яркости, совмещается с полученным непрерывным изображением, и далее производится усреднение яркостей по областям. И наконец, полученное кусочно-постоянное изображение служит для построения искомого ЭС.

2. Компьютерная реализация

Компьютерная реализация описанного метода, естественно, исключает возможность использования непрерывных представлений изображений, поэтому вместо них будем использовать квазинепрерывные изображения, т.е. дискретизированные с некоторым мелким шагом и имеющие конечный размер.

Пусть наблюдаемое дискретное изображение $y_2(n_1, n_2)$ имеет шаг дискретизации T и размер $N \times N$, т.е. $n_1, n_2 = 0, \dots, N-1$. Неизвестному исходному непрерывному изображению соответствует квазинепрерывное изображение $x(m_1, m_2)$, $m_1, m_2 = 0, \dots, M-1$ с шагом дискретизации $T_1 < T$, а неизвестное сглажен-

ное квазинепрерывное изображение $y(m_1, m_2)$ формируется путём свёртки изображения $x(m_1, m_2)$ с неизвестной квазинепрерывной импульсной характеристикой $h(k_1, k_2)$, $k_1, k_2 = \overline{-K, \dots, K}$, где $2K+1 \ll M$. Далее для простоты изложения будем полагать, что и M и N – чётные.

Энергетические спектры, соответствующие квазинепрерывным изображениям, $y(m_1, m_2)$ и $x(m_1, m_2)$ будем искать с использованием дискретного преобразования Фурье (ДПФ) [8] в виде $\hat{\Phi}_x(l_1, l_2)$, $\hat{\Phi}_y(l_1, l_2)$, где отсчёты с индексами $l_1, l_2 = \overline{-\frac{M}{2}, \dots, \frac{M}{2}-1}$ соответствуют частотам $\Omega_1 = \frac{2\pi l_1}{M}$, $\Omega_2 = \frac{2\pi l_2}{M}$.

Обозначим γ отношение шагов дискретизации квазинепрерывного и наблюдаемого изображений:

$$\gamma = \frac{T}{T_1}. \quad (9)$$

Из соображений простоты описания будем полагать, что γ – целое число.

Будем считать, что оценка дисперсии \hat{D}_v шума была получена по наблюдаемому изображению. Тогда предлагаемая модификация спектрально-энергетического метода идентификации ИХ может быть описана следующим образом:

1. Сформировать растровую маску $D(m_1, m_2)$, $m_1, m_2 = \overline{0, M-1}$ границ областей по векторной карте. 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 $y_0(n_1, n_2)$ с шагом $1/\gamma$ до размера $M \times M$. Полученное квазинепрерывное изображение обозначим $y_{in}(m_1, m_2)$, $m_1, m_2 = \overline{0, \dots, M-1}$.

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:

$$\hat{x}(m_1, m_2) = \bar{y}_i, \quad m_1, m_2 \in D_i, i = \overline{1, I},$$

$$\bar{y}_i = \frac{1}{|D_i|} \sum_{m_1, m_2 \in D_i} y_{in}(m_1, m_2), \quad (10)$$

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

4. Оценить ЭС $\hat{\Phi}_x(l_1, l_2)$, $l_1, l_2 = \overline{-\frac{M}{2}, \dots, \frac{M}{2}-1}$ по изображению $\hat{x}(m_1, m_2)$, $m_1, m_2 = \overline{0, \dots, M-1}$ с использованием ДПФ длины M .

5. Оценить ЭС $\hat{\Phi}_y^{(N)}(p_1, p_2)$, $p_1, p_2 = \overline{-\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2}-1}$ по наблюдаемому изображению $y_0(n_1, n_2)$, $n_1, n_2 = \overline{0, \dots, N-1}$ с использованием ДПФ длины N .

Отсчёты с индексами $p_1, p_2 = \overline{-\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2}-1}$ соответствуют частотам $\Omega_1 = \frac{2\pi p_1}{N}$, $\Omega_2 = \frac{2\pi p_2}{N}$.

6. Оценить ЭС $\hat{\Phi}_y(l_1, l_2)$ путём дополнения нулями ЭС $\hat{\Phi}_y^{(N)}(p_1, p_2)$ по формуле (8) с учётом корректировки на дискретность:

$$\hat{\Phi}_y(l_1, l_2) = \begin{cases} \gamma^2 \hat{\Phi}_y^{(N)}(l_1, l_2), & \text{при } -\frac{N}{2} \leq l_1 < \frac{N}{2} \text{ и } -\frac{N}{2} \leq l_2 < \frac{N}{2}; \\ 0, & \text{при } -\frac{M}{2} \leq l_1 < -\frac{N}{2} \text{ и } -\frac{M}{2} \leq l_2 < \frac{M}{2}, \\ & \frac{N}{2} \leq l_1 < \frac{M}{2} \text{ и } -\frac{M}{2} \leq l_2 < \frac{M}{2}, \\ & -\frac{N}{2} \leq l_1 < \frac{N}{2} \text{ и } -\frac{M}{2} \leq l_2 < -\frac{N}{2}, \\ & -\frac{N}{2} \leq l_1 < \frac{N}{2} \text{ и } \frac{N}{2} \leq l_2 < \frac{M}{2}. \end{cases} \quad (11)$$

7. Получить оценку ЧХ $\hat{H}(l_1, l_2)$, $l_1, l_2 = \overline{-\frac{M}{2}, \dots, \frac{M}{2}-1}$ по формуле (4).

6. Найти ИХ $\hat{h}(k_1, k_2)$ с использованием обратного ДПФ длины M .

Оценки ЭС на шаге 4 и 5 могут быть получены с помощью известных в цифровом спектральном анализе методов. Подробнее о методах оценки ЭС и АКФ сигналов изложено в [10]. В экспериментальной реализации необходимые ЭС оценивались с использованием коррелограммного метода [10] с последующим сглаживанием полученной оценки в частотной области.

Следует подчеркнуть, что предложенный метод позволяет восстановить импульсную характеристику системы с шагом дискретизации меньшим, чем шаг дискретизации наблюдаемого изображения. Избыточные отсчёты с $|k_1|, |k_2| \geq K$ полагаются равными нулю.

3. Экспериментальное исследование

Экспериментальное исследование метода проводилось на наборе из десяти модельных мозаичных изображений [11]. Сначала генерировались соответствующие квазинепрерывные маска границ и мозаичные изображения. Размер маски и квазинепрерывных изображений составлял 4096×4096 точек. Мозаичные изображения имели коэффициент корреляции 0,99.

Искажающая система многих средств ДЗЗ описывается последовательным действием нескольких линейных систем со следующими импульсными характеристиками [1]:

1) Гауссова ИХ, описывающая линейные искажения в реальной оптической системе.

$$h_1(k_1, k_2) = A \exp \left\{ -\frac{(k_1^2 + k_2^2)}{2\sigma^2} \right\}, \quad (12)$$

$$k_1, k_2 = \overline{-K, K},$$

где σ – радиус пятна размытия оптической системы в пикселях, A – константа, обеспечивающая выполнение условия нормировки ИХ:

$$\sum_{k_1, k_2 = -K}^K h(k_1, k_2) = 1; \quad (13)$$

2) прямоугольная ИХ, характеризующая усреднение функции яркости по апертуре детекторного элемента:

$$h_2(k_1, k_2) = \text{rect}\left(\frac{k_1}{w}\right) \text{rect}\left(\frac{k_2}{w}\right), \quad (14)$$

где w – ширина прямоугольного импульса в пикселях;

3) прямоугольная ИХ, моделирующая смаз изображения из-за движения съёмочной системы в процессе сканирования:

$$h_3(k_1, k_2) = \text{rect}\left(\frac{k_1}{s}\right), \quad \text{или} \quad h_3(k_1, k_2) = \text{rect}\left(\frac{k_2}{s}\right), \quad (15)$$

где s – величина смаза в пикселях.

Общая ИХ системы формирования изображения моделируется как:

$$h(k_1, k_2) = h_1(k_1, k_2) ** h_2(k_1, k_2) ** h_3(k_1, k_2), \quad (16)$$

где $**$ – операция свёртки.

В экспериментальном исследовании изображения искажались с помощью одной из двух импульсных характеристик:

1) «ИХ1», моделирующая импульсную характеристику датчика MODIS (Terra\Aqua) [1,12–13], $h_M(k_1, k_2) = h_1(k_1, k_2) ** h_2(k_1, k_2) ** h_3(k_1, k_2)$ с параметрами $\sigma = w = s = 8$;

2) «ИХ2», моделирующая импульсную характеристику датчика ETM+ (Landsat-5,7) [14–15], $h_E(k_1, k_2) = h_1(k_1, k_2) ** h_2(k_1, k_2)$ с параметрами $\sigma = w = 8$.

ИХ были сгенерированы с шагом дискретизации таким же, как и детальные изображения, и выступали далее в качестве эталонов для сравнения с восстановленными импульсными характеристиками.

Полученные в результате сглаживания изображения подвергались дискретизации в $\gamma = 8$ раз. Окончательно наблюдаемое изображение формировалось как результат добавления аддитивного «белого» гауссова шума к полученным дискретным изображениям и имело размер 512×512 пикселей. В итоге размытие на наблюдаемых изображениях составляло 1–2 пикселя. Пример наблюдаемого изображения приведён на рис. 1.

В экспериментах для получения интерполированного наблюдаемого изображения на шаге 2 использовалась билинейная интерполяция.

Ошибка восстановления ИХ оценивалась как среднеквадратичная ошибка, нормированная на центральный максимальный отчёт эталонной ИХ:

$$\varepsilon = \frac{1}{(2K+1)h(0,0)} \sqrt{\sum_{k_1, k_2 = -K}^K (h(k_1, k_2) - \hat{h}(k_1, k_2))^2}, \quad (17)$$

где $h(k_1, k_2)$ – эталонная импульсная характеристика, $\hat{h}(k_1, k_2)$ – полученная оценка ИХ. Выражение (17) рассматривается в настоящей статье в качестве относительной ошибки восстановления.

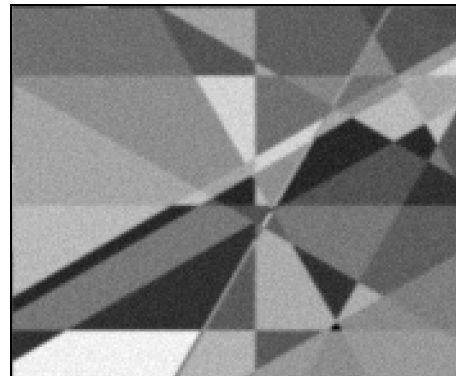


Рис. 1. Фрагмент наблюдаемого изображения, искажённого ИХ1 и шумом. Отношение сигнал/шум – 120

На рис. 2 показаны поперечное и продольное сечения восстановленной и исходной импульсных характеристик для случая искажения «ИХ1», моделирующей действие датчика MODIS (Terra\Aqua).

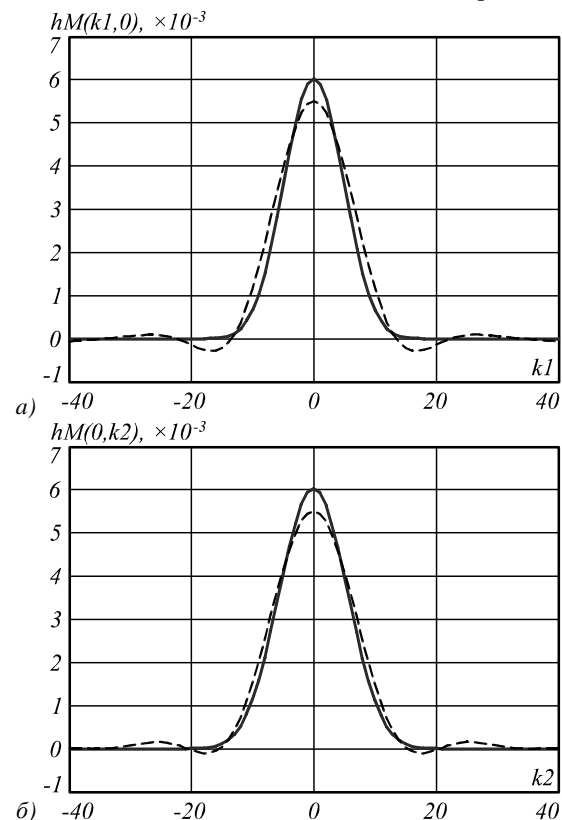


Рис. 2. Сечения: а) поперечное, б) продольное, – идеальной (сплошная линия) и восстановленной (пунктирная линия) импульсных характеристик для случая с ИХ1

Значение отношения сигнал/шум для примера, приведённого на рис. 2, было равно 120. ИХ датчика MODIS имеет разные поперечное и продольное сечения из-за наличия смаза в процессе сканирования. Как видно из рис. 2, восстановленная импульсная ха-

рактика близка к исходной, несмотря на неизотропность исходной ИХ.

На рис. 3 изображены центральные сечения исходной и восстановленной импульсных характеристик для случая с «ИХ2» при отношении сигнал/шум на наблюдаемом изображении, равном 120. «ИХ2» в отличие от «ИХ1» имеет одно и то же сечение в любом направлении.

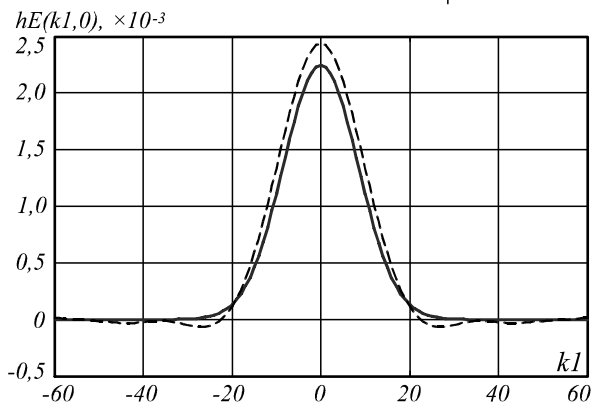


Рис. 3. Сечения идеальной (сплошная линия) и восстановленной (пунктирная линия) импульсных характеристик для случая с ИХ2

В табл. 1 приведены среднее значение $\bar{\epsilon}$ и стандартное отклонение σ_{ϵ} ошибки восстановления по набору наблюдаемых изображений для двух рассматриваемых импульсных характеристик и при различных значениях отношения сигнал/шум d на наблюдаемом изображении. Видно, что в широком диапазоне значений отношения сигнал/шум ошибка восстановления ИХ предложенным методом не превышает 1 %.

Табл. 1 – Среднее значение и стандартное отклонение ошибки восстановления ИХ по набору изображений

	d=250		d=120		d=15	
	$\bar{\epsilon}$	σ_{ϵ}	$\bar{\epsilon}$	σ_{ϵ}	$\bar{\epsilon}$	σ_{ϵ}
ИХ1	0,0039	0,0001	0,0045	0,0001	0,0075	0,0001
ИХ2	0,0055	0,0003	0,0060	0,0003	0,0091	0,0004

Представленные результаты показывают эффективность работы метода для восстановления импульсных характеристик.

Заключение

Разработанная и описанная в статье модификация спектрально-энергетического метода позволяет восстанавливать неизвестную импульсную характеристику по наблюдаемому изображению с использованием маски границ, в качестве которой для изображений ДЗЗ могут выступать границы векторной карты в ГИС. Метод позволяет восстанавливать ИХ с шагом дискретизации более мелким, чем шаг дискретизации исходного наблюдаемого изображения.

В отличие от предыдущих вариантов спектрально-энергетического метода описанная в данной статье процедура оценки ИХ имеет более простую реализацию.

Современная практика совместной обработки геоинформационных данных и данных ДЗЗ разного разрешения открывает широкие возможности для применения предложенной модификации спектрально-

энергетического метода в задачах обработки данных ДЗЗ среднего и низкого разрешения.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 14-31-00014 «Создание лаборатории прорывных исследований дистанционного зондирования Земли».

Литература

1. Шовенгердт, Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
2. 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.
3. Tong, L. Blind channel identification based on second-order statistics: A frequency-domain approach / L. Tong, G. Xu, B. Hassibi, T. Kailath // Information Theory, IEEE Transactions on. – 1995. – Vol. 41(1). – P. 329-334.
4. Tong, L. A new approach to blind identification and equalization of multipath channels / L. Tong, G. Xu, T. Kailath // Signals, Systems and Computers, 1991. 1991 Conference Record of the Twenty-Fifth Asilomar Conference on. – IEEE, 1991. – P. 856-860.
5. Tong, L. Blind identification and equalization based on second-order statistics: A time domain approach / L. Tong, G. Xu, T. Kailath // Information Theory, IEEE Transactions on. – 1994. – Vol. 40(2). – P. 340-349.
6. Sergeev, V.V. Spectral-Energy Identification Method of the Linear Observation Model for Remote Sensing of the Earth / V.V. Sergeev, A.Yu. Denisova // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2011 – Vol. 21(2). – P. 321-323.
7. Sergeev, V.V. Spectral energy identification method of the linear observation model in the absence of a covariance function model / V.V. Sergeev, A.Yu. Denisova // Pattern Recognition and Image Analysis – 2014. – Vol. 24(4). – P. 561-565.
8. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В.А. Сойфера – М.: Физматлит. – 2003. – 784 с.
9. Льюнг, Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льюнг; пер. с англ.; под ред. Я.З. Цыпкина – М.: Наука, 1991. – 432 с.
10. Марпл, С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С.Л. Марпл; пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 265 с.
11. Сергеев, В.В. Алгоритм генерации тестовых мозаичных изображений / В.В. Сергеев, О.Н. Сигунова // Автоматизация научных исследований: межвузовский сборник научных трудов. – Куйбышев: Куйбышевский авиационный институт, 1984. – С. 129-134.
12. Justice, C.O. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research / C.O. Justice, E. Vermote, J.R.G. Townshend, R. Defries, D.P. Roy // Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on. – 1998. – Vol. 36(4). – P. 1228-1249.
13. Guenther, B. On-orbit performance of the Earth Observing System Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; first year of data / B. Guenther, X. Xiong, V.V. Salomonson, W.L. Barnes, J. Young // Remote Sensing of Environment. – 2002. – Vol. 83(1). – P. 16-30.
14. Storey, J.C. Landsat 7 on-orbit modulation transfer function estimation / J.C. Storey // International Symposium on

- Remote Sensing. – International Society for Optics and Photonics, 2001. – P. 50-61.
15. **Park, S.K.** Modulation-transfer-function analysis for sampled image systems / S.K. Park, R. Schowengerdt, M.A. Kaczynski // Applied Optics. – 1984. – Vol. 23(15). – P. 2572-2582.
- References**
- [1] Schowengerdt RA. Remote sensing: models and methods for image processing. New York: Academic Press Inc; 2006.
- [2] Goriachkin OV, Erina EI. Blind channel identification by manifolds of given correlation generated by random polynoms. Achievements of Modern Radioelectronics 2008; (8): 70-7.
- [3] Tong L, Xu G, Hassibi B, Kailath T. Blind channel identification based on second-order statistics: A frequency-domain approach. Information Theory, IEEE Transactions on 1995; 41(1): 329-34.
- [4] Tong L, Xu G, Kailath T. A new approach to blind identification and equalization of multipath channels. Signals, Systems and Computers, 1991. 1991 Conference Record of the Twenty-Fifth Asilomar Conference on 1991; 856-60.
- [5] Tong L, Xu G, Kailath T. Blind identification and equalization based on second-order statistics: A time domain approach. Information Theory, IEEE Transactions on 1994; 40(2): 340-9.
- [6] Sergeyev VV, Denisova AY. Spectral-Energy Identification Method of the Linear Observation Model for Remote Sensing of the Earth. Pattern Recognition and Image Analysis 2011; 21(2): 321-3.
- [7] Sergeyev VV, Denisova AY. Spectral energy identification method of the linear observation model in the absence of a covariance function model. Pattern Recognition and Image Analysis 2014; 24(4): 561-5.
- [8] Soifer VA. Computer Image Processing, Part II: Methods and algorithms. VDM Verlag, 2009.
- [9] Ljung L. System identification. Birkhäuser Boston, 1998.
- [10] Marpl SL. Numeric Spectral Analysis and Its Applications. Moscow: "Mir" Publisher, 1990.
- [11] Sergeyev VV, Sigunova ON. An algorithm of generation of test mosaic images. Science research automation, Kuybyshev: Kuybyshevs aviation institute; 1984. 129-34.
- [12] Justice CO, Vermote E, Townshend JRG, Defries R, Roy DP. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on 1998; 36(4): 1228-49.
- [13] Guenther B, Xiong X, Salomonson VV, Barnes WL, Young J. On-orbit performance of the Earth Observing System Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; first year of data. Remote Sensing of Environment 2002; 83(1). 16-30.
- [14] Storey JC. Landsat 7 on-orbit modulation transfer function estimation. International Symposium on Remote Sensing; International Society for Optics and Photonics, 2001; 50-61.
- [15] Park SK, Schowengerdt R, Kaczynski MA. Modulation-transfer-function analysis for sampled image systems. Applied Optics 1984; 23(15): 2572-82.

IMPULSE RESPONSE IDENTIFICATION FOR REMOTE SENSING IMAGES USING GIS DATA

A.Y. Denisova, V.V. Sergeyev
Samara State Aerospace University,
Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences

Abstract

In this article the authors describe a new modification of the spectrum method that uses a known relation between the energy spectra of input and output signals to identify a linear observation model. The input undistorted image is assumed to be unknown. The modification proposed in this article uses known borders of image objects to construct an image with the energy spectrum similar to that of the original undistorted image.

Keywords: identification, linear observation model, impulse response, energy spectrum, frequency response, energy spectrum method, geoinformation data.

Citation: Denisova AY, Sergeyev VV. Impulse response identification for remote sensing images using gis data. Computer Optics 2015; 39(4): 557-63. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-557-563.

Acknowledgements: This work was financially supported by the Russian Scientific Foundation (RSF), grant no. 14-31-00014 "Establishment of a Laboratory of Advanced Technology for Earth Remote Sensing".

Сведения об авторах

Сергеев Владислав Викторович родился в 1951 году. В 1974 году окончил Куйбышевский авиационный институт (ныне Самарский государственный аэрокосмический университет (национальный исследовательский университет), СГАУ). В 1993 году защитил диссертацию на соискание степени доктора технических наук. Основное место работы – заведующий кафедрой геоинформатики и информационной безопасности СГАУ. По совместительству работает заведующим лабораторией математических методов обработки изображений в Институте систем обработки изображений РАН. Круг научных интересов: цифровая обработка сигналов, анализ изображений, распознавание образов, геоинформатика. Имеет около 270 публикаций, в том числе 56 статей, четыре монографии (в соавторстве). Председатель Поволжского отделения Национального комитета РАН по распознаванию образов и анализу изображений. Член-корреспондент Российской экологической академии и Академии инженерных наук РФ, член SPIE (The International Society for Optical Engineering), лауреат Самарской губернской премии в области науки и техники.

E-mail: vsrg@smr.ru.

Vladislav Victorovich Sergeev (1951 b.), graduated (1974) from Samara State Aerospace University (SSAU). He received his PhD in Technical sciences (1978) and DrSc degree in Physics & Maths (1993). At present he is a head Geoinformation Science and Information Security sub-department in SSAU and holding a part-time position as the head of laboratory at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences. The area of interests includes digital signals and image processing, geoinformatics and pattern recognition. He's list of publications contains about 270 scientific papers, including 4 monographs. He is a member of Russian Association of Pattern Recognition and Image Analysis and The International Society for Optical Engineering.

Денисова Анна Юрьевна, 1988 года рождения. В 2011 году защитила диплом магистра прикладной математики и информатики в Самарском государственном аэрокосмическом университете (СГАУ) (национальный исследовательский университет). В 2014 году окончила аспирантуру СГАУ. В настоящее время работает младшим научным сотрудником в НИЛ-97 (СГАУ) и стажёром-исследователем в ЛММОИ в Институте систем обработки изображений РАН. Круг научных интересов включает обработку изображений, геоинформационные системы.

E-mail: denisova_ay@geosamara.ru.

Anna Yurievna Denisova (b. 1988). Graduated from Samara State Aerospace University in 2011 as Master of Mathematics and Computer Science. Now works in laboratory №97 at Samara State Aerospace University and at the Image Processing Systems Institute of the RAS. The area of research interest includes image processing and geoinformational systems.

*Поступила в редакцию 30 июля 2015 г.
Окончательный вариант – 24 августа 2015 г.*