

Секция 2:

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ И ГЕОИНФОРМАТИКА

СПЕКТРАЛЬНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ДАННЫХ

А.Ю. Денисова, В.В. Сергеев

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва
(национально исследовательский университет)

В работе описывается модификация разработанного ранее спектрально-энергетического метода идентификации линейной модели наблюдения, который использует для оценки импульсной характеристики соотношение между энергетическими спектрами входного и выходного изображений. При этом входное неискаженное изображение полагается неизвестным. В разработанной и описанной в данной статье модификации метода используются известные границы объектов на изображении для построения изображения энергетически «эквивалентного», т.е. имеющее близкий энергетический спектр, исходному неискаженному изображению. Метод рассматривается в контексте оценки импульсной характеристики по изображениям дистанционного зондирования Земли, для которых известные границы могут быть представлены в виде цифровых векторных карт из геоинформационных систем, соответствующих местности на наблюдаемом изображении.

Формирование изображений в системах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) описывается с помощью линейной модели наблюдения. В ряде задач, например, для коррекции искажений яркости на изображении, необходимо знать импульсную характеристику (ИХ) искажающей системы. Во многих случаях для оценки ИХ доступно только наблюдаемое изображение и иногда минимальные априорные сведения о свойствах исходного изображения. В существующих методах для оценки ИХ используется несколько подходов: решение уравнения свёртки [1], использование предположений о свойствах статистических характеристик исходного изображения [2], параметрические модели оцениваемой ИХ [3]. Недостатком первого подхода является сложность обеспечения устойчивой работы методов для больших изображений, второй подход используется в одномерном случае, так как в двумерном случае расчёт статистик высших порядков слишком трудоёмок, последний подход отличается тем, что использует максимальное количество априорной информации.

Для данных ДЗЗ хорошим решением является применение разработанного авторами ранее в [4-6] спектрально-энергетического метода идентификации импульсной характеристики. Метод позволяет выполнить идентификацию сглаживающей ИХ в двумерном случае по автокорреляционной функции (АКФ) и энергетическому спектру (ЭС) наблюдаемого изображения. Для больших объёмов данных, которые характерны для изображений дистанционного зондирования, требуемые оценки статистических характеристик изображения устойчивы и имеют сравнительно быстрые алгоритмы вычисления на основе быстрого преобразования Фурье.

Связь исходного и искаженного изображения для систем ДЗЗ традиционно описывается линейной моделью наблюдения:

$$y(n_1, n_2) = \sum_{k_1, k_2=-K}^K h(k_1, k_2)x(n_1 - k_1, n_2 - k_2) + v(n_1, n_2), n_1, n_2 = \overline{0, N-1}, \quad (1)$$

где $y(n_1, n_2)$ – наблюдаемое изображение, $h(k_1, k_2)$ – неизвестная импульсная характеристика, $x(n_1, n_2)$ – неизвестное исходное изображение, $v(n_1, n_2)$ – статистически независимый от сигнала «белый» шум, N – размер изображения. Будем также полагать, что для неизвестной ИХ выполняется условие нормировки: $\sum_{k_1, k_2=-K}^K h(k_1, k_2) = 1$.

Спектрально-энергетический метод вытекает из известного в теории сигналов соотношения между ЭС исходного и наблюдаемого изображений [7] для рассматриваемой модели наблюдения:

$$\Phi_Y(e^{i\omega_1}, e^{i\omega_2}) = |H(e^{i\omega_1}, e^{i\omega_2})|^2 \Phi_X(e^{i\omega_1}, e^{i\omega_2}) + D_V, \quad (2)$$

где $\Phi_Y(e^{i\omega_1}, e^{i\omega_2})$ – ЭС наблюдаемого изображения, $\Phi_X(e^{i\omega_1}, e^{i\omega_2})$ – ЭС исходного изображения, $H(e^{i\omega_1}, e^{i\omega_2})$ – частотная характеристика (ЧХ) искажающей системы, D_V – дисперсия белого шума, ω_1, ω_2 – циклические частоты.

Так как реальные системы ДЗЗ в большинстве случаев проектируются с учётом размытия на детекторном элементе, и шаг дискретизации системы согласован с размерами размытия на датчике, то отрицательные значения ЧХ находятся за верхней частотой, представленной в периодическом спектре последовательности. Поэтому для оценки частотной характеристики можно применять выражение, прямо следующее из (2):

$$H(e^{i\omega_1}, e^{i\omega_2}) = \sqrt{\frac{\Phi_Y(e^{i\omega_1}, e^{i\omega_2}) - D_V}{\Phi_X(e^{i\omega_1}, e^{i\omega_2})}}. \quad (3)$$

Искомая ИХ может быть получена путём обратного преобразования Фурье от ЧХ. Метод идентификации, использующий соотношение (3) для оценки ИХ, будем называть спектрально-энергетическим методом. Задача спектрально-энергетического восстановления ИХ сводится к построению оценок ЭС наблюдаемого изображения, дисперсии шума и оценки ЭС исходного изображения. Для оценки ЭС наблюдаемого изображения можно использовать существующие методы цифрового спектрального анализа [15]. Дисперсию шума можно оценить различными методами, в настоящей работе для оценки дисперсии шума применялся метод с усреднением высокочастотной части спектра, описанный кратко в [10]. Наибольший интерес представляет оценка ЭС исходного изображения, скорректированного на влияние ЧХ.

Разработанная модификация спектрально-энергетического метода использует следующий непараметрический метод оценки ЭС исходного изображения. При этом предполагается, что:

1. Функция яркости неискаженного изображения в любом сечении представляет собой ступенчатую функцию. Данное предположение выполняется для изображений ДЗЗ, так как объекты на поверхности земли имеют четкие границы.

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

Поскольку значения АКФ изображения определяются главным образом интенсивностью перепадов яркости, то, выполнив восстановление положения «ступенек» яркости, можно получить изображение с АКФ, близкой к АКФ неискаженного изображения, и использовать её для оценки ЭС спектра исходного изображения. Тот факт, что изображения ДЗЗ являются изображениями земной поверхности, дает

возможность использовать картографические данные о границах объектов на изображении. Геоинформационные системы являются наиболее широкого распространенным и хорошо организованным источником картографических данных в векторном виде. Координаты объектов векторной карты с любой требуемой точностью могут быть преобразованы в растровую форму и использованы в виде маски границ областей для приведения снимка к виду с чёткими границами. Последний в свою очередь служит для построения искомого энергетического спектра близкого к энергетическому спектру неискаженного сигнала.

Будем считать, что оценка дисперсии шума была получена тем или иным способом по наблюдаемому изображению. Тогда предлагаемая здесь модификация спектрально-энергетического метода идентификации ИХ может быть описана следующим образом:

1. Сформировать растровую маску $D(m_1, m_2)$, $m_1, m_2 = \overline{0, MN-1}$ границ областей по векторной карте в M раз большего размера, чем размер наблюдаемого изображения. Каждой области D_i на маске соответствуют пиксели со значением i , $i = \overline{1, I}$, где I – количество объектов на изображении. Очевидно, что сформированное изображение маски должно быть в той же системе координат, что и исходное изображение.

2. Увеличить наблюдаемое изображение $y(n_1, n_2)$, $0 \leq n_1, n_2 \leq N-1$ с помощью билинейной интерполяции с шагом $1/M$ до размера MN : $y_{in}(m_1, m_2)$, $0 \leq m_1, m_2 \leq MN-1$.

3. Сформировать изображение с чёткими границами $\hat{x}(m_1, m_2)$, $m_1, m_2 = \overline{0, MN-1}$ путём усреднения значений в каждой области маски:

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

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

4. Использовать ЭС $\hat{\Phi}_X(e^{i\omega'_1}, e^{i\omega'_2})$ полученного изображения $\hat{x}(m_1, m_2)$, $m_1, m_2 = \overline{0, MN-1}$ в качестве оценки $\Phi_X(e^{i\omega_1}, e^{i\omega_2})$ в выражении (3).

5. Вычислить ЭС наблюдаемого изображения. Очевидно, что ЭС наблюдаемого изображения необходимо оценивать по исходному не интерполированному изображению, чтобы не вносить дополнительно искажений, связанных с интерполяцией изображения. Однако для использования в формуле (3) оба энергетических спектра должны иметь один и тот же шаг дискретизации. Известно, что дополнение нулями в частотной области соответствует интерполяции с базисными функциями sinc в пространственной области [7]. При этом ЭС спектр интерполированного с шагом дискретизации T изображения имеет вид (считаем, что боковыми лепестками можно пренебречь):

$$\Phi_{in}(\Omega_1, \Omega_2) = \frac{1}{T^2} \Phi(\Omega_1, \Omega_2),$$

где $\Phi_{in}(\Omega_1, \Omega_2)$ – интерполированный энергетический спектр, Ω_1, Ω_2 – безразмерная частота.

Таким образом, энергетический спектр $\hat{\Phi}_Y(e^{i\omega'_1}, e^{i\omega'_2})$ для использования в формуле (3) формируется путем дополнения нулями энергетического спектра наблюдаемого изображения $\Phi_Y(e^{i\omega_1}, e^{i\omega_2})$ до размера MN и умножением отсчётов на множитель M^2 , (что соответствует интерполяции с шагом $1/M$).

5. Выполнить расчёт ЧХ по формуле (3).

6. Вычислить ИХ путём применения обратного преобразования Фурье к полученной оценке ЧХ.

Интерполяция наблюдаемого изображения перед применением маски на шаге 4 необходима для более точного представления границ на изображении, поскольку именно информация о границах позволяет получить изображение, имеющее энергетический спектр близкий к исходному неискаженному энергетическому спектру. Вычисление ЭС на шаге 4 и 5 может быть произведено любым известным методом цифрового спектрального анализа [8].

Экспериментальное исследование метода производилось на наборе из десяти модельных мозаичных изображений. Сначала создавались соответствующие детальному уровню представления границ мозаичные изображения с коэффициентом корреляции 0,99 и их маски границ областей размера 4096×4096 точек. Затем данные изображения искажались с помощью ИХ, моделирующей искажения датчика MODIS (Terra\Aqua) [9]:

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

$$\text{где } h_1(k_1, k_2) = A \exp\left\{-\frac{(k_1^2 + k_2^2)}{2\sigma^2}\right\}, \quad h_2(k_1, k_2) = \text{rect}\left(\frac{k_1}{w}\right) \text{rect}\left(\frac{k_2}{w}\right), \quad h_3(k_1, k_2) = \text{rect}\left(\frac{k_1}{s}\right),$$

$k_1, k_2 = -K, K$ с параметрами $\sigma = w = s = 8$.

ИХ была сгенерирована с шагом дискретизации таким же как и детальные изображения и выступала далее в качестве эталона для сравнения с восстановленными импульсными характеристиками. Окончательно наблюдаемое изображение формировалось как результат дискретизации в 8 раз и добавления аддитивного «белого» гауссова шума к полученным дискретным изображениям и имело размер 512×512 пикселей. Пример наблюдаемого изображения и результаты оценки ИХ для случая с отношением сигнал/шум 120 на наблюдаемом изображении приведены на рис. 1 и рис.2.

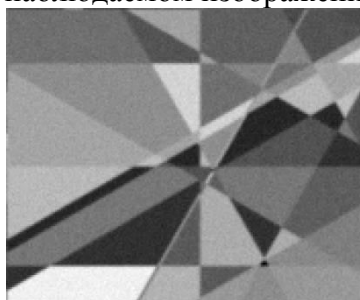


Рисунок 1 – Фрагмент наблюдаемого изображения

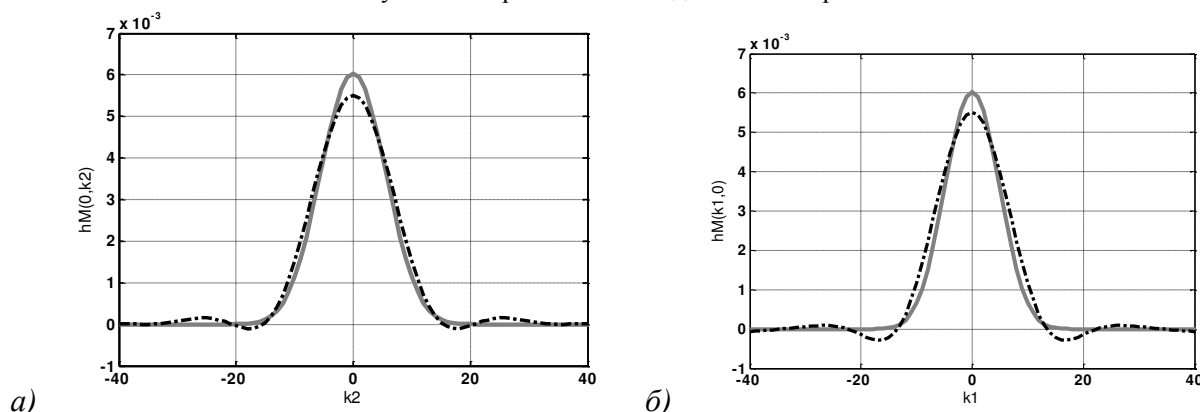


Рисунок 2 – Сечения: а) поперечное, б) продольное, – идеальной (серый цвет) и восстановленной (черный цвет) импульсных характеристик

При восстановлении на шаге 2 применялась билинейная интерполяция с шагом 0,125 и параметр $M = 8$. Ошибка восстановления ИХ оценивалась как нормированная на центральный максимальный отсчёт эталонной ИХ среднеквадратичная ошибка:

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

где $h(k_1, k_2)$ – эталонная импульсная характеристика, $\hat{h}(k_1, k_2)$ – полученная оценка ИХ.

Выражение (4) рассматривается в настоящей статье в качестве относительной ошибки восстановления. В таблице 1 приведены среднее значение ε 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. Можно заметить, что ошибка восстановления ИХ предложенным методом не превышает 1%.

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

d=250		d=120		d=15	
ε	σ_ε	ε	σ_ε	ε	σ_ε
0.0039	0.0001	0.0045	0.0001	0.0075	0.0001

Представленные результаты показывают эффективность работы метода для восстановления импульсных характеристик.

В результате, в общем случае, предложенный метод позволяет восстановить ИХ системы с шагом дискретизации меньшим, чем шаг дискретизации наблюдаемого изображения.

Литература

1. Фурсов, В. А. Восстановление изображений КИХ-фильтрами, построенными путем непосредственной идентификации инверсного тракта/ В. А. Фурсов //Компьютерная оптика. – 1996. – №. 16. – С.103-108.
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. 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.
4. Sergeyev, V.V. Spectral-Energy Identification Method of the Linear Observation Model for Remote Sensing of the Earth /Sergeyev, V.V., Denisova, A.Yu., // Pattern Recognition and Image Analysis, 2011, Vol.21, No.2, pp. 321-323.
5. Сергеев, В.В. Итерационный метод восстановления кусочно-постоянных изображений при известных границах областей. / Сергеев, В.В., Денисова, А.Ю. // Компьютерная оптика. – 2013. – Том 37(2). – Самара. – С. 239-243.
6. Sergeyev, V.V. Spectral energy identification method of the linear observation model in the absence of a covariance function model./ Sergeyev, V.V., Denisova, A.Yu. // Pattern Recognition and Image Analysis – 2014. – V24(4). – P. 561-565.
7. Методы компьютерной обработки изображений/ под ред. Сойфера В. А. – М.: Физматлит. – 2003. –784. с.
8. Марпл, С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. / С.Л.Марпл – М: Мир, 1990 г. – 265 с.
9. Шовенгердт, Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений/ Р. А. Шовенгердт – М.: Техносфера, 2010.–560 с.