

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ

УДК 551.521:535.651

В.В. Белов, Н.В. Молчунов, К.Т. Протасов

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассматривается подход к деконволюции изображений подстилающей поверхности Земли, наблюдаемых в условиях искажающего влияния атмосферы. Особенность рассматриваемого подхода заключается в том, что функция размытия точки, используемая в модели восстановления, неизвестна и подлежит оцениванию. Дополнительная информация, необходимая для решения задачи, содержится в карте градиентов и участков стохастической однородности тех же видеоданных.

Традиционные способы коррекции и восстановления аэрокосмических снимков подстилающей поверхности Земли основаны, как правило, на среднестатистических оптических характеристиках атмосферы и линейной модели переноса излучения с передаточным оператором, зависящим от коэффициента пропускания.

Однако существует область значений геометрических параметров съемки и оптических ситуаций в атмосфере, когда с удовлетворительной точностью коррекция изображений может быть осуществлена только с использованием информации об импульсной реакции (функции размытия точки – ФРТ) атмосферно-оптического канала, формирующего регистрируемое изображение. Необходимые для этого данные могут быть получены на основе модельных представлений об оптических свойствах атмосферы с учетом метеорологической обстановки региона.

Следует заметить, что конкретно сложившаяся оптическая погода в момент съемки может существенно отличаться от среднестатистической, что приводит к потере точности восстанавливаемых конкретных характеристик и искажению результатов последующей тематической обработки.

В связи с этим рассмотрим два подхода решения задачи атмосферной коррекции, не требующих априорных знаний передаточного оператора атмосферного канала, который также восстанавливается по наблюдаемому изображению. Необходимая для этого информация основана на приближенном знании рельефа местности рассматриваемого региона, а именно: предполагается наличие картографических данных с указанием участков стохастической однородности и линий раздела ландшафтных образований.

Такая карта может быть синтезирована по топографической карте местности либо по «хорошему» космическому снимку этой территории, наблюдаемому в благоприятных оптических условиях, с последующей обработкой изображения алгоритмом сегментации. Другими словами, мы предполагаем, что в первом приближении наблюдаемая территория содержит квазиоднородные ландшафтные участки (полей, леса, водной поверхности, пашни и т.п.) и градиентные перепады яркостей разнородных ландшафтных образований (переходы типа вода – берег, просеки – лес, дорога – обочина, участки теней–света хребтов и лощин и т.п.).

Предположим, что искажающее влияние аэрозольных компонент атмосферы зафиксировано на изображении подстилающей поверхности Земли и в математической интерпретации его можно записать в виде уравнения свертки

$$g(x, y) = \iint_R h(x - \xi, y - \eta) f(\xi, \eta) d\xi d\eta + n(x, y), \quad (1)$$

где $g(x, y)$ – функция радиояркости: изображение, регистрируемое оптико-электронной системой прибора; $\{x, y\} \subset R$, R – область определения функции яркости $g(x, y)$ (опускаемая далее); $f(x, y)$ – приземное неискаженное изображение, заданное в масштабе наблюдаемого изображения; $h(x, y)$ – функция размытия точки со свойствами пространственной инвариантности и осе-

вой симметрии; $n(x, y)$ – некоррелированный шум с нулевым средним и некоторой неизвестной дисперсией (аппаратурный шум).

В стандартной постановке задачи (1) предполагается, что $h(x, y)$ известна, а восстанавливается (оценивается) функция $f(x, y)$ по наблюдаемой $g(x, y)$. Как уже упоминалось, в реальных условиях регистрации $g(x, y)$ оптико-геометрические характеристики канала передачи изображения случайны и $h(x, y)$ неизвестна. В этой ситуации прежде всего необходимо восстановить ФРТ $h(x, y)$.

Рассмотрим следующую структурную модель видеоданных (в предположении ламбертовой поверхности отражения и точечного источника освещения) [1]:

$$f(x, y) = r(x, y) I \cos\theta(x, y) + r(x, y) D + H, \quad (2)$$

где $f(x, y)$ – яркость элемента изображения с пространственными координатами (x, y) ; $r(x, y)$ – коэффициент отражения поверхности (зависящий от длины волны λ и, для простоты, опускаемой); I – световой поток Солнца; $\theta(x, y)$ – угол между направлением солнечных лучей и нормалью к элементу поверхности в точке (x, y) ; D – диффузно рассеянный свет; H – вклад рассеяния на атмосферной дымке. Выражение (2) запишем следующим образом:

$$f(x, y) = r(x, y) I_D + H, \quad (3)$$

где величина $I_D = I \cos\theta(x, y) + D$ формирует освещенность анализируемого и фиксируемого участка поверхности Земли. За кратковременный период сканирования спутниковой системой регистрации (составляющий доли секунды) эта величина практически постоянна. Появление аэрозольного рассеивающего слоя приводит к размытию приземного изображения, и в соответствии с моделью (1) будем иметь наблюдаемое изображение следующего вида:

$$g(x, y) = \iint_D h(x - \xi, y - \eta) r(\xi, \eta) I_D d\xi d\eta + H + n(x, y).$$

Обозначив $r(x, y) I_D = f(x, y)$, получим уравнение для наблюдения приземного изображения $f(x, y)$ с «замороженным» на период съемки освещением, а именно:

$$g(x, y) = \iint_D h(x - \xi, y - \eta) f(\xi, \eta) d\xi d\eta + H + n(x, y), \quad (4)$$

таким образом, вклад атмосферной дымки аддитивен.

Исходные априорные предположения о наличии перепадов яркостей в приземном изображении, фиксируемые на контурной карте градиентных перепадов, позволяют сделать следующие уточнения модели (4) [2]:

$$f(x, y) = r(x, y) \text{step}(w),$$

где $\text{step}(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0, \\ 0, & t < 0 \end{cases}$ – ступенчатый перепад яркости происходит (для простоты изложения) вдоль координаты Oz , ортогональной направлению Ow , а новые локальные координаты, ассоциированные со ступенчатым перепадом яркости, имеют вид

$$\begin{pmatrix} z \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \varphi & \cos \varphi \\ \cos \varphi & \sin \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix},$$

φ – угол поворота новой системы координат zOw относительно старой xOy , $r(x, y)$ – приземное изображение, которое предположительно можно было бы наблюдать в отсутствие границы перепада яркостей, будь эта граница удалена каким-либо образом. В этом случае выражение (4) имеет вид

$$g(x, y) = \iint r(x - \xi, y - \eta) \text{step}(w - w') h(\xi, \eta) d\xi d\eta + H + n(x, y), \quad (5)$$

где $w = x \cos \varphi + y \sin \varphi$; H – рассеяние дымкой и аэрозолем в направлении прибора.

Продифференцируем выражение (5) в направлении Ow с учетом того, что $r(x, y)$ – слабо изменяющаяся функция в окрестности ступенчатого скачка, а $d \text{step}(t)/(dt) = \delta(t)$ – дельта-функция, тогда частная производная по направлению Ow будет иметь вид

$$\frac{\partial g(x, y)}{\partial(w)} \cong r(x, y) \int h(z, w) dz, \quad (6)$$

где интегрирование проводится в направлении оси Oz , ортогональной Ow . Выражение в правой части (7) есть не что иное, как выражение для размытой «светящейся» линии, взвешенное константой $r(x, y)$ [3]; влияние последней можно устранить нормировкой $h(w)$. Сканируя наблюдаемое

сглаженное изображение размытого края $\frac{\partial}{\partial t} \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} h(z, w) dz dw$ для всех обнаруженных по

картографическим данным границ на участках квазиоднородности $h(x, y)$, за счет последующего усреднения уменьшаем или устраняем эффекты влияния $r(x, y)$.

В результате мы получим набор различных приближенных проекций, отвечающих различным углам φ координаты Ow в (5). Воспользовавшись томографическим методом реконструкции пространственных функций по набору проекции $h(w) = \int h(z, w) dz$ из (6), восстанавливаем

двумерную ФРТ $h(x, y)$. В тех случаях, когда форма ФРТ достаточно проста, например функция $h(x, y)$ обладает осевой симметрией, для восстановления пространственной ФРТ достаточно одной проекции.

После того как $h(x, y)$ восстановлена, перейдем к задаче деконволюции $f(x, y)$ из (1). Воспользуемся подходом, связанным с выравниванием энергетических спектров (представляющих собой преобразование Фурье-функции корреляции) [4]. В этом случае восстанавливаемое изображение находится как линейная оценка функционала от наблюдаемого изображения, имеющего структуру, аналогичную (1), а именно:

$$\hat{f}(x, y) = \iint l(x - \xi, y - \eta) g(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (7)$$

где $l(x, y)$ – ядро восстанавливающего оператора. При этом предполагается, что энергетический спектр оценки равен энергетическому спектру исходного приземного изображения [4, 5]:

$$F_{\hat{f}}(u, v) = F_f(u, v), \quad (8)$$

где $F_{\hat{f}}(\cdot)$ и $F_f(\cdot)$ – преобразования Фурье-функций корреляции оценки и изображения (энергетические спектры) соответственно, а (u, v) – плоскость пространственных частот.

С учетом линейности восстанавливающего оператора (7) и предположений относительно характеристик шума энергетический спектр оценки $\hat{f}(x, y)$ равен

$$F_{\hat{f}}(u, v) = |L(u, v)|^2 [|H(u, v)|^2 F_f(u, v) + F_n(u, v)], \quad (9)$$

где $H(u, v)$ и $L(u, v)$ – пространственные спектры Фурье для $h(x, y)$ и $l(x, y)$ соответственно, а $F_n(u, v)$ – энергетический спектр шума.

Приравняв правую часть (9) к правой части (8), найдем выражение для модуля пространственно-частотной характеристики линейного фильтра, уравнивающего энергетические спектры:

$$|L(u, v)| = \{ |H(u, v)|^2 + [F_n(u, v)]/[F_f(u, v)] \}^{-1/2}. \quad (10)$$

Можно показать, что характеристика (10) этого фильтра равна среднему геометрическому от характеристик винеровского и инверсного фильтров.

Пространственный спектр восстановленного изображения с учетом (10) определяется следующим образом:

$$\Phi_f(u, v) = L(u, v) G(u, v), \quad (11)$$

где $G(u, v)$ – пространственный спектр Фурье наблюдаемого изображения $g(x, y)$. Наконец, подвергнув спектр $\Phi(\cdot)$ обратному преобразованию, получим искомую оценку $\hat{f}(x, y)$ для $f(x, y)$.

Теперь рассмотрим второй вариант восстановления $h(\cdot)$ [4, 5]. В отличие от первого, использующего размытые границы перепадов яркостей, в этом случае берется информация о корреляционных свойствах сигнала (изображения) и шума на квазистационарных участках наблюдаемого изображения. Для реализации этого подхода декомпозируем наблюдаемое изображение на участке квазистационарности искажающего влияния атмосферы и рельефа на фрагменты, для каждого из которых можно записать

$$g^i(x, y) = h(x, y) * f^i(x, y) + n^i(x, y), \quad (12)$$

где звездочкой обозначена операция свертки (1), $i = 1, \dots, N$, N – количество выбранных фрагментов. Энергетический спектр каждого фрагмента согласно (9) имеет вид

$$F_g^i(u, v) = |H(u, v)|^2 F_f(u, v) + F_n(u, v), \quad i = 1, \dots, N. \quad (13)$$

Усредним энергетические спектры различных фрагментов изображения для участка квазистационарности видеоданных, при этом случайные отклонения энергетических спектров фрагментов окажутся сглаженными и усредненная оценка будет иметь вид

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_g^i(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [|H(u, v)|^2 F_f(u, v) + F_n(u, v)] = |H(u, v)|^2 \hat{F}_f(u, v) + \hat{F}_n(u, v), \quad (14)$$

где $\hat{F}_f(u, v)$ и $\hat{F}_n(u, v)$ – оценки энергетических спектров сигнала и шума соответственно. Оценку модуля передаточной функции получим из (14):

$$|H(u, v)|^2 = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_g^i(u, v) - \hat{F}_n(u, v) \right] / [\hat{F}_f(u, v)], \quad (15)$$

тогда восстанавливающий линейный оператор (10) будет иметь вид

$$|L(u, v)| = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_g^i(u, v) / [\hat{F}_f(u, v)] - \frac{\hat{F}_n(u, v)}{\hat{F}_f(u, v)} + \frac{F_n(u, v)}{F_f(u, v)} \right\}^{-1/2}; \quad (16)$$

если \hat{F}_n и \hat{F}_f близки к истинным F_n, F_f , то

$$L(u, v) \cong \left\{ \hat{F}_f(u, v) / \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_g^i(u, v) \right] \right\}^{1/2}. \quad (17)$$

Для оценивания энергетического спектра изображения и шума, используемых в (16), (17), естественно воспользоваться видеоданными, полученными за период предшествующих наблюдений и в обстановке сложившихся «хороших» условий видения. Полученное спектральное представление восстанавливающего оператора (7) используется далее в (11) для деконволюции изображения.

Таким образом, используя априорную информацию о характеристиках ландшафта, условно называемую картографическими данными, в принципе можно восстановить и передаточный оператор аэрозольных влияний атмосферы и само приземное изображение. Для практической реализации указанного подхода следует определить атмосферные ситуации и параметризовать ФРТ в зависимости от них, а также доопределить процедуру собственно восстановления $h(\cdot)$ и $f(x, y)$.

Этим вопросам предполагается посвятить следующую статью в журнале «Оптика атмосферы и океана» в 1997 г.

1. Харалик Р.М., Кэмпбелл Дж.Б., Ван Сюань. Автоматическая оценка высоты местности и моделирование сетей водосбора на основе изображений, получаемых с ИСЗ // ТИИЭР. 1985. Т. 73. N 6. С. 102–119.
2. Бейтс Р., Мак-Доннелл М. Восстановление и реконструкция изображений: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 336 с.
3. Перрен Ф. Методы оценки фотографических систем // УФН. 1962. Т. 78. Вып. 2. С. 307–344.
4. Применение цифровой обработки сигналов / Под ред. Э. Оппенгейма. М.: Мир, 1980. 552 с.
5. Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. М.: Радио и связь, 1986. 304 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
29 декабря 1996 г.

V.V. Belov, N.V. Molchunov, K.T. Protasov. **Retrieving of Space Photographs of the Earth using Cartographic Information.**

An approach is treated to development of the Earth's underlying surface images distorted by the atmosphere. The peculiarity of the approach is the fact that the point spread function used in the retrieving model is unknown and as well should be estimated. The complementary information necessary for the problem solution may be taken from the chart of gradients and stochastically homogeneous localities of the same videodata.