

АТМОСФЕРНАЯ КОРРЕКЦИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛОГО ОБЪЁМА ВЕРИФИЦИРОВАННЫХ ДАННЫХ

А.Ю. Денисова^{1,2}, В.В. Мясников^{1,2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия,

² Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

Аннотация

Предлагается метод атмосферной коррекции гиперспектральных изображений. Метод состоит из двух этапов. На первом этапе по зарегистрированному изображению определяются параметры атмосферных искажений в рамках известной модели переноса излучения. В отличие от других известных методов мы используем стандартное уравнение переноса излучения в полной (нелинейной) форме, а также линейную модель спектральной смеси как основу для описания неискажённого гиперспектрального изображения. Используя эти две математические модели одновременно, мы оцениваем параметры атмосферных искажений только по самому гиперспектральному изображению и верифицированным данным малого объёма. Последнее подразумевает набор спектральных сигнатур – неискажённых спектральных профилей определённых материалов, которые могут появляться в различных их линейных комбинациях на регистрируемом гиперспектральном изображении. Никакой прецедентной информации (множества отсчётов, содержащих известные спектральные профили) или «чистых» гиперспектральных отсчётов (содержащих только одну спектральную сигнатуру) в предлагаемом нами методе не требуется. Таким образом, метод может быть использован для идентификации модели атмосферных искажений и их последующего устранения. Представлены результаты экспериментальных исследований, демонстрирующие качественные характеристики предлагаемого метода.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, уравнение переноса излучения, гиперспектральные изображения, спектральные сигнатуры, спектральный профиль, линейная модель спектральной смеси.

Цитирование: Денисова, А.Ю. Атмосферная коррекция гиперспектральных изображений с использованием малого объёма верифицированных данных / А.Ю. Денисова, В.В. Мясников // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 4. – С. 526-534. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-526-534.

Введение

Гиперспектральные изображения (ГСИ) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) широко применяются для решения различных прикладных задач [1]. Очевидно, что качество решения задач напрямую связано с качеством анализируемых данных и возможностью устранения вносимых в них искажений. Атмосферная коррекция предназначена для устранения искажений, вносимых атмосферой. В результате атмосферной коррекции происходит восстановление информации об истинной отражательной способности (*surface reflectance*) элементов регистрируемой сцены по спектральной яркости, регистрируемой датчиком летательного аппарата (*spectral radiance at a sensor pixel, Top-of-Atmosphere radiance*).

В настоящее время существует широкий спектр методов и алгоритмов, используемых для атмосферной коррекции ГСИ ДЗЗ. Следуя классификации, принятой в работе [2], их можно разделить на три группы: эмпирические методы, методы моделирования переноса излучения и гибридные методы (оригинальные английские названия, указанные в работе [2]: *Scene-Based Empirical Approaches, Radiative Transfer Modeling (RTM) Approaches and Hybrid Approaches*).

Первая группа методов использует упрощённые математические модели, параметрически настраиваемые непосредственно по самому ГСИ или по прецедентам. В частности, метод «вычитания черного объекта» (англ.: *dark object subtraction*) [3] предназна-

чен для определения и устранения только аддитивной составляющей регистрируемого излучения и не приводит к получению истинных спектральных профилей ГСИ. Более популярный и сложный «эмпирический линейный» метод (англ.: *empirical line method*) [4] конструирует для конкретного спектрального канала линейное преобразование по прецедентам. Прецеденты задаются парами значений «коэффициент отражения поверхности» - «зарегистрированная спектральная яркость». Первая величина соответствует (пропорциональна) значению истинной спектральной яркости для отсчёта с известным спектральным профилем. Вторая величина соответствует значению спектральной яркости этого отсчёта в зарегистрированном ГСИ ДЗЗ. Таким образом, возможность использования метода ограничена ситуациями, когда мы можем указать на изображении отсчёты с известными нам спектральными профилями. Существуют и другие методы этой группы, например, QUAC (*QUick Atmospheric Correction* – быстрая атмосферная коррекция) [5], IAR (*Internal Average Reflectance* – внутренняя средняя отражательная способность) [6].

Вторая группа методов использует физическую модель распространения излучения в атмосфере для устранения вносимых ею искажений. Алгоритм ATREM (*Atmosphere Removal Algorithm* – алгоритм устранения атмосферных искажений) [7], разработанный Gao с соавторами в 1980-е годы, был одним из первых. На протяжении последующих 20 лет этот алгоритм претерпевал изменения в зависимости от использованного спо-

соба моделирования эффекта рассеивания (реализация давалась в компьютерном коде с аббревиатурами 5S-6S), выбранной модели распространения [8] и используемой спектральной базы HITRAN (*High-resolution TRANsmission molecular absorption database*). В настоящее время существует множество алгоритмов и реализующих эти алгоритмы программ атмосферной коррекции, наиболее известными из которых являются: AC-RON (*Atmosphere CORrection Now*), FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*), HATCH (*High-accuracy Atmospheric Correction for Hyperspectral Data*) [10], серия реализаций алгоритма AT-COR (*Atmospheric and Topographic Correction*), MODTRAN (*MODerate resolution atmospheric TRANsmission*) и другие. Здесь следует также указать на специфическую особенность использования алгоритмов этой группы, указанную, например, в работе [9]: «Моделирование переноса излучения требует натуральных измерений состояния и состава атмосферного спектрального профиля на момент регистрации сцены спутником, например, спектральной оптической толщины различных атмосферных компонентов... Для большинства потенциальных пользователей ... изображений, такие измерения, как правило, невозможно получить на практике, а необходимые процедуры стоят слишком дорого, чтобы использовать их в процессе работы» (с. 316, перевод авторов).

Третья группа методов сочетает в себе свойства двух предыдущих. В качестве моделей здесь используются физические модели или их упрощённые аналоги, которые уточняются по результатам съёмки и известным спектральным профилям [10–12] или их пространственной агрегации [12–13]. В обоих случаях требуется значительная информация о сцене, включающая в себя заранее известные спектральные профили территорий съёмки.

Как видно из представленного краткого анализа, все группы методов имеют свои недостатки. В настоящей работе мы предлагаем новый метод атмосферной коррекции обрабатываемого ГСИ ДЗЗ, включающий в себя одновременно и метод оценивания параметров физической модели атмосферных искажений. Специфика предлагаемого решения заключается в том, что для его выполнения оказывается достаточным только само ГСИ ДЗЗ и верифицированные данные малого объёма о регистрируемой сцене. Под верифицированными данными мы понимаем набор неискажённых спектральных профилей определённых материалов – спектральных сигнатур, которые могут появляться в различных их линейных комбинациях на регистрируемом гиперспектральном изображении. К таким материалам могут относиться, например, металл, бетон, чернозём и др. Спектральные сигнатуры подобных материалов доступны в известных спектральных базах данных, например, в упомянутой выше базе данных HITRAN. Никакой прецедентной информации (множества отсчётов, содержащих заранее известные спектральные профили) или «чистых» гиперспектральных отсчётов (содержащих одну спектральную

сигнатуру конкретного материала) в предлагаемом нами методе не требуется. В качестве модели формирования искажённого ГСИ мы используем стандартное уравнение переноса излучения в полной (нелинейной) форме, а также линейную модель спектральной смеси как основу для описания неискажённого ГСИ. Используя эти две математические модели одновременно, мы оцениваем параметры атмосферных искажений только по самому гиперспектральному изображению и верифицированным данным.

Более формально задача ставится следующим образом. Входными данными для анализа являются:

- зарегистрированное гиперспектральное изображение, содержащее атмосферные искажения;
- набор материалов, потенциально присутствующих на изображении и заданных своими спектральными сигнатурами. Заметим, что в наборе указывается только состав материалов, но не указывается их количественный вклад в отсчёты итогового изображения, то есть информация не носит количественного характера.

Задача состоит в восстановлении неискажённых отсчётов ГСИ (как линейной комбинации известных сигнатур) и оценки параметров атмосферных искажений (в рамках выбранной модели переноса излучения).

Статья организована следующим образом. В первом параграфе мы приводим методологическое обоснование метода, включающее математические модели и собственно формальную математическую постановку задачи. Во втором параграфе представлен собственно предлагаемый метод, который условно подразделён на основной и ускоренный. В третьем параграфе мы приводим результаты экспериментальных исследований по оценке эффективности предлагаемого решения. В заключении содержатся выводы и планы дальнейшей работы. Завершают работу благодарности и список использованной литературы.

1. Методология

Для оценки параметров атмосферных искажений мы предлагаем объединить две математические модели, связанные с процессом формирования и регистрации ГСИ: стандартное уравнение переноса излучения и линейную модель спектральной смеси. В рамках такой объединённой модели оказывается возможным реконструировать все неизвестные параметры уравнения переноса излучения и линейной модели спектральной смеси в результате решения определённой оптимизационной задачи. Исходными данными такой оптимизационной задачи оказываются зарегистрированное искажённое ГСИ и качественные данные о зарегистрированной сцене.

1.1. Математическая модель атмосферы

Для каждого отсчёта регистрируемого ГСИ, задаваемого пространственными координатами и длиной регистрируемого излучения, мы используем *стандартное уравнение переноса излучения* в полной (нелинейной) форме [14]:

$$L = Ap/(1-\rho^{cp}S) + B\rho^{cp} / (1-\rho^{cp}S) + C. \quad (1)$$

Здесь L – мощность светового излучения от участка Ламбертовой поверхности или её аналога, зарегистрированного в заданном отсчёте ГСИ при соответствующей длине волны. Величина ρ задаёт коэффициент отражения обозначенного выше участка поверхности для той же длины волны, а ρ^{cp} – средний (по пространственной окрестности участка) коэффициент такого отражения. Величина S задаёт сферическое альbedo атмосферы, C – яркость облачности (яркость возвратного излучения атмосферой), параметры A и B – это коэффициенты, зависящие от состояния атмосферы и геометрических параметров наблюдения и не зависящие от свойств регистрируемой поверхности.

Ниже мы используем индекс $j = \overline{0, J-1}$ для определения номера спектрального канала, \mathfrak{N} будет определять область пространственных координат ГСИ, а Θ будет задавать множество отсчётов, характеризующих окрестность некоторого пикселя. В принятой системе обозначений уравнение (1) может быть представлено в следующем дискретном виде:

$$L_j(n) = \frac{A_j \rho_j(n)}{1 - \rho_j^{cp}(n) S_j} + \frac{B_j \rho_j^{cp}(n)}{1 - \rho_j^{cp}(n) S_j} + C_j, \quad n \in \mathfrak{N}, \quad (2)$$

где $\rho_j^{cp}(n)$ является функцией неискажённых отсчётов окрестности $\rho_j(n+m)$, $m \in \Theta$:

$$\rho_j^{cp}(n) = \sum_{m \in \Theta} w_m^n \rho_j(n+m), \quad \sum_{m \in \Theta} w_m^n = 1, \quad n \in \mathfrak{N}. \quad (3)$$

Величина $L_j(n)$ определяет, таким образом, спектральную яркость, зарегистрированную сенсором с пространственной позицией n для спектрального канала j .

Задача атмосферной коррекции заключается в реконструкции коэффициентов отражения $\rho_j(n)$ по зарегистрированным величинам спектральной яркости $L_j(n)$. Однако в общем случае параметры уравнения переноса излучения A_j , B_j , C_j и S_j также оказываются неизвестными и требуют оценки.

1.2. Математическая модель ГСИ

Классической моделью ГСИ является линейная модель спектральной смеси [15]. Эта модель подразумевает, что спектральный профиль каждого неискажённого отсчёта ГСИ $\bar{\rho}(n) \equiv (\rho_0(n), \rho_1(n), \dots, \rho_{J-1}(n))^T$ является линейной комбинацией набора спектральных сигнатур $\{\bar{s}_k\}_{k=0}^{K-1}$:

$$\bar{\rho}(n) = \sum_{k=0}^{K-1} \alpha_k(n) \bar{s}_k, \quad n \in \mathfrak{N}; \quad (4)$$

$$\alpha_k(n) \geq 0, \quad \sum_{k=0}^{K-1} \alpha_k(n) = 1,$$

где $\alpha_k(n)$ – коэффициенты линейной модели, $\bar{s}_k = (s_{k0}, s_{k1}, \dots, s_{k(J-1)})^T$. Ограничения на коэффициенты, используемые в выражении (4), позволяют трактовать их как долю/порцию содержания определённого натурального материала, соответствующего конкретной спектральной сигнатуре.

1.3. Критерий и постановка задачи

В настоящей работе мы предлагаем скомбинировать модели (2) и (4) для того, чтобы оценить параметры атмосферных искажений и добиться их устранения. Чтобы избавиться от зависимых переменных, мы используем ограничения на коэффициенты в (4), положив:

$$\alpha_0(n) = 1 - \sum_{k=1}^{K-1} \alpha_k(n). \quad (5)$$

В результате задача оценки параметров атмосферных искажений, наряду с другими неизвестными параметрами объединённой модели (2) – (4), имеет вид:

$$\epsilon^2 = \sum_{n \in \mathfrak{N}} \sum_{j=0}^{J-1} (L_j(n) - \hat{L}_j(n))^2 \rightarrow \min_{\substack{\{A_j, C_j, B_j, S_j\}_{j=0, J-1} \\ \{\alpha_k(n)\}_{n \in \mathfrak{N}, k=0, K-1}}}, \quad (6)$$

где $\alpha_k(n)$ удовлетворяют соотношениям (4)–(5). Величина $L_j(n)$ обозначает наблюдаемую (зарегистрированную системой наблюдения) спектральную яркость на отсчёте сенсора n для длины волны j , в то время как $\hat{L}_j(n)$ обозначает соответствующую величину спектральной яркости, реконструированную (оцененную) по соотношениям (2) – (5).

2. Предлагаемое решение

2.1. Основной метод

Для получения ГСИ с устранёнными атмосферными искажениями необходимо решение задачи (6), после чего неискажённое ГСИ может быть реконструировано в соответствии с соотношением (4). Для нахождения решения оптимизационной задачи (5) мы предлагаем использовать градиентный метод. Тогда базовый алгоритм атмосферной коррекции, включающий в себя оценку параметров искажений и других параметров модели (2) – (5), может быть представлен следующим образом:

1. Инициализация оценок параметров модели $\hat{A}_j, \hat{B}_j, \hat{C}_j, \hat{S}_j, \hat{\alpha}_k(n)$ случайными значениями (с учётом ограничений на допустимое множество значений).

2. Выполняется на каждой итерации:

2.1. Вычисление частных производных критерия (6) по оцениваемым параметрам модели (см. ниже).

2.2. Коррекция оценок параметров модели:

$$Q_j \leftarrow Q_j + \Psi(\partial \epsilon^2 / \partial Q_j), \quad (7)$$

$$Q_j \in \{\hat{A}_j, \hat{B}_j, \hat{C}_j, \hat{S}_j\}, \quad j = \overline{0, J-1};$$

$$\hat{\alpha}_t(k) \leftarrow \hat{\alpha}_t(k) + \Psi(\partial \epsilon^2 / \partial \alpha_t(k)), \quad (8)$$

$$k \in \mathfrak{N}, t = \overline{0, K-1};$$

где величина Ψ обозначает шаг коррекции, используемый в градиентном методе.

2.3. Проверка значений оценок параметров $\hat{\alpha}_k(n)$ и коррекция их в область допустимых значений, указанную в (4).

2.4. Вычисление текущей оценки для отсчётов искажённого ГСИ $\hat{L}_j(n)$ с использованием соотношений (4) и (2).

2.5. Вычисление текущего значения критерия (6). Проверка условий останова итерационного процесса. Если условие выполнено, переход к п.3, иначе – повтор п.2 алгоритма.

3. Вычисление текущих оценок для отсчётов неискажённого ГСИ $\hat{\rho}_j(n)$ с использованием выражения (4).

Явные выражения для частных производных, использованных в соотношениях (7)–(8), представлены ниже.

$$(\partial \epsilon^2 / \partial \alpha_i(k)) = -2 \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{n \in \{k+\theta; \theta \in \Theta\} \cap \mathfrak{K}} (L_j(n) - \hat{L}_j(n)) \cdot ((1 - \hat{\rho}_j^{cp}(n) \hat{S}_j) (\hat{A}_j(s_{ij} - s_{0j}) \cdot \delta_{kn} + \hat{B}_j(s_{ij} - s_{0j}) w_{k-n}^n) + (\hat{A}_j \hat{\rho}_j(n) + \hat{B}_j \hat{\rho}_j^{cp}(n)) \hat{S}_j(s_{ij} - s_{0j}) w_{k-n}^n) / (1 - \hat{\rho}_j^{cp}(n) \hat{S}_j)^2, \tag{9}$$

$$\partial \epsilon^2 / \partial A_j = -2 \sum_{n \in \mathfrak{K}} (L_j(n) - \hat{L}_j(n)) (\hat{\rho}_j(n) / (1 - \hat{S}_j \hat{\rho}_j^{cp}(n))),$$

$$\partial \epsilon^2 / \partial B_j = -2 \sum_{n \in \mathfrak{K}} (L_j(n) - \hat{L}_j(n)) (\hat{\rho}_j^{cp}(n) / (1 - \hat{S}_j \hat{\rho}_j^{cp}(n))),$$

$$\partial \epsilon^2 / \partial C_j = -2 \sum_{n \in \mathfrak{K}} (L_j(n) - \hat{L}_j(n)),$$

$$\frac{\partial \epsilon^2}{\partial S_j} = -2 \sum_{n \in \mathfrak{K}} \left(\frac{(x_j(n) - \hat{x}_j(n)) (\hat{A}_j \hat{\rho}_j(n) + \hat{B}_j \hat{\rho}_j^{cp}(n)) \cdot \hat{\rho}_j^{cp}(n)}{(1 - \hat{S}_j \hat{\rho}_j^{cp}(n))^2} \right).$$

В представленных выражениях величины $\hat{\rho}_j(n)$ и $\hat{\rho}_j^{cp}(n)$, по аналогии с величиной $\hat{L}_j(n)$, обозначают реконструированные (оцененные) значения неискажённых спектральных профилей ГСИ.

2.2. Ускоренный метод

Основным недостатком предложенного основного метода является его значительная вычислительная сложность. Действительно, если $|\mathfrak{K}|$ – мощность множества отсчётов обрабатываемого ГСИ, то число оцениваемых в задаче (6) параметров составляет:

$$4J + |\mathfrak{K}|K,$$

где первое слагаемое определяет число неизвестных параметров атмосферных искажений, а второе – число параметров линейной модели спектральной смеси (4). Поскольку на практике число отсчётов ГСИ имеет порядок нескольких миллионов, а число спектральных каналов ГСИ – сотен, имеем: $|\mathfrak{K}| \gg J$. То есть задача (6) оказывается значительно более сложной, чем задача оценки только параметров атмосферных искажений, число которых составляет всего $4J$. Более того, выражения (9) для частных производных показывают, что на каждой итерации объём вычислений пропорционален числу отсчётов ГСИ. Естественным способом ускорения вычислений в таком случае представляется «усечение» анализируемого ГСИ до некоторой подобласти – фрагмента $\tilde{\mathfrak{K}} \subseteq \mathfrak{K}$ – и решение задачи (6) на этом фрагменте. Очевидным требованием к фрагменту, учитывая специфику вычислений основного метода, является его компактность (в обыденном, немате-

матическом, понимании). Полученные в результате оценки $\hat{A}_j, \hat{B}_j, \hat{C}_j, \hat{S}_j$ параметров атмосферных искажений могут быть использованы для коррекции всего ГСИ согласно формуле [12, 13, 14]:

$$\hat{\rho}_j(n) = \frac{L_j(n) - \hat{C}_j + \frac{\hat{A}_j}{\hat{B}_j} (L_j(n) - L_j^{cp}(n))}{\hat{A}_j + \hat{B}_j + (L_j^{cp} - \hat{C}_j) \hat{S}_j}, n \in \mathfrak{K} \setminus \tilde{\mathfrak{K}}. \tag{10}$$

Здесь $L_j^{cp}(n)$ – пространственное усреднение наблюдаемого значения яркости, вычисленное аналогично выражению (3), а смысл остальных параметров аналогичен уравнению (2).

Таким образом, предлагаемый ускоренный метод может быть представлен с использованием основного метода в виде следующих двух этапов (фрагмент $\tilde{\mathfrak{K}} \subseteq \mathfrak{K}$ полагается заданным).

Этап 1. Выполнение основного метода для фрагмента изображения $\tilde{\mathfrak{K}} \subseteq \mathfrak{K}$. Результатом выполнения этапа являются оценки $\hat{A}_j, \hat{B}_j, \hat{C}_j, \hat{S}_j$ параметров атмосферных искажений и оценки отсчётов ГСИ $\hat{\rho}_j(n), n \in \tilde{\mathfrak{K}}$.

Этап 2. Для отсчётов $n \in \mathfrak{K} \setminus \tilde{\mathfrak{K}}$ получение оценок $\hat{\rho}_j(n)$ в соответствии с выражением (10).

Примечание 1. Фактором, существенно влияющим на решение с использованием предложенного ускоренного метода, является способ выбора фрагмента $\tilde{\mathfrak{K}} \subseteq \mathfrak{K}$. Несмотря на то, что алгоритм выбора фрагмента не является предметом рассмотрения настоящей работы, исследование влияния размера фрагмента на качество получаемого решения представлено в следующем параграфе.

Примечание 2. Предложенный метод позволяет применить параллельные и/или распределённые вычисления для повышения качества итогового решения. Для этого из изображения выделяется $P > 1$ различных фрагментов $\tilde{\mathfrak{K}}_p \subseteq \mathfrak{K}$ ($p = \overline{0, P-1}$), для каждого из которых независимо (параллельно) выполняется первый этап ускоренного метода. Полученные P наборов оценок для параметров атмосферных иска-

жений усредняются, после чего выполняется второй этап метода для отсчётов $n \in \mathfrak{K} \setminus \bigcup_{p=0, P-1} \tilde{\mathfrak{K}}_p$. Влияние эффекта распараллеливания на результат в настоящей работе не рассматривается.

3. Экспериментальные исследования

В данном разделе представлены результаты экспериментальных исследований предложенного метода оценки параметров атмосферных искажений и коррекции ГСИ. Экспериментальные исследования были проведены в среде MATLAB для набора синтезированных ГСИ следующим образом. Вначале мы синтезировали набор из $N \equiv |\mathfrak{K}|$ отсчётов ГСИ с J спектральными компонентами в соответствии с моделью (4). Синтезируемые (неискажённые) отсчёты вычислялись как линейная комбинация спектральных сигнатур, взятых со случайными коэффициентами спектральной смеси. Компоненты (спектральные отсчёты) сигнатур и коэффициенты смесей генерировались как реализации случайной величины с равномерным на интервале $[0, 1]$ законом распределения. Для удовлетворения условия нормировки (4) полученные коэффициенты линейной смеси делились на их сумму. Число синтезированных сигнатур составляло K .

Далее генерировались используемые в модели (2) коэффициенты атмосферных искажений. Для получения значений, соответствующих физическим условиям наблюдения, мы генерировали коэффициенты атмосферных искажений как реализации равномерных случайных величин со следующими интервалами: $A_j, B_j \in [0, 6, 1], S_j \in [0, 2, 0, 6], C_j \in [0, 0, 2], j = 0, J - 1$. В завершение, неискажённые отсчёты ГСИ преобразовывались в «наблюдаемые» величины в соответствии с соотношением (2). Эти данные использовались в качестве исходных данных в экспериментах.

Дополнительно заметим, что эксперименты проводились при следующих значениях параметров:

- при вычислении $\rho_j^p(n)$ использовалась область из трёх отсчётов с равными значениями коэффициентов;
- число итераций градиентного метода – 100000, шаг градиентного алгоритма $\Psi = 0,0001$;
- каждый эксперимент проводился $T=5$ раз, полученные оценки точности восстановления коэффициентов, выносимые на графики, усреднялись. Точность оценок коэффициентов атмосферных искажений оценивалась величиной среднеквадратического отклонения от их истинных значений (*root mean square error* – RMSE):

$$\varepsilon_A = \sqrt{\frac{1}{J} \sum_{j=0}^{J-1} (A_j - \hat{A}_j)^2}, \quad \varepsilon_B = \sqrt{\frac{1}{J} \sum_{j=0}^{J-1} (B_j - \hat{B}_j)^2},$$

$$\varepsilon_C = \sqrt{\frac{1}{J} \sum_{j=0}^{J-1} (C_j - \hat{C}_j)^2}, \quad \varepsilon_S = \sqrt{\frac{1}{J} \sum_{j=0}^{J-1} (S_j - \hat{S}_j)^2}. \quad (11)$$

Целью экспериментов было подтверждение работоспособности предложенного метода и определение влияния на точность оценки параметров атмосферных искажений и отсчётов неискажённых ГСИ ряда факторов:

- аддитивного шума, искажающего наблюдаемые отсчёты ГСИ;
- размера выбираемого фрагмента ГСИ;
- степени переопределённости набора гиперспектральных сигнатур.

Для определения влияния шума на результаты оценивания неизвестных параметров и атмосферной коррекции мы добавляли к отсчётам ГСИ аддитивный независимый шум с Гауссовым законом распределения, отношение сигнал/шум (*signal to noise ratio* – SNR) варьировалось в диапазоне $SNR > 15$. На рис. 1 представлены результаты этого эксперимента. Заметим, что для типичных ГСИ коэффициент SNR имеет значения не ниже 15 [16]. И, как можно видеть из графика, метод обеспечивает для этого диапазона высокое качество оценивания параметров атмосферных искажений. Таким образом, полученные результаты позволяют утверждать об устойчивости предложенного метода к шуму.

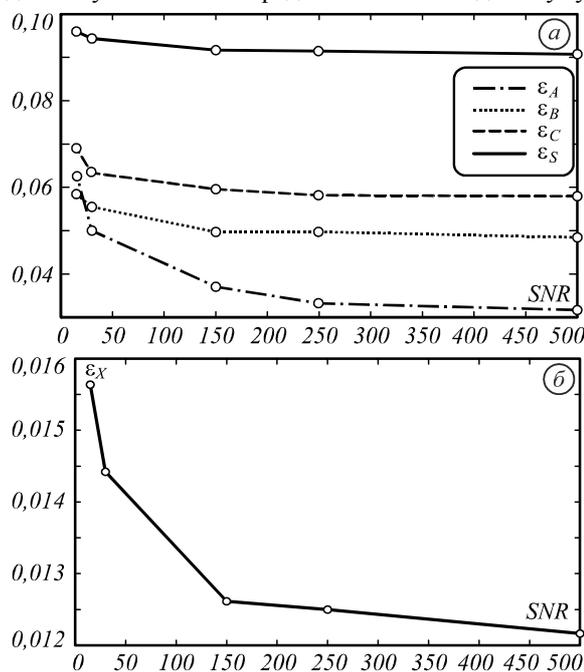


Рис. 1. Средняя величина RMSE оценок параметров (а), оценок отсчётов неискажённых ГСИ (б) для различных значений SNR ($N = 25, J = 50, K = 10$)

Для определения влияния размера фрагмента на результаты оценивания неизвестных параметров и атмосферной коррекции мы использовали из $N=100$ отсчётов ряд фрагментов (размеры: 25, 50, 100), по которым и производилось оценивание искомых параметров. На рис. 2 представлены результаты этого эксперимента. Шумовые искажения в этом эксперименте отсутствовали. И, как можно видеть из графика, чем меньше размер фрагмента, тем больше ошибка оценивания. Однако даже для наименьшего фрагмента (25 % от исходного размера ГСИ) качество оценивания остается достаточно высоким. Это подтверждает гипотезу, что нет необходимости использовать все данные при решении только задачи оценивания атмосферных искажений и можно использовать предложенный в настоящей работе ускоренный метод.

Целью последнего эксперимента было определение влияния на результаты оценивания степени переопределённости набора гиперспектральных сигнатур. Под переопределённым набором гиперспектральных сигнатур здесь понимается ситуация, когда качественные данные о сцене, подразумевающие набор спектральных сигнатур, указаны неточно и содержат сигнатуры, которые на сцене заведомо не присутствуют. При моделировании данная ситуация соответствует случаю, когда часть коэффициентов, соответствующая заранее

выбранным сигнатурам, в линейной модели спектральной смеси полагается равной нулю для всех отсчётов ГСИ. Общее число использованных сигнатур обозначается $KBig$, число сигнатур с ненулевыми коэффициентами – K . Данный эксперимент был проведён для демонстрации того, что предложенный метод может быть использован даже тогда, когда качественные данные о сцене неточны. На рис. 3 представлены результаты этого эксперимента.

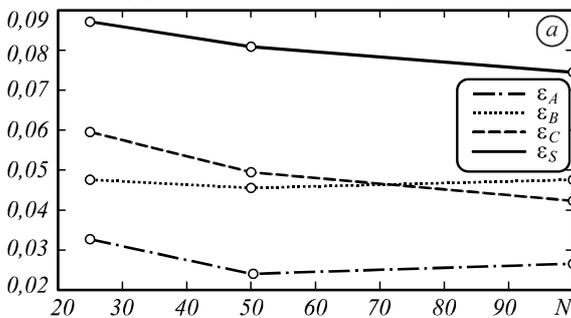


Рис. 2. Средняя величина RMSE оценок параметров (а), оценок отсчетов неискаженных ГСИ (б) для различных размеров фрагмента N ($J = 50, K = 10$)

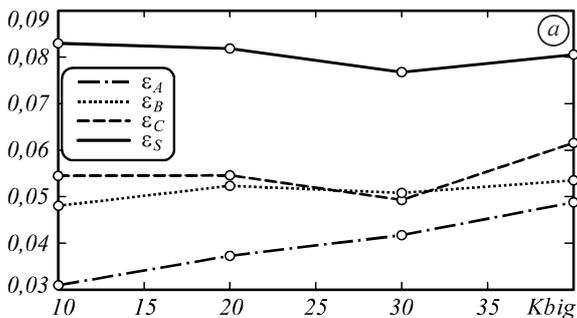
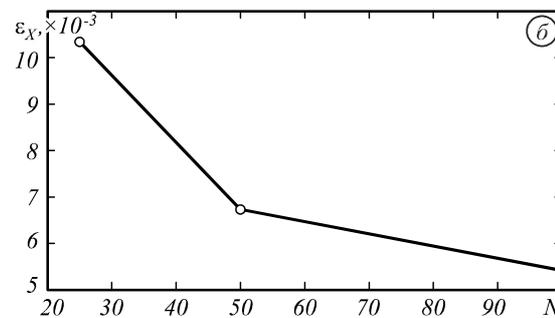
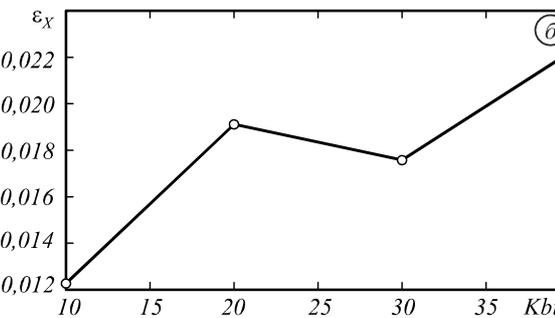


Рис. 3. Средняя величина RMSE оценок параметров (а), оценок отсчетов неискаженных ГСИ (б) для различного количества спектральных сигнатур ($N = 25, J = 50$)



Значения K и $KBig$ были, соответственно, 10 и 10, 20, 30, 40. Из графика видно, что среднюю ошибку коэффициентов можно считать практически постоянной, кроме ошибки оценки A_j , которая возрастает с увеличением степени переопределённости, что ведёт, очевидно, к росту общей ошибки оценки неискажённых отсчётов ГСИ. В целом, учитывая, что каждый из коэффициентов имеет реальный диапазон $[0,1]$, происходящие изменения оценок на одну-две сотых (при кратном увеличении числа сигнатур) представляется несущественным. То есть можно утверждать, что предложенный метод устойчив к шуму на ГСИ и появлению избыточных сигнатур.

параметров он не требует никакой прецедентной информации и/или «чистых» отсчётов ГСИ. Таким образом, метод может быть использован для идентификации модели атмосферных искажений и их последующего устранения. Проведённые экспериментальные исследования продемонстрировали работоспособность метода, его устойчивость к шумовым искажениям ГСИ, ошибкам в указываемой информации (набор используемых сигнатур). Показано, что оценка параметров атмосферных искажений может быть выполнена на фрагменте (или фрагментах) ГСИ, что позволяет рассматривать предложенный метод как удобный прототип для параллельной и/или распределённой реализации.

Также он требует относительно небольшого числа отсчётов ГСИ для решения задачи оценивания, что делает его достаточно привлекательным для параллельной реализации.

Дальнейшим направлением исследований является разработка параллельной и/или распределённой версии предложенного метода.

Заключение

Благодарности

В работе предложен метод оценки параметров атмосферных искажений ГСИ и их атмосферной коррекции на основании собственно искажённого ГСИ и качественных данных о регистрируемой сцене. Основным достоинством предложенного метода по сравнению с существующими является то, что для получения оценок

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке:

- Российского научного фонда (РНФ), грант №14-31-00014 «Создание лаборатории прорывных исследований дистанционного зондирования Земли». Результаты изложены в параграфах «Методология» и «Предлагаемое решение»;

- грантов Российского фонда фундаментальных исследований №16-37-00043_мол_а, №15-07-01164-а. Результаты изложены в параграфе «Экспериментальные исследования».

Литература

1. **Bioucas-Dias, J.M.** Hyperspectral remote sensing data analysis and future challenges / J.M. Bioucas-Dias, A. Plaza, G. Camps-Valls, P. Scheunders, N.M. Nasrabadi, J. Chanussot // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. – 2013. – Vol. 1(2). – P. 6-36. – DOI: 10.1109/MGRS.2013.2244672.
2. **Gao, B.** A review of atmospheric correction techniques for hyperspectral remote sensing of land surfaces and ocean color / B. Gao, C.O. Davis, A.F.H. Goetz // *IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*. – 2006. – P. 1979-1981. – DOI: 10.1109/IGARSS.2006.512.
3. **Chavez, P.S.** An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data / P.S. Chavez // *Remote Sensing of Environment*. – 1988. – Vol. 24. – P. 459-457. – DOI: 10.1016/0034-4257(88)90019-3.
4. **Conel, J.E.** AIS-2 radiometry and a comparison of methods for the recovery of ground reflectance / J.E. Conel, R.O. Green, G. Vane, C.J. Bruegge, R.E. Alley // *Proceedings of the 3rd Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop*. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, 1987. – P. 18-47.
5. **Bernstein, L.S.** Quick atmospheric correction code: Algorithm description and recent upgrades / L.S. Bernstein, X. Jin, B. Gregor, S. Adler-Golden // *Optical Engineering*. – 2012. – Vol. 51(11). – 111719 (11 p). – DOI: 10.1117/1.OE.51.11.111719.
6. **Kruse, F.A.** Use of airborne imaging spectrometer data to map minerals associated with hydrothermally altered rocks in the northern Grapevine Mountains, Nevada and California / F.A. Kruse // *Remote Sensing of Environment*. – 1988. – Vol. 24. – P. 31-35. – DOI: 10.1016/0034-4257(88)90004-1.
7. **Gao, B.-C.** Derivation of scaled surface reflectances from AVIRIS data / B.-C. Gao, K.H. Heidebrecht, A.F.H. Goetz // *Remote Sensing of Environment*. – 1993. – Vol. 44. – P. 165-178. – DOI: 10.1016/0034-4257(93)90014-O.
8. **Gao, B.-C.** Development of a line-by-line-based atmosphere removal algorithm for airborne and spaceborne imaging spectrometers / B.-C. Gao, C.O. Davis // *SPIE Proceedings*. – 1997. – Vol. 3118. – P. 132-141. – DOI: 10.1117/12.283822.
9. **Wu, J.** Image-based atmospheric correction of QuickBird imagery of Minnesota cropland / J. Wu, D. Wang, M.E. Bauer // *Remote Sensing of Environment*. – 2005. – Vol. 99. – P. 315-325. – DOI: 10.1016/j.rse.2005.09.006.
10. **Goetz, A.F.H.** Using ground spectral irradiance for model correction of AVIRIS data / A.F.H. Goetz, K.B. Heidebrecht, B. Kindel, J.W. Boardman // *Summaries of the Seventh JPL Airborne Earth Science Workshop* January 12-16, 1998. – 1998. – Vol. 1. – P. 159-168.
11. **U.S. Patent 20,150,161,768 G06T 5/00, G06K 9/62, G06K 9/46, 382/113.** Methods for in-scene atmospheric compensation by endmember matching / J.P. Ardouin, V. Ross, filed of December 11, 2013, published of June 11, 2015.
12. **Belov, A.M.** Atmospheric correction of hyperspectral images based on approximate solution of transmittance equation / A.M. Belov, V.V. Myasnikov // *Proceedings of SPIE: Seventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2014)*. – 2015. – Vol. 9445. – 94450S (5 pp). – DOI: 10.1117/12.2181364.
13. **Белов, А.М.** Атмосферная коррекция гиперспектральных изображений с помощью приближённого решения уравнения переноса MODTRAN / А.М. Белов, В.В. Мясников // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 489-493.
14. **Xu, Y.** Atmospheric correction of hyperspectral data using MODTRAN model / Y. Xu, R. Wang, S. Liu, S. Yang, B. Yan // *Proceedings of SPIE*. – 2008. – Vol. 7123. – 712306 (7 pp.). – DOI: 10.1117/12.815552.
15. **Keshara, N.** A survey of spectral unmixing algorithms / N.A. Keshara // *Lincoln Laboratory Journal*. – 2003. – Vol. 14(1). – P. 55-78.
16. **Kruse, F.A.** Comparison of airborne hyperspectral data and EO-1 Hyperion for mineral mapping / F.A. Kruse, J.W. Boardman, J.F. Huntington // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2003. – Vol. 41(6). – P. 1388-1400. – DOI: 10.1109/TGRS.2003.812908.

Сведения об авторах

Денисова Анна Юрьевна, 1988 года рождения, в 2011 году окончила Самарский государственный аэрокосмический университет (ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва) по специальности «Прикладная математика и информатика». В 2014 году защитила диссертацию на соискание степени кандидата технических наук. Работает младшим научным сотрудником в НИЛ-97 Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва и по совместительству в Институте систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: обработка изображений, геоинформационные системы. E-mail: denisova_ay@geosamara.ru.

Мясников Владислав Валерьевич, 1971 года рождения. В 1994 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет (СГАУ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва). В 1995 году поступил в аспирантуру СГАУ, в 1998 году защитил диссертацию на соискание степени кандидата технических наук, а в 2008 – диссертацию на соискание степени доктора физико-математических наук. В настоящее время работает ведущим научным сотрудником НИЛ-97 и профессором кафедры геоинформатики и информационной безопасности Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва, а также ведущим научным сотрудником в Институте систем обработки изображений РАН. Круг научных интересов включает цифровую обработку сигналов и изображений, компьютерное зрение, распознавание образов, искусственный интеллект и геоинформатику. E-mail: vmvas@smr.ru.

ГРНТИ: 28.21.15, 28.17.19, 89.57.35, 89.57.45

Поступила в редакцию 19 августа 2016 г. Окончательный вариант – 26 августа 2016 г.

ATMOSPHERIC CORRECTION OF HYPERSPECTRAL IMAGES USING SMALL VOLUME OF THE VERIFIED DATA

A.Y. Denisova^{1,2}, V.V. Myasnikov^{1,2}

¹ Samara National Research University, Samara, Russia,

² Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia

Abstract

In this article, we propose a novel method for atmospheric correction of hyperspectral imagery. At the first stage, the atmospheric correction parameters are derived from a scene image using a well-known radiation transfer model. In contrast to the other methods, we apply the standard equation of radiation transfer in a nonlinear form to describe atmospheric effects and a linear spectral mixture model to describe the unknown undistorted hyperspectral image. Applying both of these mathematical models simultaneously, we estimate the parameters of atmospheric correction using the hyperspectral image itself and the verified data about the registered scene. The verified data is taken to mean a set of (undistorted) spectral signatures, which can be presented in different linear combinations in the registered scene. Neither precedential information (a set of pixels containing predefined spectral signatures) nor pure hyperspectral pixels are required in our method. Therefore, the proposed method can be applied for the identification of a model of atmospheric distortions and their subsequent correction. The experimental results presented in the article demonstrate qualitative characteristics of the proposed method.

Keywords: Earth remote sensing, radiation transfer equation, hyperspectral images, spectral signatures, spectral profile, linear spectral model.

Citation: Denisova AY, Myasnikov VV. Atmospheric correction of hyperspectral images using small volume of the verified data. *Computer Optics*. 2016; 40(4): 526-534. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-526-534.

Acknowledgements: This work was financially supported by the Russian Science Foundation (RSF), grant no. 14-31-00014 (“Establishment of a Laboratory of Advanced Technology for Earth Remote Sensing”), with the relevant results described in the “Methodology” and “Proposed Solution” Sections. The “Experimental results” Section was financially supported by the RFBR grants 16-37-00043_mol_a and 15-07-01164-a.

References

- [1] Bioucas-Dias JM, Plaza A, Camps-Valls G, Scheunders P, Nasrabadi NM, Chanussot J. Hyperspectral remote sensing data analysis and future challenges. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* 2013; 1(2): 6-36. DOI: 10.1109/MGRS.2013.2244672.
- [2] Gao B, Davis CO, Goetz AFH. A review of atmospheric correction techniques for hyperspectral remote sensing of land surfaces and ocean color. 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing 2006: 1979-1981. DOI: 10.1109/IGARSS.2006.512.
- [3] Chavez PS. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment* 1988; 24: 459-479. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90019-3.
- [4] Conel JE, Green RO, Vane G, Bruegge CJ, Alley RE. AIS-2 radiometry and a comparison of methods for the recovery of ground reflectance. *Proceedings of the 3rd Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop*. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory; 1987: 18-47.
- [5] Bernstein LS, Jin X, Gregor B., Adler-Golden S. Quick atmospheric correction code: algorithm description and recent upgrades. *Optical Engineering* 2012; 51(11): 111719. DOI: 10.1117/1.OE.51.11.111719.
- [6] Kruse FA. Use of airborne imaging spectrometer data to map minerals associated with hydrothermally altered rocks in the northern Grapevine Mountains, Nevada and California. *Remote Sensing of Environment*, 1988; 24: 31-51. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90004-1.
- [7] Gao B-C, Heidebrecht KH, Goetz AFH. Derivation of scaled surface reflectances from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment* 1993; 44: 165-178. DOI: 10.1016/0034-4257(93)90014-O.
- [8] Gao B-C, Davis CO. Development of a line-by-line-based atmosphere removal algorithm for airborne and spaceborne imaging spectrometers. *Proc SPIE* 1997; 3118: 132-141. DOI: 10.1117/12.283822.
- [9] Wu J, Wang D, Bauer ME. Image-based atmospheric correction of QuickBird imagery of Minnesota cropland. *Remote Sensing of Environment* 2005; 99: 315-325. DOI: 10.1016/j.rse.2005.09.006.
- [10] Goetz AFH, Heidebrecht KB, Kindel B, Boardman JW. Using ground spectral irradiance for model correction of AVIRIS data. *Summaries of the Seventh JPL Airborne Earth Science Workshop* January 12-16, 1998; 1: 159-168.
- [11] Ardouin JP, Ross V. Methods for in-scene atmospheric compensation by endmember matching. Patent U.S. 20150161768, filed of December 11, 2013, published of June 11, 2015.
- [12] Belov AM, Myasnikov VV. Atmospheric correction of hyperspectral images based on approximate solution of transmittance equation. *Seventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2014)*. International Society for Optics and Photonics 2015: 94450S. DOI: 10.1117/12.2181364.
- [13] Belov AM, Myasnikov VV. Atmospheric correction of hyperspectral images using approximate solution of MODTRAN transmittance equation. *Computer optics* 2014; 38(3): 489-493.

- [14] Xu Y, Wang R, Liu S, Yang S, Yan B. Atmospheric correction of hyperspectral data using MODTRAN model. Proc SPIE 2008; 7123: 712306. DOI: 10.1117/12.815552.
- [15] Keshava NA. Survey of Spectral Unmixing Algorithms. Lincoln Laboratory Journal 2003; 14(1): 55-78.
- [16] Kruse FA, Boardman JW, Huntington JF. Comparison of airborne hyperspectral data and EO-1 Hyperion for mineral mapping. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2003; 41(6): 1388-1400. DOI: 10.1109/TGRS.2003.812908.
-

Authors' information

Anna Yurievna Denisova (b. 1988). Graduated from Samara State Aerospace University (presently, S. P. Korolyov Samara National Research University) in 2011, obtaining Master's degree in Mathematics and Computer Science. She received the candidate's degree in Technical Sciences in 2014. Currently, she works at laboratory No. 97 at Samara National Research University and at the Image Processing Systems Institute of the RAS. Areas of research interest include image processing and geoinformational systems. E-mail: denisova_ay@geosamara.ru.

Vladislav Valerievich Myasnikov (1971 b.), graduated (1994) from S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (presently, S. P. Korolyov Samara National Research University). He received his candidate's degree in Technical Sciences (2002) and DrSc degree in Physics & Maths (2008). At present he is a leading researcher at laboratory No. 97 at Samara National Research University and at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences, also holding a part-time position of an Associate Professor at the Geoinformatics and Information Security department at Samara National Research University. Areas of research interests include digital signals and image processing, geoinformatics, neural networks, computer vision, pattern recognition and artificial intelligence. E-mail: vmyas@smr.ru.

Received August 19, 2016. The final version – August 26, 2016.
