

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДА АТМОСФЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ ОСНОВАННОГО НА ПРИБЛИЖЁННОМ РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА MODTRAN

А.М. Белов, В.В. Мясников

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

В работе представлены исследования практической применимости ранее разработанного авторами метода атмосферной коррекции гиперспектральных изображений полученных с помощью космической съёмки. Метод основан на приближённом решении уравнения переноса модели MODTRAN с использованием совместного анализа атмосферно-искажённого и идеального гиперспектральных изображений одной и той же местности. Приведены результаты экспериментальных исследований качества атмосферной коррекции с помощью предложенного метода в условиях имитирующих практическое использование.

1. ВВЕДЕНИЕ

Атмосферная коррекция данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) является одним из важнейших этапов их предварительной обработки. Отличия детектируемой на борту космического аппарата (КА) освещенности поверхности от истинной, зависят от множества факторов: угол склонения солнца, положение и угол съёмки КА, состав и влажность атмосферы и т.д. Все эти факторы могут быть учтены в обобщённом уравнении переноса [1]. Однако, даже используя столь детальную модель атмосферы, достаточно сложно точно решить задачу атмосферной коррекции, ввиду большого количества неизвестных параметров, значения которых требуют значительного числа наземных и метеорологических наблюдений. Кроме того, в общем случае наблюдаемая поверхность не является ламбертовой, и для моделирования отражающей способности такой поверхности требуется построение двунаправленной функции распределения отражения, что также требует лабораторных исследований структурных и оптических свойств материалов [1].

В данной работе исследуется практическая применимость метода проведения атмосферной коррекции гиперспектральных ДЗЗ, основанного на приближённой оценке параметров упрощенного уравнения переноса модели MODTRAN [2]. Такой подход исключает необходимость явного моделирования прохождения света через атмосферу, задача сводится к определению неизвестных коэффициентов уравнения. Однако, для такого решения требуется идеальное (т.е. свободное от атмосферных искажений) изображение той же местности. В качестве такого изображения предлагается использовать гиперспектральные изображения (ГСИ), полученные с помощью съёмки с низколетящих летательных аппаратов (ЛА) или со стационарных гиперспектрометров. Очевидно, что в такой постановке пространственное разрешение идеальных изображений будет отличаться от пространственного разрешения атмосферно-искажённого изображения. Кроме того мозаика, собранная из идеальных изображений может не полностью покрывать атмосферно-искажённое изображение.

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МЕТОДА

В модели атмосферы MODTRAN используется следующее упрощение уравнения переноса [4]:

$$L(i, j) = \frac{A\rho(i, j)}{1 - \rho_e(i, j)S} + \frac{B\rho_e(i, j)}{1 - \rho_e(i, j)S} + L_a \quad (1)$$

где $i = 1 \dots M, j = 1 \dots N$ координаты в плоскости изображения, $L(i, j)$ – детектируемая освещённость, $\rho(i, j) = \rho(i, j, \lambda)$ – коэффициент отражения для пикселя заданного канала, $\rho_e(i, j)$ – средний коэффициент отражения для пикселя и его ближайшей области, L_a – яркость рассеянная атмосферой назад, A, B – коэффициенты, которые зависят от атмосферных условий, S – сферическое альbedo атмосферы.

В общем случае значения A, B, S, L_a вычисляются посредством модели MODTRAN [3], однако, для точного вычисления этих параметров необходимо иметь модель атмосферы согласованную с местом, временем и погодными условиями съёмки. При отсутствии всех необходимых параметров модели атмосферы выполнить атмосферную коррекцию можно посредством приближённого решения уравнения (1).

По точкам идеального изображения можем определить $\rho(i, j)$ и $\rho_e(i, j)$. По точкам атмосферно-искажённого изображения можем определить $L(i, j)$. Таким образом, необходимо определить четыре неизвестных параметра: A, B, S, L_a . Уравнение (2) является квадратичным, относительно неизвестных параметров. Однако, зафиксировав некоторое значение $L_a = L_a^*$, можно перейти к линейному уравнению относительно неизвестных A, B, S . Таким образом, записав уравнение (2) для каждой пары соответствующих точек идеального и атмосферно-искажённого изображений, получим переопределённую систему из MN линейных уравнений тремя неизвестными A, B, S .

$$\begin{cases} A\rho(1,1)+B\rho_e(1,1)+S\rho_e(1,1)\left(L(1,1)-L_a^*\right)=L(1,1)-L_a^* \\ A\rho(1,2)+B\rho_e(1,2)+S\rho_e(1,2)\left(L(1,2)-L_a^*\right)=L(1,2)-L_a^* \\ \dots \\ A\rho(M,N)+B\rho_e(M,N)+S\rho_e(M,N)\left(L(M,N)-L_a^*\right)=L(M,N)-L_a^* \end{cases} \quad (2)$$

Для определения неизвестных параметров целесообразно воспользоваться методом наименьших квадратов.

Фиксированное значение параметра $L_a = L_a^*$ определяется из предположения, что оно принадлежит диапазону $[0, \min L_a(i, j)]$. При переборе значений интервала, с некоторым шагом ΔL_a , для каждого значения $L_a^* = k\Delta L_a, k \in \mathbb{N}$ находится решение $x^* = [A \ B \ S]$ системы (2) и выбирается то решение, которое обеспечивает минимальную ошибку.

Коррекция атмосферно-искажённого изображения производится согласно формуле [4]:

$$\rho = \frac{L(i, j) - L_a + \frac{A}{B}(L(i, j) - L_e(i, j))}{A + B + (L_e(i, j) - L_a)S}, \quad (3)$$

где $L_e(i, j)$ - пространственное усреднение наблюдаемого значения яркости, а смысл остальных параметров аналогичен уравнению (1).

После нахождения оптимального значения L_a^* и вектора параметров $x = [A \ B \ S]$, по рассчитанному набору параметров можно провести коррекцию произвольного атмосферно-искажённого изображения снятого в аналогичных условиях, согласно уравнению (3).

3. КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ

В описанных далее экспериментальных исследованиях применяется критерий качества атмосферной коррекции, который основан на сопоставлении идеального и скорректированного ГСИ.

Пусть \tilde{I} - идеальное изображение, а \hat{I} - скорректированное изображение, размеры изображений $M \times N$ и каждое изображение имеет K спектральных каналов, тогда критерием качества атмосферной коррекции для канала k будем считать величину ε_k , определяемую по формуле:

$$\varepsilon_k = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\tilde{I}_k(i, j) - \hat{I}_k(i, j))^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \tilde{I}_k(i, j)^2},$$

Общим критерием качества для пары изображений будем считать величину ε :

$$\varepsilon = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \varepsilon_k,$$

По сути, представленный критерий представляет собой усредненное по каналам попарное среднеквадратичное отклонение между каналами идеального и скорректированного ГСИ, нормированное на динамический диапазон канала «идеального» изображения.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исходной постановке задачи предполагается, что идеальные изображения могут быть получены из другого источника более высокого разрешения, и эти изображения могут не полностью покрывать атмосферно-искажённое изображение. Были проведены экспериментальные исследования имитирующие проведение атмосферной коррекции в таких условиях. В качестве атмосферно искажённого изображения использовалось ГСИ JasperRidge98av.tif, полученное с ЛА Aviris. В качестве идеального изображения рассматривалось атмосферно искажённое ГСИ скорректированное алгоритмом FLAASH.

Для определения работоспособности алгоритма в условиях, когда пространственное разрешение идеального и атмосферно-искажённого изображения различны были проведены следующие экспериментальные исследования:

Из исходного идеального изображения был вырезан фрагмент размером 256*256 отсчётов. Полученный фрагмент был подвергнут изменению разрешения по обоим измерениям в 2, 3 и 4 раза соответственно. Растяжение изображения проводилось посредством дублирования. Аналогичным образом полученный фрагмент был подвергнут сжатию 2 и 4 раза соответственно. Сжатие производилось посредством усреднения значений соседних отсчётов. По полученным фрагментам были рассчитаны параметры уравнения переноса. По рассчитанным наборам параметров была произведена коррекция атмосферно-искажённого изображения. Затем, для полученных скорректированных изображений был рассчитан критерий качества ε . На рисунке 1 представлена зависимость критерия качества ε от параметра изменения пространственного разрешения E , для случаев растяжения и сжатия соответственно.

По представленным графикам видно, что критерий качества практически не меняется, для случая увеличения пространственного разрешения, и значительно растёт, для случая уменьшения пространственного разрешения. На основании чего можно сделать вывод, что использование разработанного алгоритма в условиях, когда пространственное разрешение идеального изображения выше, чем пространственное разрешение искажённого изображения – допустимо, и нежелательно в обратном случае.

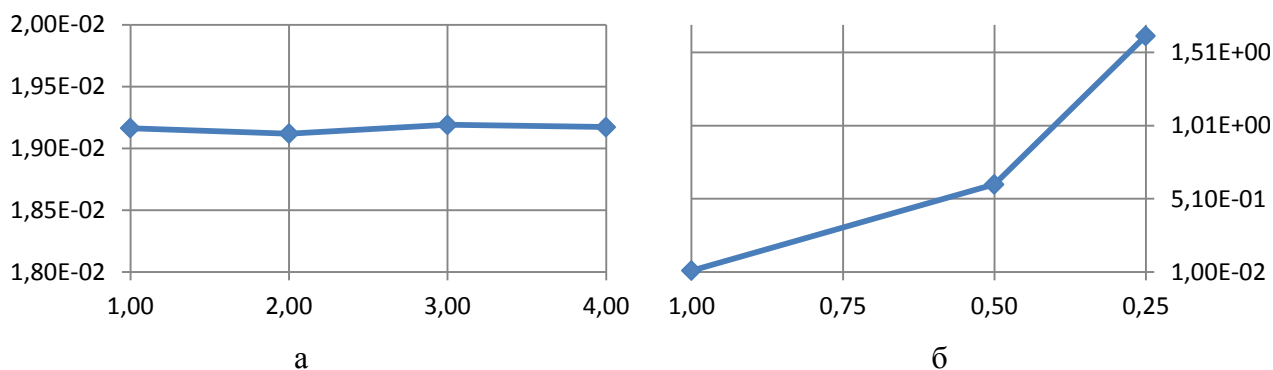


Рисунок 1 – Зависимость критерия качества ε от значения коэффициента изменения пространственного разрешения E идеального изображения а) увеличение разрешения, б) уменьшение разрешения.

Для определения влияния процента перекрытия искажённого и идеального изображений S были проведены следующие экспериментальные исследования:

Исходное идеальное изображение было нарезано на фрагменты, покрывающие от 90 до 10 % исходного атмосферно-искажённого изображения по горизонтали (слева направо) и по вертикали (сверху вниз). Далее по этим фрагментам были рассчитаны параметры уравнения переноса. По рассчитанным наборам параметров была произведена коррекция атмосферно-искажённого изображения. Затем, для полученных скорректированных изображений был рассчитан критерий качества ε . На рисунке 2 представлена зависимость критерия качества ε от процента покрытия S исходного атмосферно-искажённого изображения, для обоих случаев.

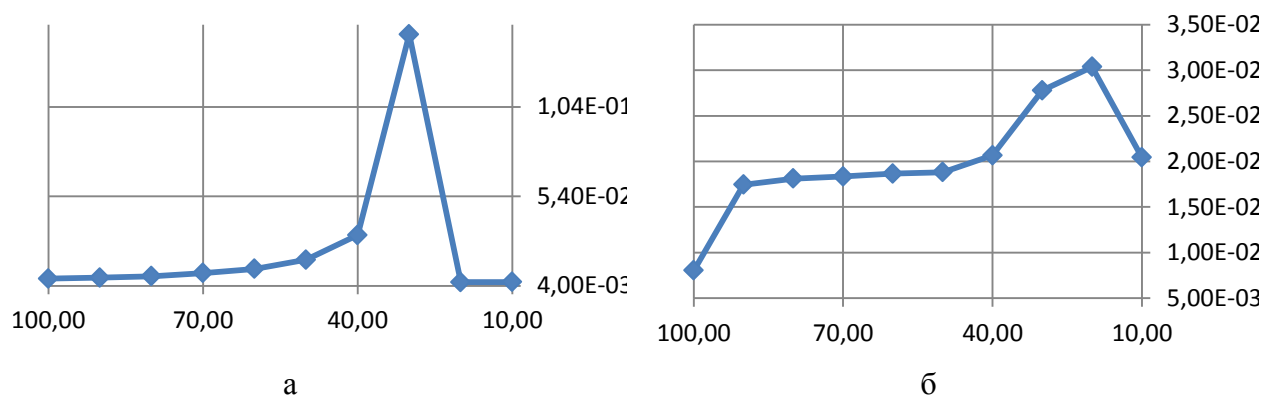


Рисунок 2 – Зависимость критерия качества ε от процента покрытия S атмосферно-искажённого изображения а) нарезка фрагментов сверху вниз, б) нарезка фрагментов справа налево.

Резкий рост качества атмосферной коррекции на 20 и 10% оказался несколько неожиданным в связи, с чем были проведены дополнительные исследования. Была исследована зависимость критерия ε_k от процента покрытия атмосферно-искажённого изображения по каждому спектральному каналу в отдельности. Примеры зависимостей приведены на рисунке 3. Исследования показали, что такой спад критерия качества ε_k при низких значениях S характерен для каналов 144-224, для каналов 1-143 зависимость критерия качества ε_k от процента покрытия S монотонно возрастает.

Статистический анализ идеального изображения показал, что каналы 144-224 содержат значительное количество статистических выбросов, что, по всей видимости, является недостатком алгоритма атмосферной коррекции FLAASH. Этим и объясняется то, что при уменьшении выборки получается лучшее решение. В перспективе эту проблему можно решить, дополнив алгоритм оценки параметров уравнения переноса методом устранения выбросов.

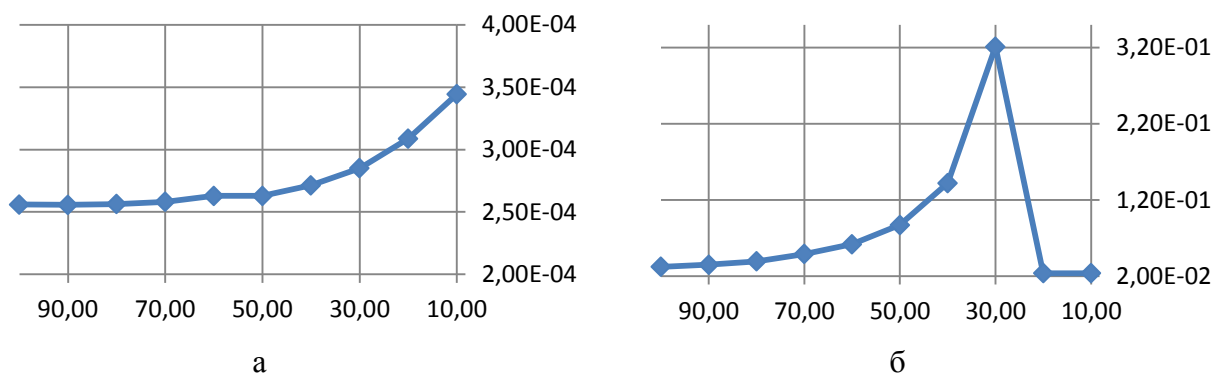


Рисунок 3 – Зависимость критерия качества ε_k от процента покрытия S атмосферно-искажённого изображения для случая нарезки фрагментов сверху вниз а) спектральный канал 20, б) спектральный канал 180.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования показали, что предложенный авторами метод применим для решения практических задач атмосферной коррекции гиперспектральных изображений. Различия значений отражающей способности на скорректированном и идеальном ГСИ для части спектральных каналов говорит о том, что метод требует дополнительных исследований и доработки в части предобработки исходных данных с целью устранения статистических выбросов

Литература

1. R. Schowengerdt. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing (3rd Edition), Academic Press (2006).
2. X. Yuanliu, W. Runsheng, L. Shengwei, Y. Suming, Y. Bokun, "Atmospheric correction of hyperspectral data using MODTRAN model" SPIE Proceedings Vol. 7123, (2003).
3. F.X. Kneizys, D.C. Robertson, L.W. Abreu, P. Acharya, G.P. Anderson, L.S. Rothman, J.H. Chetwynd, J.E.A. Selby, E.P. Shettle, W.O. Gallery, A. Berk, S.A. Clough, L.S. Bernstein. The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN 7 MODEL, Ontar Corporation (1996).