

Учет передаточной функции атмосферы при дистанционном зондировании Земли по спектротрическим спутниковым измерениям

В. С. Джена-Петрова

Институт космических исследований БАН

Интенсивное развитие систем геокосмических исследований [1, 2, 3, 4] определяет разработку специализированных методов и средств для определения параметров подстилающей поверхности и атмосферы по спутниковым данным. Дистанционное зондирование (ДЗ) природных ресурсов из Космоса в оптическом диапазоне основывается на регистрации отраженного от Земной поверхности и рассеянного в атмосфере электромагнитного излучения, которое зависит: 1) от отражательной способности исследуемого участка; 2) от состава атмосферы; 3) от взаимного расположения источника излучения, облучаемой поверхности и датчика; 4) от отражательной способности поверхности, окружающей наблюдаемый участок.

Учет влияния атмосферы при ДЗ необходим при решении следующих задач: 1) выбора параметров системы регистрации (чувствительность, динамический диапазон); 2) редукции спутниковых измерений к подстилающей поверхности с учетом передаточной функции атмосферы (ПФА). Решение этих задач усложняется в оптическом диапазоне спектра из-за рассеяния и поглощения излучения аэрозольными частицами в атмосфере.

В данной работе определена передаточная функция атмосферы на основе численного моделирования уравнения переноса методом Монте-Карло. Коэффициенты аэрозольного рассеяния вычислены по спутниковым спектротрическим измерениям. Рассмотрен алгоритм коррекции спутниковой видеоинформации передаточной функцией атмосферы. Показаны результаты, полученные при обработке по предложенной методике спутниковых данных от спектротрической системы СМП-32, которая работала на ИСЗ „Метеор-Природа“.

Передаточная функция атмосферы

Строгой математической формулировкой задачи определения ПФА при наличии подстилающей поверхности с неоднородным альбедо является решение интегрального уравнения переноса. Известны следующие основные тенденции определения ПФА при ДЗ: 1) эмпирические подходы, к которым относятся синхронные наземные и самолетные измерения (используются эталонные объекты и отражатели преобразования многоканальных изображений [1]); 2) решение уравнения переноса.

Из теории переноса [6] получено следующее выражение для интегрального уравнения переноса рассеянной радиации при ДЗ природных ресурсов в видимой и ближней инфракрасной области спектра:

$$(1) \quad I_{\lambda} = I_{1\lambda} + I_{d\lambda},$$

$$I_{1\lambda} = I_{0\lambda} P_{\lambda} e^{-m_{\theta} \tau_{\lambda}},$$

$$I_{d\lambda} = \int_0^H e^{-m_{\theta} \int_h^H \sigma_{\lambda}(z) dz} \sigma_{\lambda}(h) \frac{P_{\lambda}(h)}{4\pi} \left[\int_{4\pi} I_{1\lambda}(h, \omega) \eta_{\lambda}(h, \omega) d\omega \right] dh$$

$$+ I_{s\lambda} \int_0^H e^{-(m_{\theta} + m_{\zeta}) \int_h^H \sigma_{\lambda}(z) dz} \eta_{\lambda}(h, \omega) \sigma_{\lambda}(h) P_{\lambda}(h) dh,$$

$\tau_{\lambda} = \int_0^H \sigma_{\lambda}(h) dh$ — оптическая толщина атмосферы в слое 0—H км, I_{λ} — регистрируемая интенсивность в спектральном интервале $\Delta\lambda$, $I_{0\lambda}$ — приземная величина интенсивности, $I_{s\lambda}$ — интенсивность солнечной радиации вне атмосферы, $I_{1\lambda}$ — рассеянная радиация в результате однократного рассеяния, $I_{d\lambda}$ определяет интенсивность радиации за счет многократного рассеяния, $\sigma_{\lambda}(h)$ — объемный коэффициент рассеяния на высоте h , $\sigma_{\lambda a}(h)$ и $\sigma_{\lambda R}(h)$ — коэффициенты аэрозольного и релеевского рассеяния, P_{λ} — функция пропускания в спектральном интервале $\Delta\lambda$, $\eta(h, \omega)$ — индикатриса рассеяния, m_{θ} — атмосферная масса в направлении наблюдателя, θ определяет направление визирования, ζ — зенитный угол Солнца.

А. Определение коэффициента аэрозольного рассеяния

Обычно коэффициент аэрозольного рассеяния в (1) задается на основе некоторых из известных моделей [1, 2, 8, 9, 10]. Это вносит ошибки в определение ПФА. В данной работе предлагается в процессе обработки спектротрических спутниковых измерений для определения $\sigma_{a\lambda}(h)$ использовать узкие спектральные интервалы, в которых влияние атмосферы определяется главным образом молекулярным и аэрозольным рассеянием (окна в атмосфере) или функция поглощения атмосферных газов известна. В ближней инфракрасной области такими интервалами являются окно атмосферы ($\lambda_2 = 0,74 \mu\text{m}$) и интервал поглощения молекулярного кислорода ($\lambda_1 = 0,76 \mu\text{m}$ (с линиями $0,7593$ — $0,7616 \mu\text{m}$ и $0,762$ — $0,77 \mu\text{m}$)). Функция пропускания кислорода в спектральном интервале $\Delta\nu$ определяется выражением:

$$(2) \quad P_{O_2} = \frac{1}{\Delta v} \int_{v_1}^{v_2} e^{-c(mz + m_0)} \int_h^H p(z) \gamma_v(z) dz dv,$$

где c — относительная концентрация кислорода, $\gamma_v(z)$ — коэффициент поглощения O_2 , $p(z)$ — атмосферное давление на высоте z .

Объемный коэффициент рассеяния для степенного распределения аэрозольных частиц по размерам [9] можно представить зависимостью

$$(3) \quad \sigma_a = 0,434g\pi \int_{r_1}^{r_2} Q_{sc} r^2 \frac{1}{r^{v+1}} dr,$$

где Q_{sc} — фактор эффективности рассеяния [8], который представляет отношение сечения рассеяния к геометрическому сечению частиц, g — постоянная, значение которой зависит от концентрации, r — радиус частиц, v определяет наклон кривой распределения. Для типичных аэрозолей дымки подходят значения v от 3 до 4, $v=3$ характерно для аэрозолей с радиусом $0,3 \mu\text{m} < r < 2 \mu\text{m}$, $v=4$ соответствует аэрозолям с радиусом $0,1 \mu\text{m} < r < 0,3 \mu\text{m}$, для туманов $v=2$. Как показано в [9], степенная форма оказывается достаточной репрезентативным представлением для аэрозольных частиц, имеющих различное происхождение и состав. При интегрировании в (3) удобно заменить переменную r на $a = 2\pi r/\lambda$, откуда для $\sigma_{a\lambda}$ получено

$$(4) \quad \sigma_{a\lambda} = 0,434g\pi \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^{v-2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{Q_{sc}}{a^{v-1}} da.$$

Для узкого спектрального интервала выражение (4) можно представить зависимостью

$$(5) \quad \sigma_{a\lambda} = \text{const} \frac{1}{\lambda^x}$$

по аналогии с формулой Релея [9], где объемный коэффициент молекулярного рассеяния с учетом анизотропии определяется как

$$(6) \quad \sigma_{RL} = \frac{8\pi^3 (n^2 - 1)^2}{3N\lambda^4} \left(\frac{6 + 3p_n}{6 - 7p_n} \right),$$

где n — показатель преломления, N — число молекул в единице объема, фактор деполяризации $p_n = 0,035$. Показатель степени $x = v - 2$ в (5) может изменяться примерно от 4 (для релеевского рассеяния очень малыми частицами) почти до 0 (для рассеяния в тумане излучения видимого и ближнего инфракрасного диапазона). Из (5) и (6) получается следующая зависимость $\sigma_{a\lambda}$ от σ_{RL} :

$$(7) \quad \sigma_{a\lambda} = \frac{\sigma_{RL} G}{\lambda^{(x-4)}},$$

где G — функционал, зависящий от радиуса частиц и эффективного фактора рассеяния Q_{sc} . Выражение (7) можно использовать в видимой и ближней инфракрасной области спектра (примерно до $2 \mu\text{m}$). Для высотной зависимости коэффициента аэрозольного рассеяния $\sigma_{a\lambda}(h)$ использована экспоненциальная аппроксимация. Вычисление $\sigma_{a\lambda}(h)$ по спектрометрическим спутниковым измерениям сводится к следующей обратной задаче:

$$(8) \quad Ku=f, \quad u \in U, \quad f \in F,$$

где $f=I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2}$, оператор K характеризует изменение интенсивности $I_{s\lambda}$ за счет молекулярного рассеяния и поглощения атмосферными газами. Ищется функция аэрозольного рассеяния u . В области изменения $\sigma_{a\lambda}(h)$, степенного показателя χ и коэффициента G вычисляется отношение

$$(9) \quad V(u) = \frac{\int_0^H A(I_{s\lambda_1}, h) u_{\lambda_1}(h) dh}{\int_0^H A(I_{s\lambda_2}, h) u_{\lambda_2}(h) dh},$$

где величина $A(I_{s\lambda}, h)$ является ядром, которая в приближении однократного рассеяния представляется выражением

$$A(I_{s\lambda}, h) = I_{s\lambda} e^{-\frac{z}{H_0} \int_h^H (\sigma_{R\lambda}(z) + m_0) dz} P_{\lambda}(h, \xi),$$

где H_0 — однородная атмосфера для молекулярного рассеяния ($H_0 = 8$ км). Функция аэрозольного рассеяния $u(\sigma_{a\lambda})$ определяется из минимума функционала: $\Phi[u, f] = \|V(u) - f\|^2$. Спектральная зависимость $\sigma_{a\lambda}$ восстанавливается по (7).

На рис. 1 показаны спектральные зависимости коэффициента аэрозольного рассеяния $\sigma_{a\lambda}(h)$ при земной поверхности и на высоте 4 и 8 км, полученные по спектрометрическим спутниковым измерениям с ИСЗ „Метеор-Природа“, выполненные системой СМП-32. Полученные значения для $\sigma_{a\lambda}(h)$ используются как входные данные при решении уравнения переноса и восстановлении приземных яркостных характеристик с учетом влияния атмосферы.

Б. Применение метода Монте-Карло для решения уравнения переноса

Процесс распространения света в атмосфере можно рассматривать как случайную марковскую цепь столкновений фотонов с веществом, которые приводят либо к рассеянию, либо к поглощению фотонов. Метод Монте-Карло заключается в моделировании траекторий движения фотонов в неоднородной среде и вычислении статистической оценки для

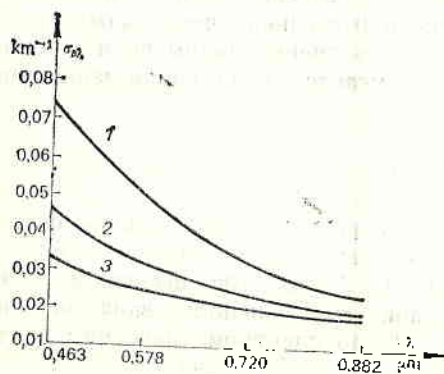


Рис. 1. Зависимости коэффициента рассеяния $\sigma_{a\lambda}(h)$ от длины волны λ , вычисленные по спектрометрическим спутниковым измерениям системой СМП-32
1 — на уровне земной поверхности; 2 — на высоте 4 км; 3 — на высоте 8 км

искомых функционалов. Для решения уравнения переноса (1) используется метод сопряженных траекторий [5], который заключается в основном в том, что траектории выходят из точки наблюдения непосредственно в интересующем нас направлении. Атмосфера высотой H разбита на L слоев, в каждом из которых заданы коэффициенты молекулярного $\sigma_{RL}(h)$ и аэрозольного рассеяния $\sigma_{aL}(h)$, индикатрисы аэрозольного $\eta_{aL}(\psi)$ и молекулярного $\eta_{RL}(\psi)$ рассеяния и коэффициенты поглощения газовых компонент $\sigma_{abl}(h)$. Коэффициент молекулярного рассеяния σ_{RL} определяется по (6). Коэффициент аэрозольного рассеяния $\sigma_{aL}(h)$ вычисляется по спутниковым измерениям. Индикатриса η_{RL} не зависит от высоты h и с учетом анизотропии молекул [9] определяется из

$$(10) \quad \eta_{RL}(\psi) = 0,7629(1 + 0,9324 \cos^2 \psi),$$

что удовлетворяет требованию нормировки: $\frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} \eta_{RL}(\psi) d\omega = 1$. Полная индикатриса рассеяния вычисляется по формуле

$$\eta_L(\psi, h) = \frac{1}{\sigma_L(h)} [\sigma_{aL}(h) \eta_{aL}(\psi, h) + \sigma_{RL}(h) \eta_{RL}(\psi)].$$

Уравнение переноса (1) решается методом Монте-Карло путем моделирования траекторий частиц на ЭВМ по следующей схеме:

- 1) выбор начальной точки траекторий,
- 2) выбор длины свободного пробега l ,
- 3) проверка эффективности траектории по отношению к объекту наблюдения,
- 4) определение типа столкновения (поглощения или рассеяния),
- 5) вычисление координат очередной точки столкновения,
- 6) выбор типа рассеяния (молекулярное или аэрозольное),
- 7) моделирование нового направления траектории,
- 8) „переход“ к п. 2.

Если в п. 3 определяется вылет из среды, или в п. 4 поглощение, то к счетчику числа частиц прибавляется единица и моделируется новая траектория, начиная с п. 1. Величина свободного пробега l определяется из уравнения $F(l) = \alpha$, где функция распределения $F(l)$ для l равна $F(l) = 1 - e^{-\tau_L(l)}$, α — случайное число.

Полученные вероятностные характеристики при решении уравнения (1) методом Монте-Карло позволяют оценить вклад многократного рассеяния при ДЗ природных ресурсов из Космоса, а также производить коррекцию спутниковых спектрометрических измерений с передаточной функцией атмосферы.

Редукция спутниковых спектрометрических измерений к уровню подстилающей поверхности

Редукция спутниковых измерений к уровню земной поверхности с учетом передаточной функции атмосферы является обратной задачей [7]. Для определения приземной яркостной характеристики I_{0Lij} в точке (i, j) используется следующая итерационная процедура:

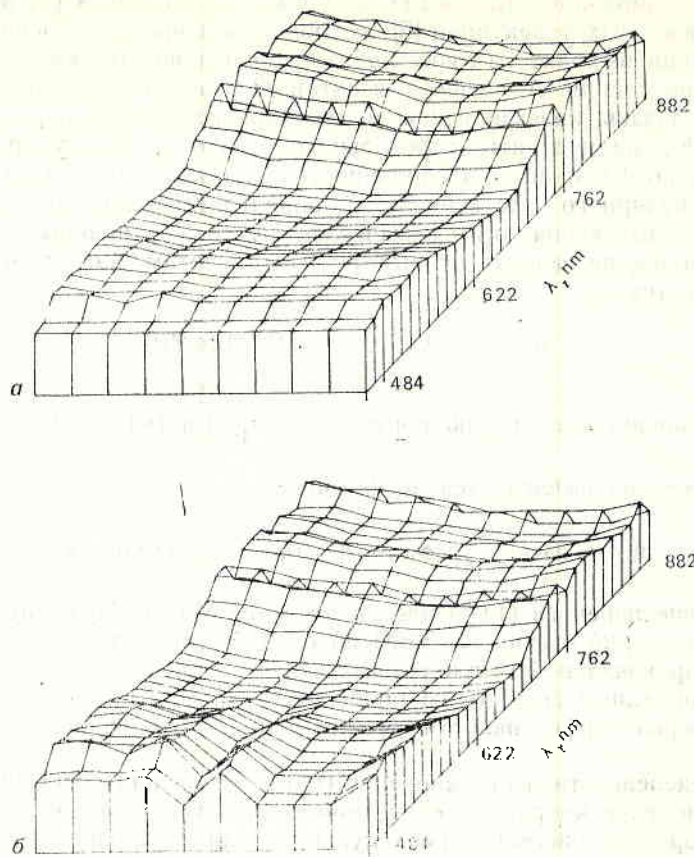


Рис. 2. Фрагмент земной поверхности
 а — полученный системой СМП-32 с ИСЗ „Метеор-Природа“;
 б — тот же самый фрагмент, скорректированный передаточной функцией атмосферы

$$(11) \quad I_{0\lambda ij}^k = I_{0\lambda ij}^{k-1} + \delta^k,$$

k — номер итерации, δ^k определяется из $\delta^k = I_{\lambda ij} - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{0\lambda mn}^{k-1} q_{mn}^{ij} - q_{13}^{ij} I_{\lambda s} - q_{22}^{ij} I_{\lambda ij}$, q_{mn}^{ij} — вероятность прихода частицы на поверхность Земли в точке (m, n) при наблюдении точки (i, j) , q_{13}^{ij} — вероятностная характеристика, которая определяет количество частиц, рассеянных в направлении к Солнцу, q_{22}^{ij} определяет вероятность вылета частицы из исследуемой области рассеяния. Процедура выполняется до момента получения заданной величины δ^k или номера итерации k . Первое приближение редуцированной к земной поверхности спектральной яркостной характеристики $I_{0\lambda}^0$ определяется выражением

$$(12) \quad I_{0\lambda ij}^0 = \frac{1}{L_{ij}} \left(I_{\lambda ij} - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{\lambda mn} q_{mn}^{ij} + I_{\lambda ij} q_{ij} - q_{13}^{ij} I_{\lambda s} - q_{22}^{ij} I_{\lambda ij} \right),$$

где q_{ij} определяет вероятность попадания частицы в исследуемый объект, $L_{ij} = e^{-\tau_{ij} P_{ij}}$.

Применение метода Монте-Карло для расчета переноса солнечного излучения в атмосфере с учетом реальных сечений аэрозольного рассеяния позволяет повысить точность редукиции спутниковых спектрометрических измерений к уровню подстилающей поверхности.

На рис. 2а показан фрагмент изображения в 32 спектральных диапазонах в интервале 0,463—0,882 мкм, полученный системой „СМП-32“ с „ИСЗ Метеор-Природа“. На рис. 2б показан тот же самый фрагмент после коррекции передаточной функцией атмосферы по рассмотренной выше методике. Скорректированные спектральные яркостные характеристики (рис. 2б) получены при $\delta^* = 5\%$, что вполне соответствует точности, требуемой при решении задач ДЗ.

Заключение

Оптическое дистанционное зондирование Земли находит применение во всех научных дисциплинах, связанных с изучением земной поверхности. Это определяет актуальность решения задачи учета влияния атмосферы на регистрируемую со спутника рассеянную солнечную радиацию в видимой и ближней инфракрасной области спектра.

Предложенный способ коррекции спутниковых спектрометрических измерений передаточной функцией атмосферы позволяет повысить информативность и качество спутниковой видеоинформации и получить приземные яркостные характеристики исследуемых объектов, учитывая оптические свойства аэрозолей в атмосфере, вычисленные на основе спутниковых измерений.

Рассмотренная методика коррекции атмосферных искажений с учетом многократного рассеяния основана только на спутниковой информации и не требует наземных измерений. Это позволяет ее применение при глобальном решении задач дистанционного зондирования природных ресурсов из Космоса.

Литература

1. Итоги науки и техники. Исследование космического пространства. 16, М., Наука, 1981.
2. Гоутц, А. Ф. Х., Дж. Б. Уэллман, У. Л. Барнс. Дистанционное зондирование Земли в оптическом диапазоне волн. — ТИИЭР, 73, 1985, № 6, 7—30.
3. Арвидсон, Р. Э., Д. М. Батлер, Р. Э. Хартли. ЕО; Система наблюдения Земли 90-х годов. — ТИИЭР, 73, 1985, № 6, 86—93.
4. Бредертон, Ф. П. Системные исследования Земли и дистанционное зондирование. — ТИИЭР, 73, 1985, № 6, 173—185.
5. Марчук, Г. И. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск, Наука, 1976.
6. Исимару, А. Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах. М., Мир, 1981.
7. Тихонов, А. П., В. А. Арсенин. Методы решения некорректных задач. М., Наука, 1979.
8. Дейрменджан, Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М., Мир, 1971.
9. McCarthey Earl, J. Optics of the atmosphere. New York, 1976.
10. Yanev, T. K., V. Djepa-Petrova, D. N. Mishev. Estimation of the diffusion effect in atmosphere by constant transmission function. — Compt. Rend. Acad. bulg. Sci., 31, 1978, No 11, 1409—1412.

Transmission function of the atmosphere
determined by satellite spectrometer
measurements for remote sensing of the Earth

V. S. Djepa-Petrova

(Summary)

The paper deals with calculation of the transmission function of the atmosphere in visible and near-infrared spectral range on the basis of numerical solution of the transmission equation by the Monte Carlo method. The cross-section of aerosole scattering is obtained by spectrometric satellite measurements processing. The algorithm for correction of satellite data with the transmission function of the atmosphere and the determination of ground-based brightness characteristics are discussed. The method is used for determination of the atmospheric influence in remote sensing of the Earth.

The results from data processing of scientific space equipment aboard the METEOR-PRIRODA within BULGARIA 1300 project are presented.