ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2002. Т 8. № 2/3. С. 122—126

Атмосферна корекція у видимому діапазоні, оцінювання ОПФ атмосфери

С. А. Смирнов, Н. В. Панова

Інститут космічних досліджень НАН і НКА України, Київ

Як випливає з аналізу літератури [1, 2, 4, 5], загальна постановка задачі атмосферної корекції (АК) виявляється дуже абстрактною, і при всій її корисності в концептуальному плані, у прикладному відношенні потребує істотного уточнення і конкретизації. Тому буде природно почати обговорення проблеми з досить загальних формулювань з наступним їхнім уточненням.

УТОЧНЕННЯ ЗАГАЛЬНОЇ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧІ

Будемо розглядати задачу АК як задачу відновлення характеристик досліджуваного образа за інформацією, що міститься в його зображенні, за допомогою всебічного врахування внеску атмосфери як середовища поширення електромагнітних сигналів у формування розглянутого зображення. Аналіз фізичних умов поширення випромінювання в атмосфері показує, що розв'язання задачі АК у всьому діапазоні частот електромагнітних вимірів не є можливим. Варто окремо розглядати відповідні задачі для різних спектральних діапазонів. Далі ми розглядаємо видимий оптичний діапазон електромагнітного спектра.

Перелічимо найістотніші фактори [4], що впливають на проходження оптичної інформації через атмосферу:

1) товщина шару атмосфери (висота польоту);

2) прозорість атмосфери (наявність атмосферного серпанка);

3) спектральні характеристики пропускання атмосфери;

4) висота Сонця над обрієм (час року і час доби з урахуванням географічних координат місця зйомки);

5) величина кута між оптичною віссю сканера (чи АФА) і вертикаллю до поверхні Землі;

6) погодженість спектральних характеристик атмосфери, об'єктів зйомки зі спектральними характеристиками оптичних систем і приймачів систем ДЗЗ.

Перші три фактори обумовлені фізичними процесами взаємодії оптичного випромінювання з газовим середовищем і домішками, наступні два суто геометричні, і останній визначається внутрішньою «збалансованістю», погодженістю оптичної та приймальної систем із властивостями атмосфери і використовуваним діапазоном випромінювання, що повною мірою є виразом системної природи задачі дистанційного зондування.

Використовуючи діапазон частот оптичного випромінювання, ми не враховуватимемо всі ефекти, що мають в основному нелінійний характер та призводять до тієї чи іншої трансформації герцівських частот (часової модуляції оптичного сигналу). Для сонячного світла в земній атмосфері зроблене припущення виконується з дуже високою точністю (його порушення досліджується в лабораторних умовах і пов'язане з високими значеннями інтенсивності випромінювання і щільності газового середовища). При цьому ослаблення контрастності зображення внаслідок ефектів спектральної природи при аналізі малоконтрастних сцен є істотним чинником, який в загальному випадку не можна відкидати і який заслуговує ретельного дослідження. Однак у даній роботі таке дослідження не проводиться.

Ефект просторової модуляції оптичного випромінювання в атмосфері будемо вважати основним фактором, який визначає природу спотворення оптичної інформації, що мотивує пропоновану постановку задачі АК. І знову будемо нехтувати нелінійними ефектами. Коректність такого припущення забезпечується тими ж аргументами про щільність і інтенсивність [2], що наведені вище. Додатково необхідно ввести в розгляд, крім фізичних, ще й структурно-геометричні фактори. Зазначимо, що поняття просторової модуляції засноване на введенні просторових частот, ефективність застосування яких пов'язана з достатнім ступенем неоднорідності і масштабними характеристиками поля яскравості досліджуваної сцени (потрібні дані високого розрізнення). У тих випадках, коли оптичні властивості сцени характеризуються високим ступенем однорідності по її довжині, просторово-частотний підхід не спрацьовує. При цьому ефекти просторової модуляції не спавляють відчутного впливу на формування образу, а основний внесок дають адитивні атмосферні перешкоди (що може виявлятися, зокрема, через ефекти часової модуляції). Для їхнього моделювання можуть бути використані слабокорельовані випадкові поля (просторово розподілені аналоги квазібілих шумів), а для розв'язання задачі фільтрації можна запропонувати відповідні процедури теорії Колмогорова—Вінера. Дуже бажано також скористатися інформацією про «оптичну погоду» на момент зйомки.

Далі ми припускаємо, що достатній ступінь інформативності просторово-частотного зображення сцени і просторова модуляція здійснюють основний ефект, що веде до атмосферних спотворень. У таких умовах вплив атмосфери на оптичний сигнал має мультиплікативний характер і задається оптичною передавальною функцією (ОПФ). Таким чином, нашою метою є побудова просторово-частотної моделі атмосфери. Знання ОПФ відповідного атмосферного шару дозволяє звести задачу АК до задачі обернення функції.

Тепер уточнимо описану постановку задачі АК для випадку даних ДЗЗ, наданих з КА «Океан-О». Уточнення пов'язані зі складом бортової апаратури КА, і для нашої постановки важливі характеристики оптичних інструментів.

Визначимо спектральний діапазон просторових частот: $1/\alpha < \Omega < 1/\beta$, тут α — ширина смуги огляду, β — просторове розрізнення приладу:

МСУ-В	$5\cdot10^{-6}$ м$^{-1}$ < Ω < 0.02 м$^{-1}$,
МСУ-СК	$1.6\cdot10^{-6}$ м$^{-1}$ < Ω < $4\cdot10^{-3}$ м$^{-1}$,
МСУ-М	$5\cdot10^{-7}$ м$^{-1}$ < Ω < $6\cdot10^{-4}$ м$^{-1}$.

Саме в цьому просторово-частотному діапазоні представлена інформація, що заслуговує довіри. В квадраті $[1/\alpha, 1/\beta]\times[1/\alpha, 1/\beta]$ необхідно відновити ОПФ атмосфери, пам'ятаючи, що вона залежить не тільки від двох просторових частот, але і від частоти випромінювання і ряду атмосферних параметрів.

Пропонується наступна послідовність дій. Теоретичний аналіз фізичних механізмів переносу випромінювання в атмосфері дозволить визначити структуру ОПФ із деякими невизначеними параметрами, а наступна обробка космічних знімків дозволить виконати ідентифікацію просторово-частотної моделі й одержати оцінки невизначених параметрів.

Для розв'язання задачі АК у такій постановці потрібні знімки, отримані за допомогою відповідних приладів, деяких «еталонних» утворень на земній поверхні (не обов'язково спеціальних полігонів, оскільки вони використовуються для калібрування знімальних пристроїв, а сцен, де є різкі краї чи границі будь-якої природи), інформація про параметри атмосфери (метеорологічна й ін.), геометрична інформація (про взаємне розташування Сонця, сцени на земній поверхні, що знімається, і приладу).

Необхідно прояснити питання про залежність ОПФ атмосфери від герцівської частоти в робочому спектральному діапазоні кожного приладу, що використовується. Варто очікувати слабку залежність (малі зміни) у границях діапазону, що спрощує обробку знімків за рахунок редукції до монохромної задачі.

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ І ЗАГАЛЬНА СХЕМА АТМОСФЕРНОЇ КОРЕКЦІЇ ОПТИЧНИХ ЗНІМКІВ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ З КОСМОСУ

Отже, відповідно до постановки задачі, атмосферна корекція полягає у приведенні отриманого за межами атмосфери зображення земної поверхні до зображення на «нульових висотах». Для цього необхідно провести оцінювання і фільтрацію спотворень і шумів різної фізичної природи: адитивних шумів від фонового атмосферного розсіювання; мультиплікативних спотворень, що виникають внаслідок молекулярного й аерозольного розсіювання і поглинання; ефектів атмосферної турбулентності.

Основні ідеї методики, що розвивається в роботі, містяться у наступних положеннях:

1) просторово-частотна передавальна функція атмосфери може бути «зібрана», виходячи з уявлень про структуру атмосфери (атмосферні шари і домінуючі в них оптичні явища);

2) структурна оптична модель атмосфери дозволяє побудувати модель фонових адитивних перешкод і відповідні процедури фільтрації;

3) невідомі параметри отриманої ОПФ можуть бути оцінені по інформації про структуру ОПФ і інформації, яка міститься в самих знімках (спеціалізовані процедури ідентифікації);

4) ОПФ оптичних інструментів також використовуються для поліпшення якості корекції.

Прокоментуємо їх послідовно.

Добре відомо, що існує поділ атмосферних шарів за їхніми оптичними властивостями. До висот 2-3 км визначальну роль відіграє вологість та тропосферні аерозолі. До висот близько 8 км — молекулярне (релеївське) розсіювання. Потім іде шар високої оптичної прозорості, а починаючи з висот 20 км істотну роль відіграють озон і стратосферні аерозолі. Композиція шарів характеризується

ОПФ, що обчислюється по формулі послідовного з'єднання. Накладення ефектів в одному шарі (наприклад, водночас аерозольне і турбулентне розсіювання) враховується як паралельне з'єднання. Таким чином, знаючи ОПФ основних процесів пошарово, за допомогою операцій алгебри передавальних функцій може бути обчислена модельна ОПФ атмосфери з точністю до деяких невизначених коефіцієнтів.

Адитивні фонові перешкоди (відбите атмосферою сонячне світло, що не дійшло до земної поверхні) є визначальним чинником, відповідальним за погіршення контрастності космічних знімків. Оптична структурна модель атмосфери дозволить оцінити ефекти розсіювання «назад» і підібрати придатну схему фільтрації.

У зв'язку з тим, що структура модельної ОПФ атмосфери істотно відрізняється від дробово-раціональної функції (як добре відомо, вона містить ірраціональні залежності [1]), стандартні процедури параметричної ідентифікації не можуть бути використані. З урахуванням цього фактора а також необхідної умови дискретності зображень і відповідних передатних функцій, розвиваються спеціальні методи розв'язання задачі ідентифікації ОПФ атмосфери. Попередня підготовка даних для ідентифікації пов'язана з наявністю на зображенні прикордонних кривих і обчисленням функцій розмиття ліній. Наступна побудова оцінок невизначених коефіцієнтів дозволяє знайти найкращі апроксимації цих функцій у класі, обумовленому структурою модельної ОПФ атмосфери.

Дуже важливим є аспект, пов'язаний із просторово-частотним перетворенням, що виконується самим оптичним інструментом, за допомогою якого отримане вихідне зображення. Оскільки зв'язок між характеристиками сцени і зображення задається формулою

$$B(p_x, p_y) = \Psi_{op}(p_x, p_y)\Psi_{at}(p_x, p_y)V(p_x, p_y),$$

де $\Psi_{op}(p_x, p_y)$, $\Psi_{at}(p_x, p_y)$ — ОПФ оптичної системи й атмосфери, то обернення ОПФ атмосфери задачу не розв'язує. Необхідно перед цим виконати обернення ОПФ використовуваного оптичного інструмента. Очевидно, врахуванням цих обставин пояснюються причини тісного пов'язування алгоритмів атмосферної корекції з конкретним космічним інструментом у іноземних роботах. ОПФ унікальна для кожного приладу, але в якості грубого першого наближення може використовуватись формула лінзи:

$$M_{op}(\chi) = \begin{cases} \dfrac{2}{\pi}\arccos\dfrac{\chi}{\alpha} - \dfrac{\chi}{\alpha}\sqrt{1-(\chi/\alpha)^2}, & 0 \le \dfrac{\chi}{\alpha} \le 1, \\ 0, & 1 < \left|\dfrac{\chi}{\alpha}\right|, \end{cases}$$

де $\alpha = kd/(2F)$, k — хвильове число випромінювання, d — діаметр вхідного отвору системи, F — фокусна відстань, $\chi = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$ — просторова частота. Необхідно також узяти до уваги дискретну структуру чуттєвого елемента сканера (ПЗЗ-лінійки), що необхідно спричиняє використання дискретних перетворень Фур'є та дискретних передавальних функцій.

ПРОЦЕДУРА РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОПФ

Задача оцінювання параметрів моделі по експериментальних даних буде розв'язуватись в такий спосіб. Розглянемо стаціонарну дискретну систему з одним входом і одним виходом і адитивним шумом:

$$y(t)=G(q)\,u(t)+v(t), \tag{1}$$

де $y(t)$, $u(t)$, $v(t)$ — скалярний вихідний, вхідний сигнали і збурювання відповідно. Комплекснозначна функція $G(z)$, $z \in C$ — передавальна функція системи, q^{-1} — оператор одиничного просторового зсуву. Будь-яка описана система може описуватись моделлю скінченої імпульсної реакції з передавальним оператором, що розкладається в ряд $G(q) = \sum_{k=1}^{\infty} g_k^0 q^{-k}$, як в роботі [3].

Нехай система стійка, і для неї виконується $\sum_{k=1}^{\infty} |g_k^0| < \infty$, тобто $G(z)$ аналітична при $|z| > 1$ і неперервна при $|z| \ge 1$. Крім того, апріорно відомо, що вона парна, не має дійсних полюсів і $G(z) = G\left(\dfrac{1}{\sqrt{1+z^2d^2}},\ \exp(-b^2z^2)\right)$, де d і b — деякі параметри.

Задача полягає в оцінюванні передавального оператора $G(q)$ за експериментальними даними $\{y(t), u(t)\}$, $t = 1,\dots, N$. Для цього широко використовується метод розкладання функції в ряд [3], коли необхідно оцінити коефіцієнти цього розкладу. Такий непараметричний підхід часто призводить до моделей дуже високого порядку. Вони незручні у використанні, якщо є потреба розв'язувати задачі високої розмірності, і/або в реальному масштабі часу.

Тому в роботі використовується змішаний параметрично-непараметричний підхід [6]. Стійкий передавальний оператор $G(q)$ можна розділити на дві підмоделі: домінуючу параметричну модель низького порядку $G(q, \theta)$, $\theta \in R^n$, що відповідає за низько- і середньочастотне поводження системи, і непараметричну модель $\Delta G(q)$, яка включає динаміку, що не моделюється:

$$G(q) = G(q, \theta) + \Delta G(q). \tag{2}$$

Застосуємо до даної моделі апарат лінійного регресійного оцінювання. З огляду на те, що розглянута модель нелінійна, представимо лише параметричну частину (2) у вигляді функції, лінійної по параметрах:

$$G(q) = \sum_{k=1}^{n} g_k \Psi_k(q),$$
$$\theta = [g_1, g_2, \ldots, g_n], \tag{3}$$

де $\Psi_k(q)$ — деякий набір лінійних базових фільтрів. Даному опису відповідає багато різних моделей фільтрів. Наприклад, лінеаризована авторегресійна модель (ARX-модель), ортонормовані базисні функції і т. д. Якщо вибрати

$$\Psi_k(q) = q^{-k}, \tag{4}$$

то вийде модель скінченої імпульсної реакції (FIR-модель). Вибравши

$$\Psi_k(q) = \frac{\sqrt{1-a^2}}{q-a}\left(\frac{1-aq}{q-a}\right)^{k-1}, -1 < a < 1, \tag{5}$$

прийдемо до моделі Лагерра. Параметр a потрібно вибирати близьким до домінуючого полюсу системи. Така модельна структура дає гарну апроксимацію низького порядку систем зі швидко загасаючим передавальним оператором. Проте вона не може описувати системи з декількома розкиданими домінуючими полюсами, а також резонансні системи із комплексно спряженими полюсами.

А при

$$\Psi_k(q) = $$
$$= \begin{cases} \dfrac{\sqrt{1-c^2}(q-b)}{q^2+b(c-1)q-c} Q^{(k-1)/2} & k \text{ парне}, \\ \dfrac{\sqrt{(1-c^2)(1-b^2)}}{q^2+b(c-1)q-c} Q^{(k-2)/2}, & k \text{ непарне}, \end{cases}$$
$$-1 < b < 1, \quad -1 < c < 1,$$
$$Q = \frac{-cq^2+b(c-1)q+1}{q^2+b(c-1)q-c},$$

отримаємо модель Коца для ідентифікації систем з резонансом. Для апроксимації чисто загасаючих процесів параметри b і c потрібно вибирати такими, щоб корені рівняння

$$z^2 + b(c-1)z - c = 0 \tag{6}$$

були близькі до домінуючих комплексних полюсів системи β і β^*: $b \approx (\beta+\beta^*)/(1+\beta\beta^*)$, $c \approx -\beta\beta^*$. Збільшуючи число членів розкладання в моделях Лагерра і Коца, можна компенсувати неточну апріорну інформацію про домінуючі полюси.

Крім того, у загальному випадку $\Psi_k(q)$ може бути лінійною комбінацією перерахованих вище фільтрів.

Для вибору фільтра скористаємося апріорною інформацією.

Перетворимо (2) у лінійну регресію з обмеженим шумом. Тоді співвідношення вхід-вихід прийме вигляд

$$y(t) = \varphi(t)^T\theta + w(t) + v(t) + z(t), \tag{7}$$

де позначено $\varphi(t) = [\Psi_1(q)u(t),\ldots, \Psi_n(q)u(t)\}]^T$, $w(t) = \Delta G(q)u(t)$ — помилка моделювання, $z(t)$ визначається перехідним процесом.

Оцінка методу найменших квадратів θ мінімізує критерій

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} [y(t) - \varphi(t)^T\theta]^2, \tag{8}$$

тобто суму квадратів помилок прогнозування. Розв'язок цієї квадратичної задачі оптимізації має вигляд

$$\hat{\theta}_N = R_N^{-1} f_N, \tag{9}$$

де

$$R_N = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} \varphi(t)\varphi(t)^T,$$
$$f_N = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} \varphi(t)y(t). \tag{10}$$

Щоб обчислити значення $\varphi(t)$, потрібно визначити початкові умови для фільтрів $\Psi_k(q)$ одним з наступних способів.

1) Вибрати початкові значення нульовими, що оптимально, якщо система знаходиться на початку експерименту.

2) Включити невідомі початкові умови в число оцінюваних параметрів.

3) Установити нульові початкові значення, почекати, поки закінчиться перехідний процес, і тільки тоді обчислювати оцінку.

Результат задачі ідентифікації буде залежати від числа обумовленості матриці R_N. Якщо вона вироджена чи близька до такої, необхідно застосовувати регуляризуючі алгоритми.

Розглянемо конкретніше випадок FIR-моделі. Для неї $g_k = g_k^0$, вектор регресорів $\varphi(t)$ прийме простий вигляд $\varphi(t) = [u(t-1), \ldots, u(t-n)]^T$, і оптимізаційна задача буде вирішуватись таким способом.

Експериментальні дані системи складаються з відомої точно вхідної послідовності $u(t)$ ($u(t) = 0$ при $t \le 0$, $u(1) \ne 0$) і вимірів перших 0 компонентів вихідної послідовності $y(t)$, на які впливає зовнішній шум $v(t)$, отриманих згідно з виразом

$$y(i) = \sum_{k=1}^{n} g_k u(i-k) + v(i), \tag{11}$$
$$i = n+1, \ldots, n+N.$$

Тоді, позначивши $\mathbf{Y}_N^T = [y(n+1),\ldots, y(n+N)]$ і $\mathbf{V}_N^T = [v(n+1), \ldots, v(N+n)]$, вираз (11) можна записати в матричній формі

$$\mathbf{Y}_N = \mathbf{F}_N\theta + \mathbf{V}_N, \tag{12}$$

де $\mathbf{F}_N$ — у загальному випадку прямокутна матриця розмірності $N \times n$:

$$\mathbf{F}_N = \\ = \begin{bmatrix} u(n) & u(n-1) & \ldots & u(1) \\ u(n+1) & u(n) & \ldots & u(2) \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ u(N+n-1) & u(N+n-2) & \ldots & u(N) \end{bmatrix}. \tag{13}$$

Метод найменших квадратів дасть оцінку (9), де $\mathbf{R}_N = \mathbf{F}_N^T\mathbf{F}_N$ і $\mathbf{f}_N = \mathbf{F}_N^T\mathbf{Y}_N$. Якщо матриця $\mathbf{R}_N$ невироджена, тоді задача має єдиний розв'язок θ_N.

Щоб одержувати оцінку в кожен момент часу, можна скористатися рекурентним алгоритмом найменших квадратів [5]. У момент N маємо

$$\hat{\theta}_N = \hat{\theta}_{N-1} + \frac{1}{N}R_N^{-1}x_N(y_N - x_N^T\hat{\theta}_{N-1}), \tag{14}$$

$$R_N = \frac{N-1}{N}R_{N-1} + \frac{1}{N}x_Nx_N^T, \tag{15}$$

де використано розбиття на блоки матриці $\mathbf{F}_N$ і вектора $\mathbf{Y}_N$:

$$\mathbf{F}_N^T = [F_{N-1}^T \,\vdots\, x_N], \\ \mathbf{Y}_N^T = [Y_{N-1}^T \,\vdots\, y_N]. \tag{16}$$

При цьому в момент $N-1$ запам'ятовується тільки скінченновимірний інформаційний вектор $X(N-1) = [\hat{\theta}_{t-1}, R_{N-1}]$.

Щоб уникнути обертання матриці $\mathbf{R}_N$ на кожному кроці, зручно рекурентно обчислювати обернену до неї матрицю. Позначимо $\mathbf{P}_N = \mathbf{R}_N^{-1}$. Тоді

$$\hat{\theta}_N = \hat{\theta}_{N-1} + L_N(y_N - x_N^T\hat{\theta}_{N-1}),$$

$$L_N = \frac{P_{N-1}x_N}{N-1+x_N^TP_{N-1}x_N},$$

$$P_N = \frac{N}{N-1}\left(P_{N-1} - \frac{P_{N-1}x_Nx_N^TP_{N-1}}{N-1+x_N^TP_{N-1}x_N}\right).$$

Визначені усі компоненти ідентифікаційної процедури ОПФ атмосфери, що містить ірраціональні залежності.

Таким чином, у роботі запропоновано уточнення загальної постановки задачі атмосферної корекції космічних зображень земної поверхні на випадок використання оптичного діапазону частот електромагнітного випромінювання, викладено концепцію і структуру побудови повної процедури атмосферної корекції як послідовності моделей, та розроблено спеціальний метод ідентифікації оптичної передавальної функції атмосфери з урахуванням її математичних особливостей, пов'язаних з фізикою процесу переносу випромінювання.

1. Зеге Э. П., Иванов А. П, Кацев И. Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985, 327 с.
2. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех).—М.: Советское радио, 1977, 368 с.
3. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Под ред. Я. З. Цыпкина. М.: Наука, 1991.—432 с.
4. Савиных В. П., Кучко А. С., Стеценко А. Ф. Аэрокосмическая фотосъемка. Учебник.—М.: Картогеоцентр-Геодезиздат, 1997.—378 с.
5. Сушкевич Т. А. О решении задачи атмосферной коррекции спутниковой информации // Исследование земли из космоса.—1999, № 6.—С. 42—59.
6. Giarre L., Kacewicz B. Z, Milanese M. Model quality evaluation in set membership identification // Automatica.—1997.—33, N 6.—P. 1133—1139.