

УДК 519.87+681.513

С. А. Смирнов, Р. П. Терлецький, І. С. Гонтаренко

Інститут космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України, Київ

## Низькочастотна атмосферна корекція космічних знімків

Надійшла до редакції 26.10.06

Запропоновано адаптивну процедуру для низькочастотної атмосферної корекції оптичних космічних знімків. На попередньому етапі процедури для визначення параметрів атмосфери як оптичного фільтра використовуються отримані авторами формули коефіцієнтів послаблення і розсіяння та дані про відбивальні властивості підстильних поверхонь. Подальша практична реалізація полягає у попіксельному застосуванні оберненого фільтра для отримання відкоригованого зображення. Для перевірки процедури проведено атмосферну корекцію знімка на LANDSAT 7.

Радіометрична корекція знімків земної поверхні, отриманих за допомогою космічних засобів, здійснюється двома методами: *табличним* та *адаптивним*. До першого типу відносяться процедури, в яких вся необхідна додаткова інформація знаходиться в попередньо складених таблицях (таблиці коефіцієнтів поглинання атмосфери в залежності від трас поширення променів, розподілу аерозолів по висотах тощо). Ці дані вимірюються попередньо спеціальною апаратурою, а потім використовуються для корекції космічних знімків. В роботах [1, 2, 10] було складено таблиці поглинання та розсіяння різних типів аерозолів та молекулярних речовин (озон, азот) в залежності від азимута, кута на Сонце та космічний апарат, а також від вологості та пори року. Використовуючи супровідну інформацію (час зйомки, географічні координати апарата), завдяки таблицям можна отримати узагальнені характеристики стану атмосфери на момент зйомки і виконати відновлення знімка.

До другого типу алгоритмів належать методи, що використовують знімок як джерело додаткової інформації, необхідної у подальшій побудові фільтра для відновлення знімка. В роботах [4, 7] запропоновано використовувати пограничну

криву для досліджень, а її розмиття розглядати як характеристику впливу атмосфери на формування зображення. Саме за допомогою пограничної кривої встановлено параметри передатної функції атмосфери, яка використовується для побудови оберненого атмосферного фільтра. В роботі [9] авторами запропоновано спосіб, який дозволяє піти ще далі, а саме — одночасно встановлювати параметри атмосфери та підстильної поверхні, опираючись лише на знімок. Це дуже важливо, адже виключається зайвий крок, завдяки чому зменшується сумарна похибка обчислень.

Методика атмосферної корекції, що розвивається у даній роботі, належить до класу адаптивних і спирається на встановлення фізичної природи та значень параметрів спотворення, внесених атмосферою у космічні знімки.

Радіометрична корекція передбачає усунення довільних спотворень яскравості у вихідному зображенні. Існує два головних фактори, що вносять такі спотворення: впливи апаратури та оптичний вплив атмосфери. Перший з указаних факторів у даній роботі залишається поза розглядом, похибки, пов'язані з недосконалістю апаратури, вважаються вже відкоригованими або

ігноруються. Основна увага приділяється усуненню впливів атмосфери:

- просторового розмиття сигналу, пов'язаного з дифракційними ефектами в атмосфері;
- послаблення сигналу, пов'язаного з ефектом поглинання та розсіювання;
- додаткового засвічування внаслідок розсіювання атмосферним серпанком світла, що не досягає Землі.

Врахування розмиття зображення є найбільш суттєвим у випадку, коли важливою є інформація, яку містять високочастотні просторові компоненти, наприклад якщо обробці підлягають оптичні знімки високого розрізнення. Методи корекції розмиття космічних зображень, або «високочастотної корекції» були розроблені у роботах [7, 8]. Але оскільки застосування цих методів належить до точнішого аналізу зображень, то є сенс попередньо виконувати грубу, але універсальну обробку знімків. Тому процедуру усунення послаблення та додаткового засвічування сигналу, що розглядається в даній роботі, будемо називати попередньою корекцією. Крім того, з огляду на область застосування методу попередньої корекції, слід зауважити, що він є більш універсальним, тобто змістовним не тільки для знімків з високим, але й з середнім та низьким розділенням. Це пов'язано з тим, що ефект поглинання та розсіювання світла в атмосфері є причиною спотворення всіх знімків, а дифракційні ефекти спостерігаються лише на знімках високого розрізнення.

Процедура корекції складається з двох частин:

- 1) встановлення параметрів атмосфери як оптичного фільтра;
- 2) попіксельного використання оберненого фільтра для отримання відкоригованого зображення, тобто практичної реалізації.

#### ВСТАНОВЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АТМОСФЕРИ ЗА ДАНИМИ ЗНІМКА

**Фізична модель впливу атмосфери на фотометричні характеристики природних утворень.** Внаслідок впливу атмосфери істинні яскравості і контрасти об'єктів можна спостерігати без спотворень тільки у безпосередній близькості до земної поверхні. Якщо ж точка спостереження об'єкта розташована на значній висоті від

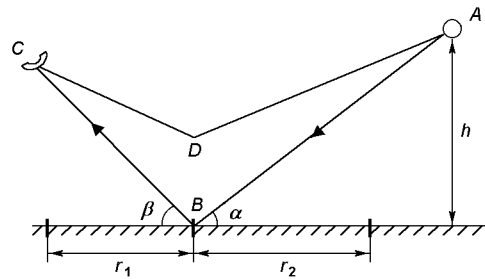


Рис. 1. Поширення сонячних променів в атмосфері

нього, то фотометричні характеристики образу не будуть ідентичними прообразу внаслідок наявності повітряної димки. Проявом повітряної, або атмосферного серпанку є ефект освітлення атмосферного шару, обумовлене розсіюванням частини світлових променів, що проходять через цей шар. У залежності від природи походження розсіювальних часток розрізняють:

- молекулярний чи релєвський серпанок, що утворюється внаслідок розсіювання світлового потоку на молекулах газів атмосфери. Цей серпанок називають «голубим», тому що він відповідає за колір неба.
- аерозольний серпанок, що виникає внаслідок аерозольного розсіювання. За своєю природою може бути пиловим, водяним тощо. Цей серпанок в однаковій мірі розсіює усі видимі промені [8], тому його називають «сірим».

Розглянемо процес поширення сонячних променів в атмосфері, зображений на рис. 1: точкою  $A$  позначено місце входу сонячного проміння в атмосферу,  $C$  — місцеположення космічної камери, яка знімає точку  $B$  на земній поверхні. Оскільки сонячний промінь проходить через атмосферу, то частина його розсіюється і попадає в камеру, не відбившись від Землі (шлях  $ADC$ ). Та частина, що дійшла до Землі, не дістанеться до приймача також внаслідок розсіювання та поглинання. Отже, сигнал, який реєструється камерою, складається із світла, відбитого в точці  $B$  та послабленого в  $k$  разів на шляху  $ABC$ , та з продукту розсіювання  $a$ , отриманого на шляху  $ADC$ . Зафіксований сигнал буде визначатись лінійним законом

$$y = kx + a, \quad (1)$$

де  $y$  — яскравість, зареєстрована прибором на космічному апараті,  $x$  — вхідний сигнал, що попадає в атмосферу від поверхні (шукана яскравість земної поверхні),  $a$  — яскравість розсіяного сигналу (яскравість повітряного серпанку),  $k$  — коефіцієнт послаблення сигналу.

**Обчислення невідомих коефіцієнтів атмосферного серпанку.** Задача полягає у встановленні параметрів  $a$  і  $k$ , за допомогою яких виконується подальше відновлення відбитого від Землі сигналу  $x$ .

У процесі поширення сонячного проміння в атмосфері на шляху  $AB$  (рис. 1) відбувається послаблення його яскравості:

$$dE = -\sigma E dx, \quad (2)$$

де  $\sigma$  — коефіцієнт поглинання атмосфери, який залежить тільки від її локальної густини, а вона, в свою чергу, лише від висоти  $h$ , тобто  $\sigma = \sigma(h)$ . Тоді у точку  $B$  доходить послаблене випромінювання:

$$E = E_0 \exp \left[ - \frac{\int \sigma(h) dh}{\sin \alpha} \right]. \quad (3)$$

Тут  $E_0$  — універсальна константа сонячного випромінювання на верхній границі атмосфери. Позначивши так звану оптичну густину атмосфери  $\int \sigma(h) dh = \tau$ , отримаємо

$$E = E_0 \exp \left( - \frac{\tau}{\sin \alpha} \right). \quad (4)$$

Відбите у точці  $B$  випромінювання  $x$  є добутком падаючого випромінювання  $E$  і коефіцієнта  $r$  відбиття підстильної поверхні:

$$x = rE, \quad (5)$$

Згідно з формулою (1) отримаємо для сигналу у в точці  $C$

$$y = kx + a = \exp \left( - \frac{\tau}{\sin \beta} \right) + a \quad (6)$$

(тут враховано, що поглинання на шляху  $BC$  і  $AB$  однакове).

Для двох близьких точок зображення, одна з яких належить до ділянки з коефіцієнтом відбиття  $r_1$ , а друга — до ділянки з коефіцієнтом відбиття  $r_2$ , з високою точністю виконується умова  $\beta_1 = \beta_2$ . Тоді різниця двох сусідніх зареєстрованих сигналів дорівнює

$$\begin{aligned} y_2 - y_1 &= \exp \left( - \frac{\tau}{\sin \beta} \right) (x_2 - x_1) = \\ &= \exp \left( - \frac{\tau}{\sin \beta} \right) (r_2 - r_1) \exp \left( - \frac{\tau}{\sin \alpha} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

З виразу (7) обчислимо невідоме значення  $\tau$ , і потім знаходимо  $k$ :

$$\tau = \frac{\sin \alpha \sin \beta}{\sin \alpha + \sin \beta} \ln \left[ \frac{(r_2 - r_1) E_0}{y_2 - r_y} \right], \quad (8)$$

$$k = \exp \left( - \frac{\tau}{\sin \beta} \right) = \left[ \frac{y_2 - y_1}{(r_2 - r_1) E_0} \right]^{\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha + \sin \beta}}. \quad (9)$$

За відомим значенням  $k$  знаходимо

$$a = y_1 - kx_1 = \frac{y_1 r_2 - y_2 r_1}{r_2 - r_1}. \quad (10)$$

Отже, наведені розрахунки для двох точок зображення з різними відомими коефіцієнтами відбиття ( $r_1 \neq r_2$ ) дозволяють встановити коефіцієнти послаблення та розсіяння сигналу за формулами (9) та (10) відповідно.

#### ВІДБИВАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРИРОДНИХ УТВОРЕНЬ

Практична реалізація запропонованої процедури вимагає використання табличних значень коефіцієнтів відбиття  $r_1$  та  $r_2$  природних утворень, які фігурують у виразах (9) та (10).

Фундаментальні дослідження відбивальних властивостей різних природних об'єктів виконані Е. Л. Криновим [9]. Розроблена ним спектрофотометрична класифікація природних утворень (рис. 2) знаходить широке застосування і в даний час.

**Клас I. Оголення і ґрунти:**

- тип 1 — чорнозем і субпіщані ґрунти, ґрунтові дороги й інші об'єкти;
- тип 2 — ґрунти підзолисті, глиняні й інші, шосейні дороги, деякі типи будівель;
- тип 3 — піски, різні оголення пустелі, деякі гірські породи;
- тип 4 — вапняк, глина й інші світлі об'єкти.

**Клас II. Рослинні утворення:**

- тип 1 — хвойні породи лісових насаджень у літній період, суходільні луки і трав'яні покриви з досить соковитою рослинністю;

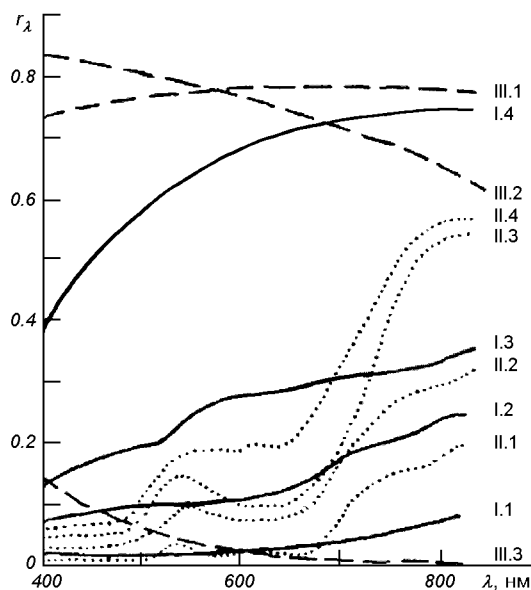


Рис. 2. Графіки спектральних коефіцієнтів відбиття природних утворень

тип 3 — лісові насадження листяних порід у літній період і всі трав'яні покриви з густою і соковитою рослинністю;

тип 4 — лісові насадження в період осіннього забарвлення і дозрілі (пожовтілі) польові культури.

**Клас III.** Водяні поверхні, водойми і сніговий покрив:

тип 1 — сніг, покритий крижаною кіркою;

тип 2 — свіжий сніг;

тип 3 — водяна поверхня, що відбиває блакитне небо під великим кутом до нормалі.

Дана класифікація застосовна як до окремих елементів, що утворюють природний покрив даної місцевості, так і до цілих ландшафтів. Наприклад, при наявності снігового покриву весь ландшафт приймає властивості, властиві об'єктам третього класу. Пустелі, випалені степи, голі скелі й області помірного поясу ранньою весною чи пізньою осінню в силу жовто-бурого забарвлення можуть бути віднесені до першого класу, а області, покриті зеленою рослинністю, — до другого класу.

Фактичне значення коефіцієнта спектральної яскравості природних об'єктів залежить від геометричних умов освітлення і спостереження,

характеру відбивної поверхні, шорсткості, вологості, вегетаційного періоду рослинності, пори року, ступеня покриття рослинністю, типу ґрунтів і т. д. Але ця залежність є незначною, тому вище наведений графік може бути використаний для корекції космічних знімків [3, 5].

#### ПРИКЛАД ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕДУРИ КОРЕКЦІЇ

У формулах фігурують кути нахилу КА та Сонця. Ці параметри повинні бути знайдені із просторово-часових характеристик, що супроводжують знімок.

Розглянемо знімок, зроблений 21 серпня 2000 р. апаратом ETM<sup>+</sup> у каналі 62 з космічного супутника LANDSAT 7 над географічною точкою  $\lambda = 44.6129^\circ$ ,  $\varphi = 33.0989^\circ$ . При цьому кут на Сонце складає  $52.37^\circ$ , азимут —  $143.37^\circ$ , кут зору —  $90^\circ$ .

З цих даних отримуємо значення  $\alpha = 52.37^\circ$ ,  $\beta = 90^\circ$ .

Географічна прив'язка дозволяє встановити, що на знімку є вода та пісок біля неї (на цікавлять дві сусідні ділянки). З рис. 2 знаходимо значення  $r_1 = 0.2$  (пісок, належить до класу I.3);  $r_2 = 0.05$  (вода, клас III.3).

Зі знімка знаходимо яскравості, що відповідають цим поверхням:  $y_1 = 220$ ,  $y_2 = 150$ .

Далі за допомогою формул (9) та (10) обчислюємо необхідні параметри та виконуємо попіксельне відновлення космічного знімка.

#### ВИСНОВКИ

В роботі запропоновано нову адаптивну процедуру для проведення низькочастотної атмосферної корекції оптичних космічних знімків. В її основу покладено формули коефіцієнтів послаблення та розсіяння, отримані авторами, та дані про відбивальні властивості підстильних поверхонь. Низькочастотна корекція космічних знімків є досить легкою для кінцевого виконання. Але основна складність полягає у визначенні коефіцієнтів відбивання підслідних поверхонь. Задача значно спрощується при наявності на знімку так званих тестових полігонів, про які вся потрібна інформація відома.

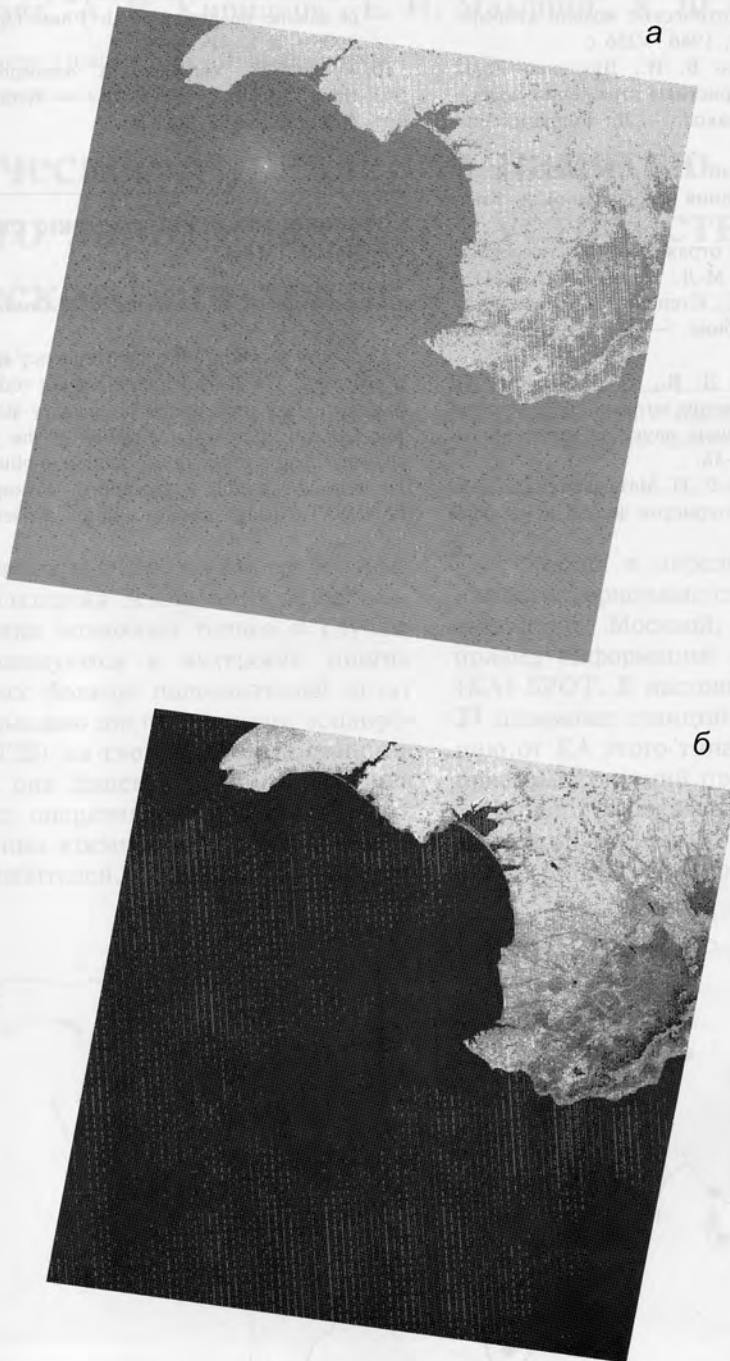


Рис. 3. Космічний знімок LANDSAT (а) та відкоригований знімок (б)

1. Белан Б. Д. Пространственная изменчивость характеристик атмосферного аэрозоля. — Новосибирск: Сиб. Отд-ние АН СССР, 1989.—145 с.
2. Зуев В. Е., Креков Г. М. Оптические модели атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1986.—256 с.
3. Кондратьев К. Я., Биненко В. И., Дьяченко Л. Н. Альbedo и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности и облаков. — Л.: Гидрометеиздат, 1981.—232 с.
4. Кононов В. И., Федоровский А. Д., Дубинский Г. П. Оптические системы построения изображений. — Киев: Техника, 1981.—206 с.
5. Кринов Е. Л. Спектральная отражательная способность природных образований. — М-Л.: Наука, 1947.—241 с.
6. Савиных В. П., Кучко А. С., Стеценко А. Ф. Аэрокосмическая фотосъемка: Учебник. — М.: Картогеоцентр — Геоиздат, 1997.—378 с.
7. Смирнов С. А., Москвичов Д. В., Терлецкий Р. П. Методика оцінювання параметрів оптичної передаточної функції атмосфери // Космічна наука та технологія.—2004.—10, № 2/3.—С. 51—58.
8. Смирнов С. А., Терлецкий Р. П. Математична модель оптичних передатних характеристик земної атмосфери // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 4.—С. 64—72.
9. Stamnes K., Wei Li. Challenges in atmospheric correction of satellite imagery // J. Photo-Opt. Instrumentation.—2005.—N 1.—P. 1—9.
10. Vermote E., Vermeulen A. Atmospheric correction algorithm: spectral reflectance. — NASA, 2004.—107 p.—(Contract NAS5-96062).

---

#### LOW-FREQUENCY ATMOSPHERIC CORRECTION OF SPACE IMAGES

*S. A. Smirnov, R. P. Terletsky, I. S. Gontarenko*

An adaptive procedure for low-frequency space image correction is proposed. The formulas obtained for reduction and dispersion coefficients are used at the preliminary stage of the procedure. The following practical realization of the procedure lies in the pixel-by-pixel inverse transformation to obtain a corrected image. To test the adaptive procedure, atmospheric correction of LANDSAT 7 image was successfully carried out.