

УДК 681.327.12.001.362:535

Томографічна обробка даних бортових фотометричних спостережень

О. С. Коноваленко, В. М. Івченко, В. П. Лапчук

Київський національний університет ім. Тараса Шевченка

Надійшла до редакції 28.02.00

Двовимірна томографічна обробка даних бортових фотометричних вимірювань дозволяє відтворювати структуру (розподіл яскравості) світних областей іоносфери. Розглянуто метод Кормака, який застосовується для обробки даних супутникових спостережень іоносфери на лімбі Землі. Проведено моделювання бортових спостережень лімба та томографічної обробки модельних даних методом Кормака.

1. ВСТУП

В роботі розглянуто деякі методи томографічної обробки даних фотометричних спостережень емісій іоносфери з борту космічного апарата. Для оцінки можливостей томографії при лімбових фотометричних вимірюваннях проведено моделювання бортових спостережень та томографічної обробки даних. В проекті «Попередження» [1] планується виконувати спектрофотометричні спостереження лімба Землі в площині орбіти КА за допомогою фур'є-спектрометра, який буде зображення лімба (рис. 1).

Двовимірна томографічна обробка даних таких вимірювань дозволить відтворити структуру (розподіл яскравості) світних областей іоносфери за висотою вздовж орбіти КА. Як правило, оптична товщина емісій верхньої атмосфери у видимому діапазоні спектра $\tau \ll 1$, що сприяє використанню

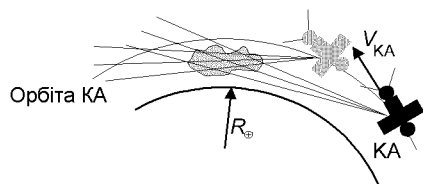


Рис. 1. Геометрія лімбових спостережень

© О. С. КОНОВАЛЕНКО, В. М. ІВЧЕНКО, В. П. ЛАПЧУК, 2000

томографічних методів. Однак кути огляду об'єкта значно менші 180° , і це суттєво обмежує можливість томографічної реконструкції світної області.

Метод лімбових спостережень часто використовується для досліджень емісій в ІЧ-діапазоні спектру, бо спостереження слабких емісій на фоні «теплої» земної поверхні практично неможливі. В оптичному діапазоні лімбові спостереження дозволяють за рахунок геометрії в декілька разів збільшити оптичну товщину емісійних шарів, тобто зменшити вимоги до чутливості приймальної апаратури або покращити часову (і значить просторову) роздільну здатність отримуваних даних. Попередні розрахунки вказують на можливість лімбових вимірювань емісій іоносфери з КА на орбіті висотою біля 600 км з відносною фотометричною точністю до 3 % при використанні фотоприймача на базі ПЗЗ-матриці з об'єктивом 70—90 мм, часом накопичення 0.2—2 с і роздільною здатністю по висоті 2—5 км.

2. ВИБІР МЕТОДУ ТОМОГРАФІЧНОЇ ОБРОБКИ

Існує великий вибір томографічних методів відтворення структури світних областей. При виборі методу слід враховувати кількість та геометрію

спостережень, характеристики реєструючої апаратури, а також час обчислень на наявній обчислювальній техніці.

Існуючі методи можна умовно розділити на кілька основних типів [2]:

А. Методи проекційного відтворення

А.1. Двовимірне проекційне відтворення

А.1.1. Метод паралельних пучків

А.1.2. Метод «віяла»

А.2. Тривимірне проекційне відтворення

Б. Ітераційні методи

Б.1. Алгебраїчне перетворення

Б.2. Метод максимальної подібності

В. Методи фур'є-перетворень

Коротко розглянемо деякі з вище вказаних методів.

А. Методи проекційного відтворення використовуються для реконструкції об'єкта, який досліджується рівномірно з усіх сторін (об'єкт або реєструюча апаратура мають кутовий ступінь волі не менше 180°) та відстань від нього до реєструючої апаратури є постійною величиною. На рис. 2 показано схему вимірювань при застосуванні методу паралельних пучків (двовимірний випадок): $f(x, y)$ — невідома функція розподілу, OO' — відстань від об'єкта до реєструючої апаратури, реєструючі датчики розташовані вздовж осі $O'x'$.

Нехай функція $p_\varphi(x')$, де $\varphi \in [0; 180^\circ]$, $x' \in (-\infty; \infty)$, описує проекційні дані реєструючої апаратури. Тоді зв'язок $p_\varphi(x')$ з невідомою функцією розподілу $f(x, y)$ задається виразом

$$p_\varphi(x') = \int_{-\infty}^{\infty} f(x', y') dy' = \int \int f(x, y) \delta(x \cos \varphi + y \sin \varphi - x') dx dy,$$

а перехід від системи координат об'єкта xOy до координатної системи реєструючої апаратури $x'O'y'$ задається виразом

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}.$$

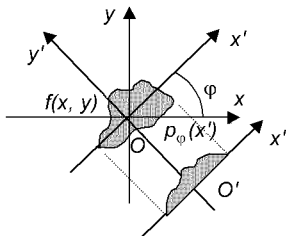


Рис. 2. Схема вимірювань при застосуванні методу паралельних пучків

Функцію $p_\varphi(x')$ можна розкласти в ряд Фур'є за просторовою координатою x' :

$$P_\varphi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p_\varphi(x') \exp(-i\omega x') dx' = F(\omega_x, \omega_y)|_\varphi = F(\omega, \varphi),$$

де $F(\omega_x, \omega_y)$ — двовимірне перетворення Фур'є функції $f(x, y)$, $\omega_x = \omega \cos \varphi$, $\omega_y = \omega \sin \varphi$. Можна показати, що невідома функція розподілу $f(x, y)$ знаходиться так:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \left[\int_{-\infty}^{\infty} dx' p_\varphi(x') h(x \cos \varphi + y \sin \varphi - x') \right],$$

де $h(x') = F^{-1}(|\omega|)$ — зворотне перетворення Фур'є $|\omega|$.

Б. В найпростіших ітераційно-алгебраїчних методах область атмосфери, що спостерігається, розглядається як матриця елементів або пікселів (рис. 3) заданого розміру, кожне i -те спостереження b_i ($i = 1, \dots, n$) є сумою добутків яскравостей x_j на довжину оптичних шляхів A_{ij} ($j = 1, \dots, m$, $m \leq n$) всіх елементів матриці, які знаходяться в напрямку даного спостереження. Для всіх n вимірів можна записати систему лінійних алгебраїчних рівнянь з m невідомими:

$$Ax = b.$$

З геометрії спостережень для кожного i -го виміру розраховуються оптичні шляхи A_{ij} в усіх елементах, які належать даному вимірюванню. Таким чином, невідомі яскравості можна знайти, розв'язавши систему лінійних рівнянь. Одну з модифікацій цього методу описано в роботі [3]. Частина атмосфери, що спостерігається, також можна подати у вигляді сферично паралельних шарів. В роботі [4] розглянуто алгоритм, що дозволяє відтворювати світні області за допомогою ітеративних процедур.

Розглянувши ці два принципово різні томографічні методи, можна зробити висновки про мож-

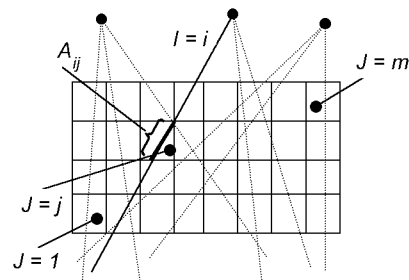


Рис. 3. Схема вимірювань при застосуванні методу алгебраїчного перетворення

лівість їх застосування до обробки даних лімбових спостережень емісій іоносфери. Геометрія лімбових вимірювань така, що світні області спостерігаються в обмеженому куті огляду, що не відповідає вимогам методів проекційного відтворення. Такі алгоритми можна застосовувати при надирних спостереженнях емісій іоносфери з високоорбітальних супутників.

Метод алгебраїчного перетворення не вигідно застосовувати через суттєве, в декілька разів, збільшення лінійного розміру елементів світної області при невеликій (до 300) кількості вимірів, що призводить до погіршення точності розрахунків та збільшення затрат часу на обчислення ітерацій.

3. МЕТОД КОРМАКА

Метод, розроблений А. Кормаком [5, 6], дозволяє відтворювати світну область, використавши лише лімбові спостереження. Розглянемо перетворення Кормака. Будемо вважати поле зору фотометра нескінченно малим і нехтувати самопоглинанням на шляху поширення світла та часом накопичення приладу.

На рис. 4 зображено геометричні побудови для пояснення зв'язку між функцією інтегральної яскравості $f(p, \varphi)$, яка спостерігається з борту КА на висоті H , та елементарною функцією яскравості утворення $g(r, \theta)$ в площині орбіти КА. Обидві функції f та g зручно задати в полярних координатах. Кожен лінійний інтеграл $f(p, \varphi)$ є сумою всіх $g(r, \theta)$ вздовж напрямку, який задається відстанню p (від центра Землі) та кутом φ (від деякого опорного). Їх можна розкласти в ряд Фур'є за кутовою координатою:

$$f(p, \varphi) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} F_n(p) e^{in\varphi}, \quad (1)$$

$$g(r, \theta) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} G_n(r) e^{in\theta}$$

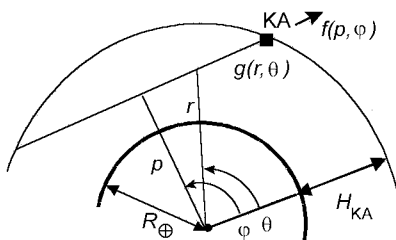


Рис. 4. Зв'язок між f та g . Кожен лінійний інтеграл $f(p, \varphi)$ є сумою всіх $g(r, \theta)$ вздовж напрямку, який задається відстанню p (від центра Землі) у площині орбіти КА та кутом φ (від деякого опорного)

де

$$F_n(p) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(p, \varphi) e^{-in\varphi} d\varphi,$$

$$G_n(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} g(r, \theta) e^{-in\theta} d\theta$$

— коефіцієнти ряду Фур'є. Можна показати, що аналітичний зв'язок між $F_n(p)$ та $G_n(r)$ задається за допомогою перетворення Кормака [5, 6]:

$$G_n(r) = -\frac{1}{\pi} \frac{d}{dr} \int_r^{\infty} \frac{r F_n(p) T_n(p/r)}{p(p^2 - r^2)^{1/2}} dp, \quad (2)$$

де $T_n(p/r)$ — поліном Чебишева I роду n -го степеня. Максимальним значенням верхньої межі інтегрування є радіус орбіти КА (у випадку колової орбіти) $R = R_{\oplus} + H$, або таке значення p при якому ще визначена функція $f(p, \varphi)$.

Можна спростити (2) шляхом диференціювання по r та інтегрування частинами останнього виразу [7]:

$$G_n(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{dp}{(p^2 - r^2)^{1/2}} \frac{d}{dp} F_n(p) T_n(p/r) \quad (3)$$

Для чисельного інтегрування останнього виразу необхідно позбутися сингулярності в знаменнику, при $p \rightarrow r$. Для цього функцію $F_n(p)$ можна аналітично задати так, щоб $\frac{d}{dp} F_n(p) \propto (p^2 - r^2)^{1/2}$. В [7] пропонується заміна $x = p/r$, і функція $F_n(p)$ інтерполюється квадратичним сплайном $Ax^2 + Bx + C$. Тоді (3) можна записати так:

$$G_n(r) = -\frac{1}{\pi} [2Ar I_{1,n} + B I_{0,n}], \quad (4)$$

де

$$I_{m,n} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{x^m T_n(x)}{(x^2 - 1)^{1/2}} dx.$$

Інтеграл $I_{m,n}$ знаходиться за допомогою рекуррентного співвідношення для полінома Чебишева I-го роду степеня n :

$$T_n(x) = 2xT_{n-1}(x) - T_{n-2}(x). \quad (5)$$

Наші чисельні розрахунки показали, що рекурсивні процедури потребують значного часу для обчислення коефіцієнтів (4).

В даній роботі пропонується позбутися сингулярності в (2) шляхом заміни $p' = \sqrt{p^2 - r^2}$. Тоді (2) можна записати так:

$$G_n(r) = \frac{-1}{\pi} \frac{d}{dr} \int_0^{\sqrt{R^2-r^2}} \frac{r F_n(\sqrt{p'^2+r^2}) T_n(\sqrt{p'^2+r^2}/r)}{p'^2+r^2} dp', \quad (6)$$

де поліном Чебишева обчислюється за формулою:

$$T_n(x) = \frac{1}{2} \left\{ [x + \sqrt{(x^2-1)}]^n + [x - \sqrt{(x^2-1)}]^n \right\} \quad (7)$$

при $|x| \geq 1$. Формула (7) дає вигреш у швидкості обрахування полінома Чебишева $T_n(x)$ приблизно в $n!$ разів порівняно з рекурсивною процедурою (5).

Підставляючи (6) в другу формулу (1) можна знайти яскравість g в точці з координатами (r, θ) . Виходячи з того, що $g(r, \theta)$ та $f(p, \varphi)$ — дійсні функції від дійсних величин, останні можна розкласти в звичайний тригонометричний ряд Фур'є. Тоді $n = 0, 1, 2, \dots, n_{\max} - 1$, де n_{\max} — кількість коефіцієнтів ряду Фур'є.

Слід зауважити, що даний метод томографічної обробки даних фотометричних спостережень можна застосовувати лише для лімбових спостережень, при яких в поле зору реєструючого приладу не попадає поверхня Землі. З (2) видно, що математично це можна записати

$$p > r > R_{\oplus}, \quad (8)$$

інакше при $r < R_{\oplus}$ значення функції $g(r, \theta)$ не матимуть фізичного змісту. Тому для обробки надирних спостережень слід користуватись іншим методом.

4. АЛГОРИТМ ТОМОГРАФІЧНОЇ ОБРОБКИ МЕТОДОМ КОРМАКА

Нижче наведено алгоритм томографічної обробки даних методом Кормака. В формулі (6) коефіцієнти $F_n(p)$ ряду

$$f(p, \varphi) = F_0(p) + 2 \sum_{n=1}^{n_{\max}} [F_n^c(p) \cos(n\varphi) + F_n^s(p) \sin(n\varphi)],$$

визначаються так:

$$\begin{aligned} F_0(p) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(p, \varphi) d\varphi, \\ F_n^c(p) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(p, \varphi) \cos(n\varphi) d\varphi, \\ F_n^s(p) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(p, \varphi) \sin(n\varphi) d\varphi. \end{aligned} \quad (9)$$

Для чисельного інтегрування останніх виразів дискретно задані значення $\{\varphi_i, p_i, f_i\}$ інтерполюються сплайнами другого порядку [8] для визначення функції $f(p, \varphi)$ для будь-яких $p \in [p_{\min}, p_{\max}]$ та $\varphi \in [\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$. Коефіцієнти ряду Фур'є функції $g(r, \theta)$ визначаються за допомогою перетворення Кормака (6):

$$G_0(r) = \frac{-1}{\pi} \frac{d}{dr} \int_0^{\sqrt{R^2-r^2}} \frac{r F_0(\sqrt{p^2+r^2})}{p^2+r^2} dp, \quad (10)$$

$$G_n^{c,s}(r) = \frac{-1}{\pi} \frac{d}{dr} \int_0^{\sqrt{R^2-r^2}} \frac{r F_n^{c,s}(\sqrt{p^2+r^2}) T_n(\sqrt{p^2+r^2}/r)}{p^2+r^2} dp,$$

де

$$T_n(x) = \frac{1}{2} \left\{ [x + \sqrt{(x^2-1)}]^n + [x - \sqrt{(x^2-1)}]^n \right\}$$

— поліном Чебишева I роду степеня n при $|x| \geq 1$. Верхня межа інтегрування була вибрана максимальною: $R = p_{\max}$. Кількість врахованих коефіцієнтів ряду Фур'є n_{\max} обмежена тим, що при збільшенні n_{\max} збільшиться похибка другого інтеграла (10) внаслідок високого степеня полінома Чебишева. Інтеграли (9), (10) визначаються методом трапецій з точністю 1—5 %.

Функція яскравості світної області $g(r, \theta)$ визначається за формулою

$$g(r, \theta) = G_0(r) + 2 \sum_{n=1}^{n_{\max}} [G_n^c(r) \cos(n\theta) + G_n^s(r) \sin(n\theta)].$$

5. МОДЕЛЮВАННЯ БОРТОВИХ ФОТОМЕТРИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ СВІТНИХ ОБЛАСТЕЙ

Для відпрацювання томографічної обробки даних було проведено моделювання бортових фотометричних спостережень. В полярних координатах (r, θ) задавався модельний об'єкт з гауссовим розподілом яскравості $g(r, \theta)$ (за лінійною та кутовою координатами) на висоті h від поверхні Землі (рис. 5).

Для модельних розрахунків задавались такі параметри: висота орбіти КА $H = 600$ км, поле зору $\omega = 1.6^\circ$, кількість фоточутливих елементів лінійки спектрофотометра $N = 32$. При цьому роздільна здатність по висоті складає 2.4 км для тангенційної віддалі 2445 км до об'єкта на висоті 100 км. Моделювання спостережень полягає у визначенні лінійної інтегральної яскравості $f_i(p_i, \varphi_i)$ для кожного окремого виміру $i = 1, \dots, N_{\text{obs}}$ за відомим співвідношенням Радона:

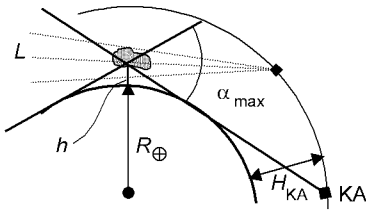


Рис. 5. Геометрія бортових фотометричних спостережень світної області іоносфери на висоті h

$$f_1(p_1, \varphi_1) = \int_L g(r, \theta) dl, \quad (11)$$

де L — лінія інтегрування; $g(r, \theta)$ — розподіл яскравості модельного об'єкта. Кількість вимірів N_{obs} задається в межах кута α_{max} , який визначається формулою

$$\alpha_{\text{max}} = 2 \arccos \frac{R_{\oplus}}{R_{\oplus} + h},$$

В межах цього кута всі спостереження $f(p, \varphi)$ мають лінійну координату $p > R_{\oplus}$. Це відповідає умові (8). Для висоти модельного об'єкта $h = 100$ км α_{max} становить 20° , і при збільшенні висоти збільшується повільно (рис. 6). При реальних спостереженнях кут α_{max} ще менший, тому що фотометричні вимірювання поблизу поверхні Землі ($p \approx R_{\oplus}$) не використовуються.

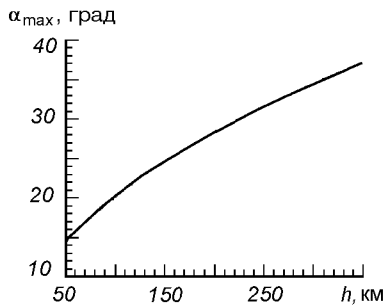


Рис. 6. Залежність кута огляду від висоти об'єкта

6. РЕЗУЛЬТАТИ

За описаним вище алгоритмом була проведена томографічна обробка модельних даних методом Кормака, результати якої подані на рис. 7–9. Задавалися кілька модельних об'єктів з гауссовим розподілом $g(r, \theta)$ яскравості.

Наближення моделювання до реальних вимірювань створювалось двома способами: 1) введенням

шумової складової до результатів спостережень, що імітує «темновий струм» та шум зчитування фотоприймача, та 2) введення фону, на якому спостерігається об'єкт.

На рис. 7 наведено результат томографічної обробки спостережень трьох модельних об'єктів (а). Розподіл яскравості модельного об'єкта I задається ідеальною гауссіаною в координатах висота h , довгота θ (в площині орбіти КА). Відтворений об'єкт (б) має розподіл яскравості, близький до модельного (а), але амплітуда гауссіани на 20 % менша. Також помітна відмінність у розподілу по кутовій координаті θ (в). Це є наслідком того, що модельні об'єкти «спостерігалися» при невеликому куті огляду α .

Для об'єкта II ідеальна гауссіана зашумлена. До функції вимірів $f(p, \varphi)$ додавалася випадкова додатна величина Δf (використано генератор випадкових чисел з періодом 2^{32}), така що $0 \leq \Delta f \leq \eta \max(f(p, \varphi))$, де $\eta \in (0, 1)$. Таким чином, в модельні спостереження додавався шум з максимальною амплітудою 100η відсотків від максимального значення функції $f(p, \varphi)$. 30 %-не «зашумлення» призвело до збільшення відносної амплітуди яскравості відтвореного об'єкта на 20–30 %. Проведені розрахунки показали, що при шумі з амплітудою менше 10 % від сигналу похибкою можна нехтувати.

При реальних спостереженнях емісій іоносфери завжди є фон, який погіршує відношення сигнал/шум. Модель фону III, величина якого постійна по кутовій координаті (г) і має гауссовий розподіл з висотою (в), та його відтворення (б) також зображені на рис. 7. В даному випадку фон можна розглядати як протяжний об'єкт (вздовж кутової координати θ), який виходить за межі кута огляду α_{max} . Тому по кутовій координаті θ фон практично не відтворився.

На рис. 8 наведено результати обробки модельного об'єкта — ідеальної гауссіани, з амплітудою фону 80 % від амплітуди модельного об'єкта. Відсутність інформації про кутові розміри фону призводить до появи артефактів та збільшення амплітуди відтворених об'єктів на 20–50 %, а інколи і в 2–3 рази.

Можливості застосованого методу для розділення двох об'єктів демонструються рис. 9. Модель I — два ідентичні об'єкти з гауссовим розподілом яскравості по лінійній та кутовій координатах, розташовано на однаковій висоті. Модель II — ці ж об'єкти з доданим 30 % фоном (постійним по кутовій координаті), модель III — два об'єкти на різних висотах.

Як видно з рисунків, найкраще відтворилися

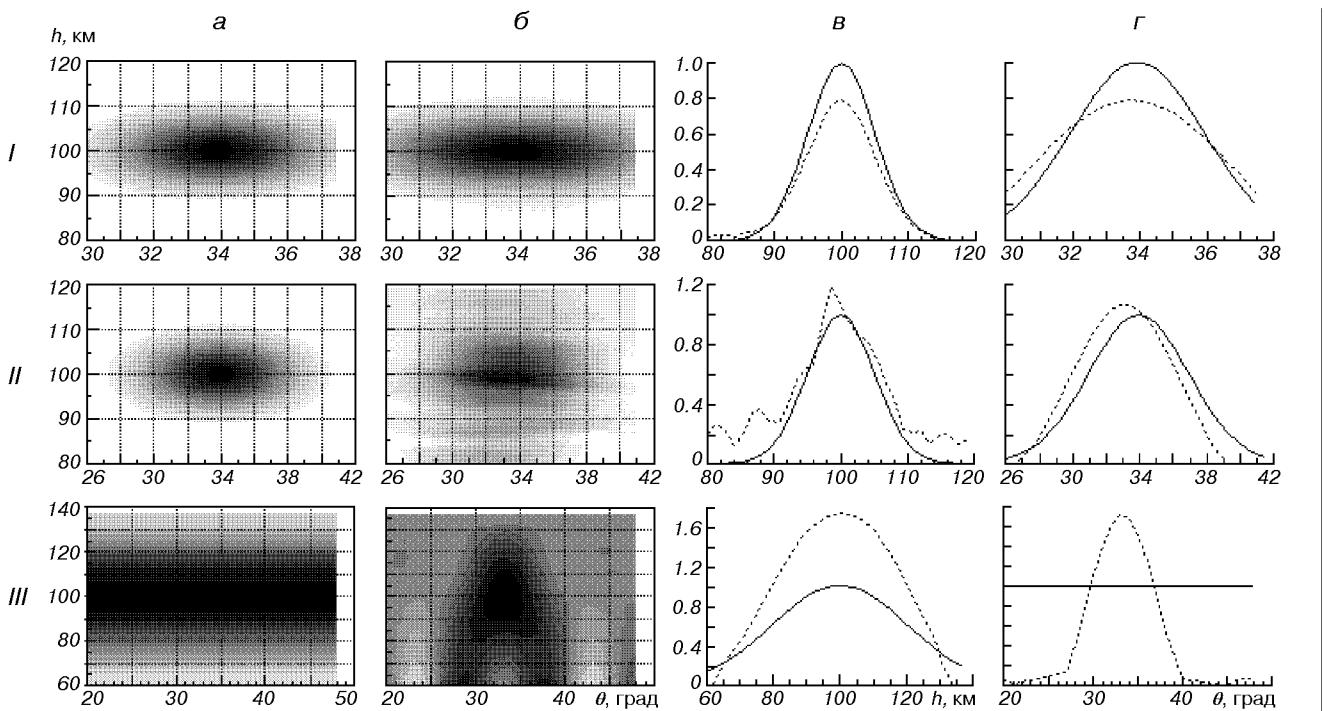


Рис. 7. Розподіли яскравості та профілі по лінійній та кутовій координатах для випадків: I — модельний об'єкт з гауссовим розподілом яскравості; II — модельний об'єкт I, до «спостережень» якого додано 30 %-й білий шум; III — модель фону з гауссовим розподілом по лінійній координаті та постійний — по кутовій. *a* — модельний об'єкт; *б* — відтворений об'єкт за 320 вимірами; *в* — профіль за лінійною координатою h ; *г* — профіль за кутовою координатою. Суцільна лінія — профіль модельного об'єкта, штрихова — відтвореного

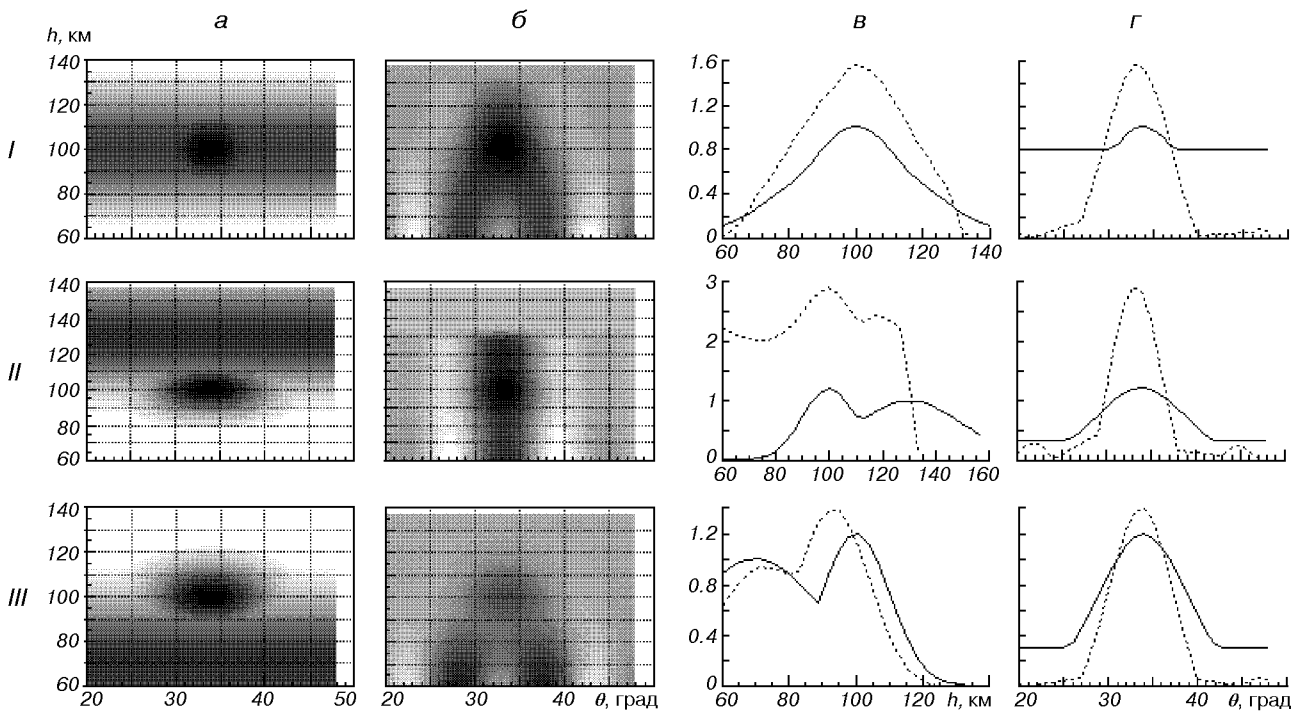


Рис. 8. Розподіли яскравості та профілі по лінійній та кутовій координатах для випадків: I — модельний об'єкт з гауссовим розподілом яскравості та 80 % фон; II — модельний об'єкт «під 80 % фоном»; III — модельний об'єкт «над 80 % фоном». *a* — модельний об'єкт; *б* — відтворений об'єкт за 320 вимірами; *в* — профіль за лінійною координатою h ; *г* — профіль за кутовою координатою. Суцільна лінія — профіль модельного об'єкта, штрихова — відтвореного

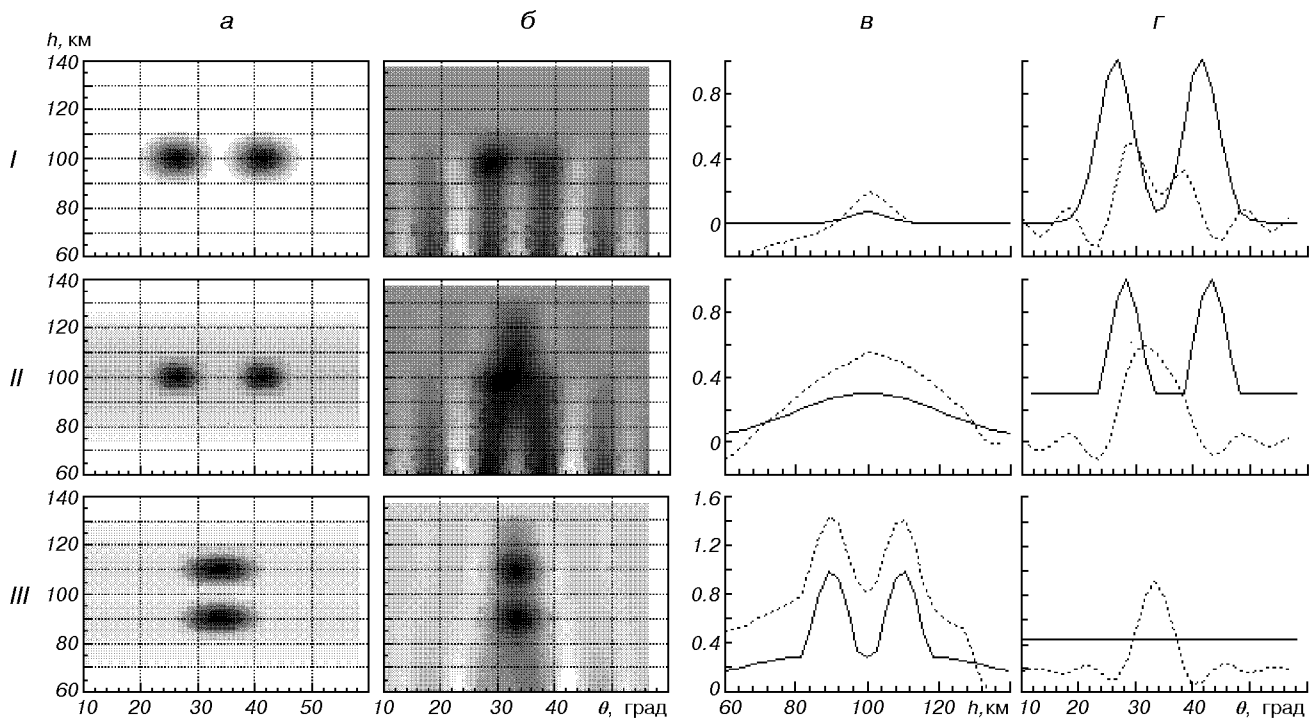


Рис. 9. Розподіли яскравості та профілі по лінійній та кутовій координатах для випадків: I — два модельних об'єкти з гауссовим розподілом яскравості, розташовані на однаковій висоті; II — два модельних об'єкти з доданим 30 % фоном; III — два модельних об'єкти з гауссовим розподілом яскравості, розташовані на різних висотах. *a* — модельний об'єкт; *б* — відтворений об'єкт за 320 вимірами; *в* — профіль за лінійною координатою h ; *г* — профіль за кутовою координатою. Суцільна лінія — профіль модельного об'єкта, штрихова — відтвореного

об'єкти з найбільшим кутовим розміром. Це наслідок того, що при відтворенні враховувалося всього 40 коефіцієнтів ряду Фур'є. При врахуванні більшої кількості коефіцієнтів значно збільшується час обробки, зростає похибка обчислення інтегралів (9), (10), та у відтворених об'єктах з'являються артефакти внаслідок високого степеня поліномів Чебишева.

Слід зауважити, що при чисельних розрахунках лінійних інтегралів (11) в моделюванні спостережень поле зору фоточутливого пристрою вважалося нескінченно малим. Тому питання впливу поля зору на якість томографічного відтворення в даній роботі не розглядалось.

Час обробки даних томографічних спостережень залежить від кількості вимірів, точності визначення інтегралів (9), (10) та їхньої кількості (кількості точок або пікселів, у яких визначається функція $g(r, \theta)$). Для 320 вимірів, 2 %-ї точності інтегралів, кількості точок 900 (30×30 пікселів) час обробки становить 1—4 год на ПК «Pentium 166 МГц» з операційною системою UNIX, і біля 1 год на ПК з процесором «Celeron 400 МГц».

Метод Кормака дає задовільні результати при умовах: 1) висота об'єкта більша 300 км, 2) відносно мала яскравість фону, наприклад при спостереженнях в авроральних областях. Для висот 100 км кут огляду $\alpha_{\max} = 20^\circ$ і мінімальний розмір об'єкта 4 км за висотою та 2° за кутовою координатою, для висоти 225 км — $\alpha_{\max} = 30^\circ$, мінімальний розмір об'єкта 3.4 км на $1^\circ.8$. Для слабкоконтрастних об'єктів в іоносфері на висотах, менших 300 км, необхідні інші методи, з використанням надирних спостережень. В роботі [7] метод Кормака успішно використовувався для відтворення світних областей на висотах 300—400 км.

Детальний аналіз (обмеження, вимоги до методів спостережень) та порівняння декількох томографічних методів обробки даних спостережень іоносфери розглядається в роботі [10], в якій кожен метод перевірено чисельним моделюванням.

Робота частково підтримувалась за рахунок теми Міносвіти та НАН України № 197U015786 та гранта INTAS-CNES-97-1769.

1. Коцаренко М. Я., Корепанов В. Є., Івченко В. М. Дослідження іоносферних провідників землетрусів (експеримент «Попередження») // Космічна наука і технологія.—1995.—1.—№ 1.—С. 96—99.
2. Cho Z. H. Computerized Tomography // Encyclopedia of Physical Science and Technology. — London: Acad. press., 1987.—Vol. 3.—P. 507.
3. Kunitake M., Ohtaka K. Tomographic imaging of the ionosphere over Japan by the modified truncated SVD method // Ann. Geophysicae.—1995.—13.—P. 1303—1310.
4. Fesen C., Hays P. Two-dimensional technique for satellite airglow data. // Appl. Opt.—1982.—21.—P. 3784.
5. Cormack A. M. Representation of a Function by its Line Integrals with Some Radiological Applications. // J. Appl. Phys.—1962.—34.—P. 2722.
6. Cormack A. M. Representation of a Function by its Line Integrals with Some Radiological Applications II. // J. Appl. Phys.—1964.—35.—P. 2906.
7. Solomon S. C., Hays P. B. Tomographic Inversion of Satellite Photometry. // Appl. Opt.—1984.—23.—P. 3409.
8. Eberly D. The Magic of 3D Worlds: A Practical Approach to Real-Time Computer Graphics. Morgan-Kaufmann Publishers, San Francisco, CA. To appear, March 2000. Or article «Quadratic Interpolation of Meshes» on http://www.magic-software.com/gr_intp.htm/meshintp.pdf
9. Sutton E., Na H. A Block Iterative Algorithm for Tomographic Reconstruction of Ionospheric Electron Density. Department of Electrical and Computer Engineering, Univ. of Iowa. // Preprint to appear in Int. J. Imag. System Technol.—1996., <http://www.icaen.uiowa.edu/~ecsutton/cit/cit.html>.
10. Frey H., Frey S., Larson D., Nygren T., Semeter J. Tomographic methods for magnetospheric applications. // Science Closure and Enabling Technologies for Constellation Class Missions eds. V. Angelopoulos and P. V. Panetta (Berkeley).—1998.—P. 72—77., <http://sprg.ssl.berkeley.edu/atmos/publication/constellation.html>.

TOMOGRAPHIC PROCESSING OF ONBOARD PHOTOMETRIC MEASUREMENTS

O. S. Konovalenko, V. M. Ivchenko, and V. P. Lapchuk

Defining the location and structure of airglow needs tomographic data processing of photometric measurements. The Cormack inversion is used for tomographic reconstruction of airglow. Both the observed function of column brightness and the volume emission rate function of airglow may be expanded in a Fourier series. The inversion allows the Fourier coefficients of volume emission rate function to be obtained using the Fourier coefficients of the observed function of column brightness. The software was developed, and a numerical simulation of onboard observations and their tomographic processing was made.