

УДК 519.87+681.513

С. А. Смирнов¹, Д. В. Москвічов², Р. П. Терлецький²

¹Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, Київ

²Фізико-технічний інститут Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Київ

Методика оцінювання параметрів оптичної передатної функції атмосфери

Надійшла до редакції 04.06.04

Розроблено методику параметричної ідентифікації оптичної функції передачі модуляції атмосфери, для чого застосовано прямий підхід на основі МНК для розв'язання поставленої задачі. Його особливість пов'язана з вирішенням нелінійних рівнянь, яке потребує складних комп'ютерних обчислень. Побудовано алгоритм оцінювання параметрів оптичної передатної функції (ОПФ). Визначено невідомі коефіцієнти ОПФ реальної атмосфери. Отримані результати можуть бути використані для попередньої обробки та атмосферної корекції аерокосмічних знімків високого розрізнення.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ З ВІДНОВЛЕННЯ СИГНАЛІВ

Для опису процесів поширення випромінювання у земній атмосфері широко використовується поняття лінійної системи. Позначимо через $s(x)$ закон зміни вхідної дії, а через $f(x)$ — функцію на виході системи. Будемо називати $s(x)$ сигналом, а $f(x)$ — відгуком.

В лінійних системах співвідношення між змінами фізичних величин зображаються лінійними диференціальними рівняннями. Розглянемо звичайне лінійне диференціальне рівняння порядку n зі змінними коефіцієнтами:

$$a_0(x) \frac{d^n f(x)}{dx^n} + a_1(x) \frac{d^{n-1} f(x)}{dx^{n-1}} + \dots + a_n(x) f(x) = s(x) \quad (1)$$

і відповідне йому операторне рівняння з диференціальним оператором D

$$Df(x) = s(x), \quad (2)$$

які зв'язують вихідний і вхідний сигнали деякої лінійної системи [1].

Припустимо спочатку, що граничних умов немає, і існує лише деякий оператор H такий, що $DH = I$, де I — одиничний оператор. Тоді формально можна записати

$$f(x) = Hs(x). \quad (3)$$

З'ясуємо зміст оператора H , поклавши, що вхідною дією є одиничний імпульс, який прикладений до деякої точки $x = \xi$, тобто сигналом є функція Дірака $\delta(x - \xi)$. Тоді вихідний сигнал h , як відгук системи в точці x на імпульсний вхідний сигнал в точці ξ , є функцією двох незалежних змінних x і ξ та повинен задовольняти рівняння

$$Dh(x, \xi) = \delta(x - \xi). \quad (4)$$

Якщо існує обернений оператор, то відгук повинен дорівнювати

$$h(x, \xi) = H\delta(x - \xi). \quad (5)$$

Представимо $s(x)$ у вигляді інтегральної суми зміщених одиничних імпульсів та, враховуючи властивість суперпозиції, що дозволяє переносити оператор під знак суми, з (3) формально отримаємо

$$f(x) = H \left[\int_{-\infty}^{\infty} s(\xi) \delta(x - \xi) d\xi \right] = \int_{-\infty}^{\infty} s(\xi) H [\delta(x - \xi)] d\xi.$$

Враховуючи рівність (5), знаходимо

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x, \xi) s(\xi) d\xi. \quad (6)$$

Таким чином, H -інтегральний оператор з ядром $h(x, \xi)$.

Інтеграл вигляду (6) звичайно виражає частковий фундаментальний розв'язок рівняння (1). Для отримання загального розв'язку до часткового розв'язку необхідно додати всі розв'язки однорідного рівняння

$$Df(x) = 0. \quad (7)$$

Якщо область значень незалежних змінних обмежена деяким проміжком $[a, b]$ та задані визначені граничні умови (початкові або крайові), то загальний розв'язок рівняння (1) в припущенні про неперервність всіх коефіцієнтів $a_0(x), a_1(x), \dots, a_n(x)$ та функції $s(x)$ буде

$$f(x) = \int_a^b h(x, \xi) s(\xi) d\xi + \sum_{i=1}^n c_i f_i(x), \quad (8)$$

де $f_i(x)$ — лінійно незалежні розв'язки однорідного рівняння (7), c_i — постійні, що визначаються з граничних умов.

Іноді вдається визначити функцію $h(x, \xi)$ таким чином, що сума у правій частині виразу (8) стає малою. Тоді частковий розв'язок

$$f(x) = \int_a^b h(x, \xi) s(\xi) d\xi \quad (9)$$

одночасно є і загальним розв'язком рівняння (1).

Розглянутий вище процес визначення відгуку $f(x)$ за інформацією про вхідний сигнал $s(x)$ складає зміст так званої прямої задачі.

Нас цікавить задача відновлення сигналу $s(x)$ за інформацією про відгук $f(x)$, яка в даному розумінні є оберненою задачею [2]. Якби коефіцієнти $a_0(x), a_1(x), \dots, a_n(x)$ диференціального рівняння системи були апріорно відомі, то розв'язання оберненої задачі — значення сигналу $s(x)$ — можна було б знайти безпосередньо з рівняння (1). Але в практичній задачі відновлення вся інформація про характеристики системи спостереження звичайно зображається у вигляді вагової функції $h(x, \xi)$. В цьому випадку розв'язок оберненої задачі будемо називати основним інтегральним рівнянням оберненої задачі.

ВИМОГИ ДО ЧАСТКОВИХ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ЯКОСТІ СИСТЕМ

При безпосередньому оцінюванні якості системи, тобто оцінки за одним з часткових критеріїв, система, що досліджується, порівнюється з іншими

системами аналогічного призначення. Це необхідно для того, щоб з набору можливих систем вибрати одну, яка може врахувати конкретні умови експлуатації. Така постановка задачі є актуальною як на етапі проектування, коли відбувається вибір одного з декількох можливих варіантів, так і на етапах випробувань і експлуатації, коли необхідно вирішити, яку з наявних систем рекомендувати до використання.

Бажано, щоб вибраний критерій дозволяв отримати оцінку якості систем у вигляді одного числа. Обґрунтований вибір того чи іншого критерію може бути проведений лише з урахуванням конкретного призначення системи та умов її експлуатації [8]. Основним призначенням розглянутих в даній роботі систем є побудова оптичних зображень об'єктів. Під якістю таких систем розуміють їхню властивість відображати у побудованих ними зображеннях з тою чи іншою імовірністю інформацію про геометричні та фотометричні властивості різних об'єктів.

При виборі критерію якості оптичних систем необхідно враховувати наступні фактори: характер сигналу, що попадає на вхід оптичної системи, вид обробки, якій підлягають вхідні сигнали та вихідне зображення, та ефект, який ми очікуємо отримати з досліджуваної оптичної системи. Критерій оцінки якості оптичної системи представляється в інтегральному вигляді, що дозволяє оцінювати якість системи по сукупності основних її параметрів, забезпечувати можливість встановлення взаємозв'язку між значеннями критерію та інформативністю зображення. Він також забезпечує можливість отримання характеристик якості ланок, побудованих на використанні різних фізичних принципів та застосування для оцінки якості зображення кожної ланки та всієї системи в цілому.

КРИТЕРІЇ, ОСНОВАНІ НА ВИКОРИСТАННІ ПОГРАНИЧНОЇ КРИВОЇ

В число характеристик якості зображення входить суб'єктивна величина, що називається різкістю, яка характеризує зону переходу на кордоні між світлим і темними частинами зображення. Тому різкість тісно пов'язана з формою пограничної кривої. Але практика показує, що величина зони нерізкості пограничної кривої безпосередньо не корелює із різкістю осі, що сприймається суб'єктивно. Тому використати саму пограничну криву для оцінки якості зображення в загальному випадку складно. В зв'язку з цим був запропонований цілий ряд чисельних оцінок, основаних на використанні

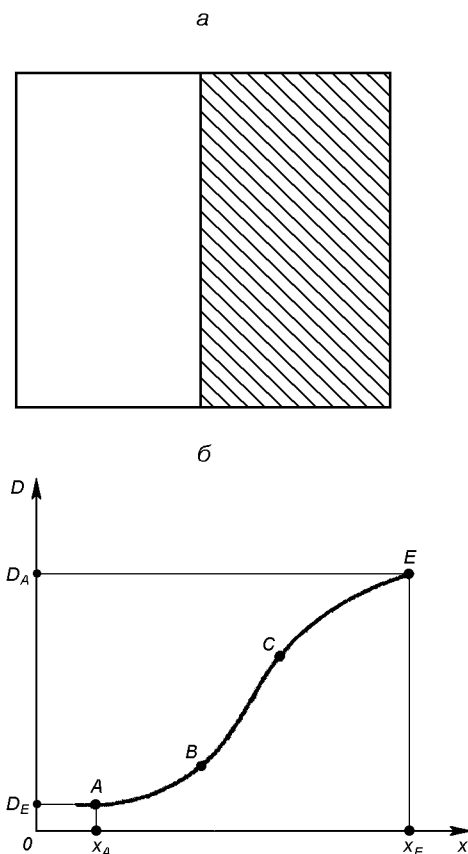


Рис. 1. Зображення півплощини — тест-об’єкта для вимірювання пограничної кривої (а) та графік пограничної кривої (б) ($\Delta x = x_E - x_A$ — ширина пограничної кривої)

даних, отриманих з пограничної кривої.

Для знаходження самої пограничної кривої отримують зображення об’єкта, край якого є границею розподілення світлого та темного зображень (рис. 1, а), потім за допомогою мікрофотометра визначають зміну оптичної густини D в пограничній зоні, будують пограничну криву $D = f(x)$ (рис. 1, б) і аналізують її. Розмах пограничної кривої ΔD є мірою контрасту зображення, а її форма, кут нахилу прямолінійної ділянки та повна протяжність зони нерізкості — мірою різкості зображення. Якби система відображення була ідеальною, то між густинами в точках D_A і D_E спостерігався би різкий стрибок, але через різні похибки системи крива переходу від світлого зображення до темного має деякий нахил.

На графіку пограничної кривої (рис. 1, б) можна виділити три ділянки: початкова ділянка AB , прямолінійна BC та кінцева ділянка CE . Точки A та E вибираються в такому місці граничної кривої, де зміна оптичної густини складає 0.005 на 1 мкм.

Оскільки реакція зору, згідно з законом Вебера—Вехнера [3], пропорційна логарифму освітленості, різкість зображення слід оцінювати в значеннях градієнта густини dD/dx пограничної кривої. Реальні пограничні криві мають на різних ділянках різні градієнти густини.

Як міра різкості використовуються такі величини [7]: максимальний градієнт густини

$$G_{\max} = \left(\frac{dD}{dx} \right)_{\max} \quad (10)$$

та середнє квадратичне значення градієнтів граничної кривої:

$$A = \sqrt{G_x^2} = \sqrt{\frac{1}{x_E - x_A} \int_A^E \left(\frac{dD}{dx} \right)^2 dx}, \quad (11)$$

де x_A та x_E — точки початку і кінця згину пограничної кривої; ΔDG_{\max} — числове значення різкості за значеннями максимального градієнта густини.

Оцінка оптичних систем за пограничною кривою має такі особливості [5]:

- вона є об’єктивною, тобто не залежить від суб’єктивних особливостей спостерігача, а тому точніша при наявності відповідної апаратури та ретельному виконанні випробувань;
- оцінка якості оптичної системи може бути виконана без спеціальної міри, що істотно розширює можливості використання методу в умовах реальної експлуатації.

Ще однією характеристикою якості оптичної системи є функція передачі модуляції (ФПМ). При використанні кривої ФПМ для оцінки оптичної системи можна отримати максимум інформації про передатні властивості цієї системи чи окремої її ланки та проводити вибір ланок та систем, виходячи з конкретних специфічних вимог. Зокрема, ФПМ є незамінним параметром для синтезу систем за окремими ланками [6].

Аналогічною до ФПМ характеристикою якості системи є оптична передатна функція (ОПФ) та частотно-контрастна функція (ЧКХ — нормована ОПФ). ОПФ описує процес передачі сигналу в просторово-частотній області і зв’язана з ФПМ через перетворення Фур’є.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНОЇ ФУНКЦІЇ

В роботі [6] досліджувалось поширення оптичного випромінювання в земній атмосфері, розглянуто основні типи механізмів трансформації оптичних

сигналів, пов'язаних із молекулярним, аерозольним та турбулентним розсіянням світла, та побудовано модель атмосфери. Для цієї моделі була побудована ОПФ з деякими невідомими параметрами, які на момент зйомки є невідомими і повинні визначатись додатково. Значення цих параметрів залежать від певних фізичних властивостей, що накладаються на передатну функцію. Тому визначення цих параметрів можливе лише для конкретного випадку.

В даній роботі демонструється можливість ідентифікації ОПФ шляхом оцінювання невизначених параметрів. Для цього необхідно розробити методичку, яка була б найбільш пристосованою для задач такого типу.

Крім того, розроблений алгоритм має давати фізично коректний результат, тобто значення оцінених параметрів для конкретної задачі ідентифікації мають лежати в інтервалі установлених значень.

Для викладення методички розглянемо пограничну криву для деякого космічного знімка, що був отриманий при зйомці через атмосферу з частотно-контрастною характеристикою

$$H_1(\nu) = e^{-2000 \cdot \sigma} \left[\frac{\nu \cdot 2000}{a} + \sqrt{1 + \left(\frac{\nu \cdot 2000}{a} \right)^2} \right]^{ca/\nu}. \quad (12)$$

Сканер високого розрізнення, що знаходиться на борту космічного апарата, сканує підстилаючу поверхню перпендикулярно до руху апарата, формує і передає на Землю дані порядково. Тому є сенс обробляти космічний знімок також порядково. Був би сканера така, що зареєстрована інформація є дискретною, тобто в певному пікселі ми отримуємо деяке усереднене значення інтенсивності освітленості фрагменту поверхні [4]. Спотворення сигналу, які при цьому виникають, тут розглядатися не будуть. Погранична крива повинна будуватись за цими дискретними значеннями і відображати перехід освітленості на границі двох об'єктів у зображенні.

На рис. 2 зображено деяку реалізацію пограничної кривої (крива 1).

Для аналітичної роботи з дискретною пограничною кривою нам необхідно апроксимувати її відомою функцією. Так, експериментально було підібрано таку трипараметричну сім'ю функцій:

$$f(x) = \frac{B-A}{\pi} \left[\arctg(C \cdot x) + \frac{\pi}{2} \right] + A. \quad (13)$$

Параметри функції A , B , C визначають положення та вигляд пограничної кривої. Якби система відображення була ідеальною, то ми отримали б

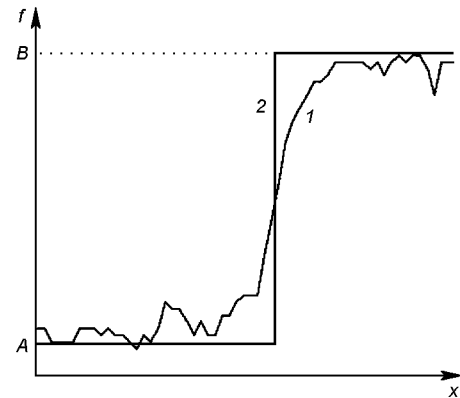


Рис. 2. Деяка реальна (1) та ідеальна (2) пограничні криві

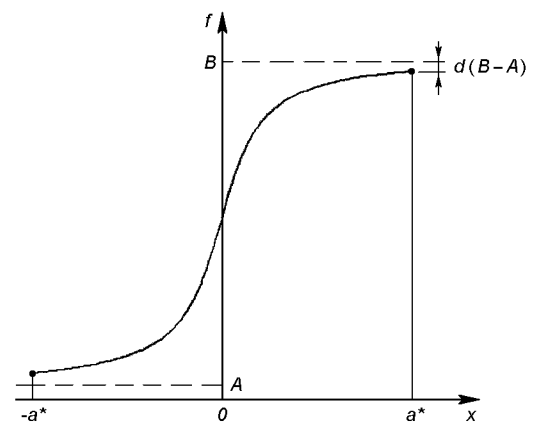


Рис. 3. Обмеження пограничної кривої

для цього ж знімка як пограничну криву так звану сходинок (рис. 3):

$$f(x) = \begin{cases} A, & x \leq 0, \\ B, & x \geq 0, \end{cases} \quad (14)$$

де A і B — значення оптичних густин на заданих проміжках. Тут між точками A і B , що виступають модельними значеннями оптичних густин, спостерігається різкий стрибок.

Отримана погранична крива знаходиться в просторовій області, а контрастно-частотна характеристика (12) — в області просторових частот. Перехід від просторових до просторово-частотних змінних можна зробити, застосувавши до функції (13) перетворення Фур'є. Основна проблема цієї процедури — та, що отримані інтеграли не можливо порахувати аналітично.

Для розв'язання даної задачі необхідно зробити перехід від перетворення Фур'є до рядів Фур'є, та розглядати пограничну криву у певній обмеженій області.

Обмежимо цю область точками A і B , у яких погранична крива відхиляється від асимптот на деяку малу величину $d(B - A)$ (рис. 3):

$$B - f(a^*) = d(B - A). \quad (15)$$

В даному випадку ширина області $2a^*$ визначається з виразів (13) і (15):

$$a^* = \frac{1}{C} \operatorname{tg} \left[\pi \left(\frac{1}{2} - d \right) \right]. \quad (16)$$

Після знаходження меж пограничної кривої можна записати функцію сходінки:

$$f(x) = \begin{cases} A, & -a^* \leq x \leq 0, \\ B, & 0 \leq x \leq a^*. \end{cases} \quad (17)$$

При такій постановці задачі перехід від перетворення Фур'є до рядів Фур'є буде цілком законним.

РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ

Розкладемо в ряди Фур'є вхідний сигнал (17):

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{a^*} + b_n \sin \frac{n\pi x}{a^*} \right), \quad (18)$$

де

$$a_n = \frac{1}{a^*} \int_{-a^*}^{a^*} f(x) \cos \frac{n\pi x}{a^*} dx, \quad (19)$$

$$b_n = \frac{1}{a^*} \int_{-a^*}^{a^*} f(x) \sin \frac{n\pi x}{a^*} dx, \quad (20)$$

Остаточно розклад функції (17) матиме вигляд

$$f(x) = \frac{A+B}{2} + \frac{2(B-A)}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{\sin \frac{(2n+1)\pi x}{a^*}}{2n+1} \right] \quad (21)$$

Сім'єю просторових частот у даному випадку є

$$\nu = (2n+1) \frac{\pi}{a^*}, \quad n \geq 0, \quad (22)$$

а коефіцієнти Фур'є функції (17) будуть такими:

$$f(\nu) = \begin{cases} \frac{2(B-A)}{\nu a^*}, & \nu = (2n+1) \frac{\pi}{a^*}, \quad n > 0, \\ \frac{A+B}{2}, & \nu = 0, \end{cases} \quad (23)$$

Ряд Фур'є для функції (13) будемо обчислювати за такою ж самою схемою. В результаті отримаємо вираз

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(b_n \sin \frac{n\pi x}{a^*} \right), \quad (24)$$

де

$$b_n = \frac{1}{a^*} \int_{-a^*}^{a^*} \left[\frac{B-A}{\pi} \left(\operatorname{arctg}(C \cdot x) + \frac{\pi}{2} \right) + A \right] \sin \frac{n\pi x}{a^*} dx. \quad (25)$$

Для частот (22) отримуємо відповідні амплітуди:

$$\begin{aligned} b_{2n+1} &= \frac{1}{a^*} \frac{B-A}{\pi} \int_{-a^*}^{a^*} \operatorname{arctg}(C \cdot x) \sin \frac{\pi(2n+1)x}{a^*} dx = \\ &= \frac{1}{a^*} \frac{B-A}{\pi} h_{2n+1}. \end{aligned} \quad (26)$$

ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ

Спочатку визначимо співвідношення між функцією входу та виходу. З формули (6) випливає така рівність:

$$f_{\text{вх}}(\nu) H(a, \sigma, \nu) = f_{\text{вих}}(\nu), \quad (27)$$

де $f_{\text{вх}}(\nu)$ — функція сходінки, а $f_{\text{вих}}(\nu)$ — погранична функція зображення на виході передавальної системи, обидві функції визначені у просторово-частотній області. Частотно-контрастна характеристика атмосфери $H(a, \sigma, \nu)$ визначена формулою (12).

Проілюструємо описаний метод проведення оцінювання параметрів функції $H(a, \sigma, \nu)$ на конкретному прикладі. Для цього розглянемо частину космічного знімка, отриманого за допомогою оптичного сканера високого розрізнення МСУ-Е супутника «Метеор-3М».

Далі проведемо поетапний опис процедури.

1. Вибираємо частину зображення (рис. 4, а).
2. Відцифруємо зображення та приводимо до вигляду «відтінки сірого».
3. Вибираємо довільний рядок зсередини (наприклад 20-й) — далі він буде моделювати пограничну криву.
4. Визначаємо положення границі між середовищами. Для цього знаходимо максимальний перепад інтенсивності освітлення.
5. Знаходимо реальні значення параметрів апроксимаційної для пограничної кривої функції

$$A + \frac{B-A}{\pi} \left[-\operatorname{arctg}(C \cdot x) + \frac{\pi}{2} \right]$$

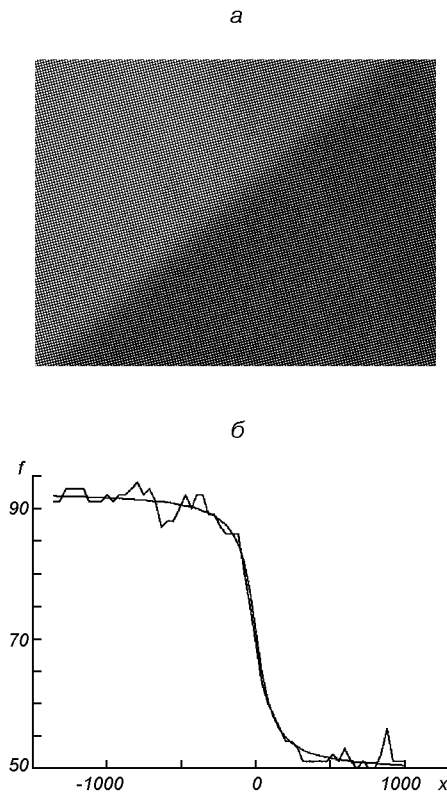


Рис. 4. Частина космічного знімка (а) та апроксимована погранична крива (б)

(знак мінус перед арктангенсом взято через те, що чорніша сторона знаходиться справа).

Вектор значень X формується так, що на границі середовищ він рівен нулю. Крок дискретизації вибрано 40 м (роздільна здатність камери).

6. Апроксимована погранична крива приведена на рис. 4, б. Її параметри: $A = 49.246$, $B = 92.689$ та $C = 0.012178$.

7. Визначаємо ефективні границі пограничної кривої a^* (формула (16)). Було вибрано $d = 0.02$, тоді $a^* = 1305$.

8. Підставляючи у формулу (27) вирази (23) та (26), отримуємо

$$-\frac{2(A-B)}{\pi(2n+1)} H(a, \sigma, \nu) = -\frac{B-A}{s^* \pi} h_{2n+1},$$

або

$$\frac{2a^*}{2n+1} H(a, \sigma, \nu) = h_{2n+1}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

За допомогою цього виразу будемо проводити ідентифікацію параметрів ОПФ.

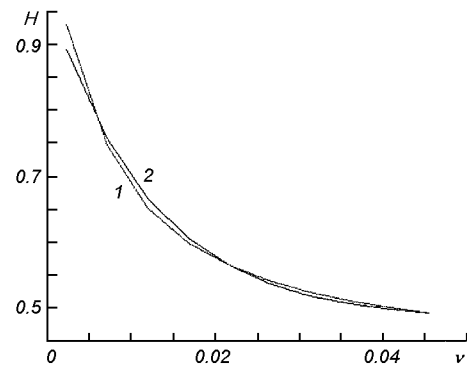


Рис. 5. Результати оцінювання: 1 — передатна функція з визначеними параметрами, 2 — відношення вихідної функції до вхідної

9. Обчислюємо величину h_{2n+1} .

10. Використовуємо функцію MatLab *nlinfit.m*, яка на основі МНК оцінює невідомі параметри передатної функції. Для досліджень взято 10 гармонік. Початкові значення параметрів $\sigma = 0.0002$, $a = 3$.

Отримані результати зображено на рис. 5. Тут лінія 2 — це відношення вихідної функції до вхідної, а 1 — передатна функція з визначеними параметрами $\sigma = 0.00046$, $a = 6.2477$.

Отже, за допомогою розробленого методу ідентифікації вдалось оцінити значення коефіцієнтів, що входять у частотно-контрастну характеристику атмосфери, яка визначається формулою (12).

Підсумуємо схему алгоритму ідентифікації параметрів частотно-контрастної характеристики атмосфери $H(a, \sigma, \nu)$.

1. Підбираються найкращі параметри функції (13) для пограничної кривої.

2. За розташуванням та виглядом пограничної кривої визначаються коефіцієнти A , B , C , що входять в функцію (13).

3. Встановлюється значення параметра d , що визначає відхилення значення пограничної кривої від її асимптотики. За значеннями параметрів A , B , C та d , визначаємо ефективну довжину пограничної кривої за формулою (16).

4. Будується сходинка, яка є пограничною кривою для ідеальної передавальної системи. Будується функція, що описує сходинку (17).

5. Функції (13) та (17) переводяться у просторово-частотну область — обчислюються коефіцієнти їхніх рядів Фур'є.

6. З фізичних властивостей та загального вигляду частотно-контрастної характеристики атмосфери $H(a, \sigma, \nu)$ (12) оцінюються початкові значення параметрів a , σ .

7. За значеннями коефіцієнтів рядів Фур'є функцій (13) та (17) для виразу (17), застосовуючи функцію *nlinfit.m* із Statistics Toolbox математичної системи MatLab, оцінюються параметри a , σ .

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

В даній роботі запропоновано методику оцінювання невідомих коефіцієнтів передатної функції. Ці параметри характеризують стан атмосфери і швидко змінюються, тому вони можуть бути визначені лише для конкретного знімка. Розроблену методику перевірено на практиці для частини реального космічного знімка з однією пограничною кривою та реалізовано за допомогою програми MatLab.

В подальшому, використовуючи цю методику, планується проводити атмосферну корекцію космічних знімків високого розрізнення. Для цього потрібно розбити знімок на окремі ділянки, однорідні за якістю зображення, визначити положення границь розділу на них, отримати відповідні пограничні криві, виконати процедуру ідентифікації оптичної передатної функції та провести корекцію (наприклад, по методу інверсної фільтрації), при необхідності на кожній ділянці окремо.

ДОДАТОК

Текст програми:

```

%%%%%%%%%%%%%%1
X=imread('3.bmp');
%%%%%%%%%%%%%%2
I=rgb2gray(X);
I=double(I);
[m,n]=size(I);
%%%%%%%%%%%%%%3
b=I(20,1:1:n);
plot(b);
%%%%%%%%%%%%%%4
Dd(1)=0;
for i=2:n-1
    Dd(i)=abs(b(i+1)-b(i-1));
end
[max,pmax]=max(Dd);
%%%%%%%%%%%%%%5
X=(1-pmax)*40:40:(n-pmax)*40;
p0=[0,100,1];
global p;
p=nlinfit(X,b,@myfun,p0);
%%%%%%%%%%%%%%6
plot(X,b,X,myfun(p,X))

```

```

%%%%%%%%%%%%%%7
eps=0.02;
global a;
a=1/p(3)*tan(pi*(1/2-eps));
%%%%%%%%%%%%%%8
Num=10;
for i=1:Num
    In(i)=2*a/(2*i-1);
end
%%%%%%%%%%%%%%9
global hh;
for i=1:Num
    hh=i;
    Out(i)=quad(@fint,-a,a);
end
%%%%%%%%%%%%%%10
for i=1:Num
    nu(i)=(2*i-1)*pi/a;
end
Pr=[0.0002,3];
GG=Out./In;
Par=nlinfit(nu,GG,@ident,Pr);
%%%%%%%%%%%%%%11
figure(2);
Y=ident(Par,nu);
plot(nu,GG,nu,Y);

```

Функція myfum.m

```

function Y=myfun(p,x)
    Y=p(1)+(p(2)-p(1))/pi*(-atan(p(3)*x)+pi/2);

```

Функція ident.m

```

function H=ident(Par,nu)
    z=(2000/Par(2))*nu;
    H=exp(-2000*Par(1)).*(z+(1+z.^2).^0.5).^Par(1)*Par(2)*(1./nu);

```

Функція fint.m

```

function Y=fint(x,p,a,hh)
global p;
global a;
global hh;
Y=atan(p(3)*x).*sin((2*hh-1)*pi*x/a);

```

1. Василенко Г. И. Теория восстановления сигналов. — М.: Сов. радио, 1979.—312 с.
2. Василенко Г. И., Тараторин А. М. Восстановление изображений. — М.: Радио и связь, 1986.—304 с.
3. Кононов В. И., Федоровский А. Д., Дубинский Г. П. Оптические системы построения изображений. — Киев: Техника, 1981.—134 с.

4. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. — М.: Мир, 1982.—Т. 2.—306 с.
5. Пытев Ю. П. Задача улучшения качества изображений // Докл. АН СССР.—1979.—245, № 1.—С. 42—46.
6. Смирнов С. А., Терлецкий Р. П. Математична модель оптичних передатних характеристик земної атмосфери // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 4.—С. 64—72.
7. Шадэ О. Новая система определения и измерения четкости изображения // Оценка качества оптического изображения. — М.: Геодезиздат, 1959.—С. 243—274.
8. Шейк Р. В. Предлагаемый подход к оценке качества изображения // Оценка качества оптического изображения. — М.: Геодезиздат, 1959.—С. 291—303.

A METHOD FOR PARAMETERIZATION OF THE ATMOSPHERE OPTICAL TRANSFER FUNCTION

S. A. Smirnov, D. V. Moskvichev, R. P. Terletsky

A method of parametrical identification of optical modulation transfer function is developed with the use of the direct way on the basis of the method of least squares (LSM). The LSM's feature is concerned with solving nonlinear equations, which requires difficult computations. Parameters estimation algorithm of optical transfer function (OTF) is developed and unknown coefficients of the real atmosphere OTF are determined. Our results can be applied to the preprocessing and atmospheric correction of high-quality aerospace images.