УДК 619.785:519.9

Грищук Р.В., канд. техн. наук

КВАЗІПАРАЛЕЛЬНИЙ АЛГОРИТМ КОМП'ЮТЕРНОЇ ОБРОБКИ ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ

Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету

Запропоновано квазіпаралельний алгоритм комп'ютерної обробки гіперспектральних космічних знімків. На відміну від відомих алгоритмів, розроблений алгоритм передбачає проведення оцінювання шуканих параметрів без залучення додаткової інформації, причому ряд однотипних операцій підлягають паралельній обробці. Подано структуру алгоритму та наведено модельний приклад

Аналіз проблемної ситуації та її зв'язок із важливими практичними завданнями

Комп'ютерні способи обробки дозволяють ефективно добувати інформацію про об'єкти з цифрових матеріалів космічної зйомки, визначаючи зареєстровані на них величини спектральних характеристик – відбитого $\rho(\nu)$ та власного $\varepsilon(\nu)$ випромінювань [1]. Обробка гіперспектральних космічних знімків (ГКЗ) спряжена з високою розмірністю задачі оцінювання $\rho(\nu)$ та $\varepsilon(\nu)$, яка випливає з потреби одночасного аналізу великого масиву цифрового потоку інформації. Оперативність обробки такої інформації визначає ступінь її достовірності та відіграє важливу роль для прийняття ефективних управлінських рішень при вирішенні широкого кола народногосподарських завдань [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В основу відомих алгоритмів комп'ютерної обробки ГКЗ, таких як *TES*-алгоритм, ітераційний алгоритм послідовної кластеризації тощо, покладено принципи залучення додаткової інформації та кількаразове повторення ітераційних процедур оцінювання [1-4]. Зрозуміло, що додаткова інформація не завжди є в базі даних, а повторюваність операцій сприяє зниженню оперативності обробки. Таким чином, нерозв'язаною залишається задача оцінювання $\rho(\nu)$ та $\varepsilon(\nu)$ в умовах відсутності додаткової інформації та в масштабах часу, близьких до реального.

Метою статті є розробка алгоритму комп'ютерної обробки ГСЗ, який би усував виявлені недоліки відомих алгоритмів.

Постановка завдання

Розв'язання таких задач, як вимірювання температури поверхні Землі та розташованих на ній об'єктів з одночасним визначенням величини їх власного випромінювання, можна досягнути, використовуючи для обробки ГСЗ інфрачервоного діапазону [1].

Математична модель i-го об'єкта на ГСЗ у вказаному діапазоні має вигляд:

$$\begin{cases} 2\pi hc^{-2}\cdot\int\limits_{\nu_0}^{\nu_1} r(\nu,T_i)\cdot\varepsilon_i(\nu)_1\,d\nu = R(T_i)_1, \\ \qquad\qquad \nu\in[\nu_0,\nu_1]; \\ 2\pi hc^{-2}\cdot\int\limits_{\nu_1}^{\nu_2} r(\nu,T_i)\cdot\varepsilon_i(\nu)_2\,d\nu = R(T_i)_2, \\ \qquad\qquad \nu\in[\nu_1,\nu_2]; \quad (1) \\ \ldots \\ 2\pi hc^{-2}\cdot\int\limits_{\nu_{n-1}}^{\nu_n} r(\nu,T_i)\cdot\varepsilon_i(\nu)_n\,d\nu = R(T_i)_n, \\ \qquad\qquad \nu\in[\nu_{n-1},\nu_n], \end{cases}$$

де $R(T_i)_n$ – спектральна щільність енергетичної світності на n-му знімку ($n=1,\ldots,N$, N – кількість знімків, які підлягають обробці), $Вт\cdot Гц^{-1}\cdot м^{-2}$;

$r(\nu,T_i)$ – ядро інтегрального рівняння, $\left(r(\nu,T_i)=\nu^3\cdot\left(\exp\left(-\frac{h}{kT_i}\nu\right)\right)^{-1}\right)$;

T_i – температура i-го об'єкта, K;

h – стала Планка $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$, $\left[Вт \cdot с^2\right]$;

c – швидкість розповсюдження світла у вакуумі $c = 3 \cdot 10^8 \ \left[м \cdot с^{-1}\right]$;

ν – частота випромінювання, $\nu \in [\nu_{n-1}, \nu_n]$, $Гц$;

k – стала Больцмана, $k = 1{,}3805 \cdot 10^{-23}$ $Вт \cdot с \cdot К^{-1}$.

Виходячи з (1), потрібно розробити алгоритм оцінювання параметрів T_i і $\{\varepsilon_i(\nu)_n\}$.

Виклад основного матеріалу

Аналіз виразу (1) показує, що у такій постановці задача оцінювання є некоректною [5]. Крім того, вона значно ускладнюється через відсутність додаткових даних, що призводить до потреби зменшення множини області розв'язків шуканих параметрів, ряд з яких підлягає однотипному обчисленню. Загальновизнано, що паралельна форма обробки є перспективним напрямом в організації комп'ютерних засобів [6]. Таким чином, розроблюваний алгоритм повинен реалізувати обчислювальний процес однотипних операцій одночасно (паралельно).

Щодо розв'язання системи рівнянь (1), то задача зводиться до трансформації у квазіпаралельну форму, суть якої полягає у такому (рис. 1):

1. На підготовчому етапі вводяться дані про ГСЗ та множину об'єктів, параметри T_i і $\{\varepsilon_i(\nu)_n\}$ яких потрібно оцінити.

2. Для виключення операції кількаразового оцінювання параметра T_i i-го об'єкта за усіма n знімками, які підлягають обробці, пропонується у подальшому її виконувати один раз. Підставою цьому є можливість проведення компенсації невідомих на момент обробки параметрів $\varepsilon_i(\nu)_{n-1} \approx \varepsilon_{in-1}$ та $\varepsilon_i(\nu)_n \approx \varepsilon_{in}$ у суміжних $n-1$ та $n-$му каналах, тобто

$$\frac{2\pi h c^{-2} \cdot \varepsilon_{in-1} \int\limits_{\nu_{n-2}}^{\nu_{n-1}} r(\nu, T_i) d\nu}{2\pi h c^{-2} \cdot \varepsilon_{in} \int\limits_{\nu_{n-1}}^{\nu_n} r(\nu, T_i) d\nu} = \frac{R(T_i)_{n-1}}{R(T_i)_n}. \quad (2)$$

За умови $\varepsilon_{in-1} \approx \varepsilon_{in}$ з виразу (2) квадрат нев'язки δ_i^2 визначається як

$$\delta_i^2 = \left(R(T_i)_n - \frac{\int\limits_{\nu_{n-1}}^{\nu_n} r(\nu, T_i) d\nu}{\int\limits_{\nu_{n-2}}^{\nu_{n-1}} r(\nu, T_i) d\nu} \cdot R(T_i)_{n-1} \right)^2. \quad (3)$$

Першим критерієм $I(T_i)_1$ оцінювання T_i, з урахуванням (3), оберемо мінімізацію квадрата нев'язки виду

$$\min_{T_i} I(T_i)_1 = \sum_1^2 \delta_i^2, \quad (4)$$

при відповідних обмеженнях $0 \le I(T_i)_1 \le g \cdot 10^{-12}$, де g – розмірність, $\left[Вт \cdot м^{-2} \cdot Гц\right]$.

Для оцінювання невідомого параметра T_i, згідно з класичною теорією регуляризації за Тихоновим А.М., достатньо критерію виду (4). Як показали останні дослідження, застосування регуляризуючих алгоритмів породжує проблему вибору оптимального значення параметра регуляризації, від якого залежить точність розв'язання [7].

Введення додаткового критерію $I(T_i)_2$ усуває дану неоднозначність. Такий критерій відповідатиме за стійкість отримуваних розв'язків:

$$\min_{T_i} I(T_i)_2 = T_i^2. \quad (5)$$

Накладемо обмеження на критерій (5):

$$(250)^2 \le I(T_i)_2 \le \left(\frac{h}{5k} \left(\frac{\nu_{in}^5 - \nu_{in-1}^5}{\frac{\nu_{in}^4 - \nu_{in-1}^4}{4} - \frac{R(T_i)_n c^2}{2\pi h}} \right) \right)^2. \quad (6)$$

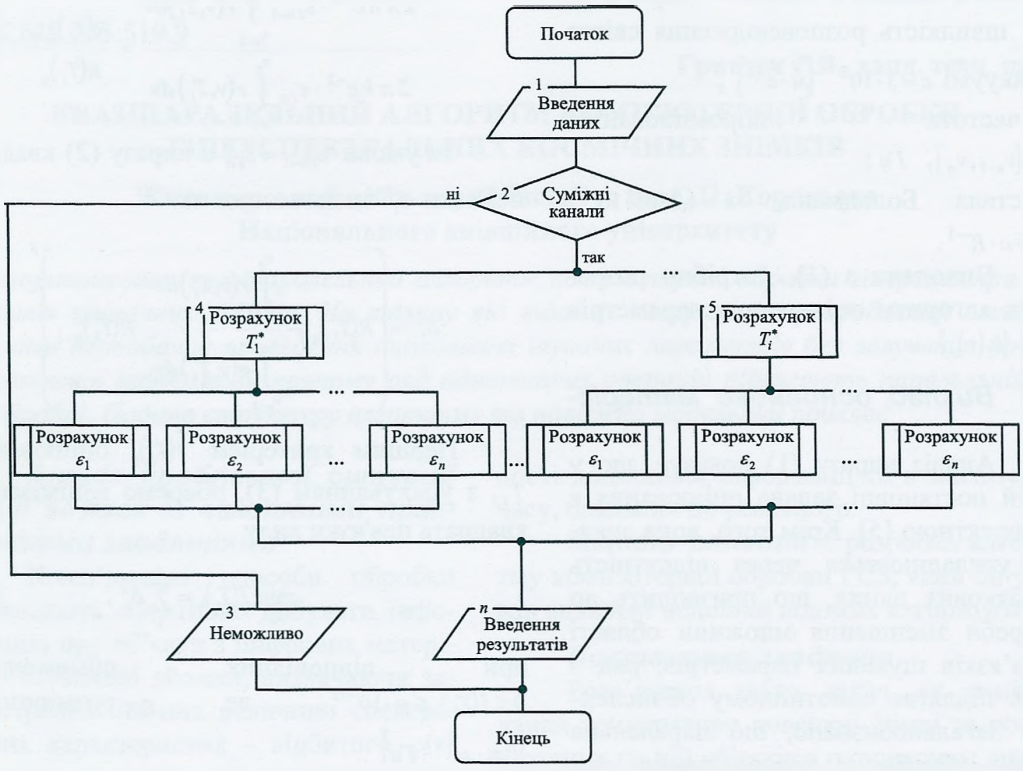

Рис. 1. Блок-схема квазіпаралельного алгоритму

Розв'язання (1) відносно T_i зводиться до двокритеріальної задачі пошуку оптимуму при конфліктуючих критеріях (4) та (5). Як показано в роботі [8], нелінійна схема компромісів гарантує отримання такого розв'язку. Для двох критеріїв така модель набуває вигляду:

$$I(T_i)^* = \frac{1}{1-\frac{1}{T_i^2}} + \frac{1}{\left(\frac{h}{5k}\left(\frac{v_{in}^5 - v_{in-1}^5}{\frac{v_{in}^4 - v_{in-1}^4}{4} - \frac{R(T_i)_n c^2}{2\pi h}}\right)\right)^2} + \frac{1}{1-\frac{\delta_{in}^2}{g\cdot 10^{-12}}}. \quad (7)$$

Застосування методу послідовного наближення до (7) дозволяє визначити оптимальну оцінку шуканого параметра.

3. На основі отриманої оцінки T_i^* визначаються $\{\varepsilon_i(v)_n\}$. Для цього критерієм точності $I(\varepsilon)_1$ обирається квадрат нев'язки за кожним з рівнянь системи (1) виду

$$\min_{\varepsilon} I(\varepsilon)_1 = \sum_1^n \left(\varepsilon_{in} \int_{v_{n-1}}^{v_n} r(v, T_i)dv - R(T_i)_{in}^B \right)^2 = \sum_1^n \delta_i^2, \quad (8)$$

при обмеженнях $0 \le I(\varepsilon)_1 \le g\cdot 10^{-3}$.

Критерій стійкості $I(\varepsilon)_2$ подамо таким виразом:

$$\min_{\varepsilon} I(\varepsilon)_2 = \sum_1^n \varepsilon_i^2, \quad (9)$$

при обмеженнях $0 \le I(\varepsilon)_2 \le \sum_1^n \left(R(T_i)_n\right)$.

Двокритеріальна модель за нелінійною схемою компромісів набуває вигляду:

$$I(\varepsilon)^* = \left(1 - \frac{\sum_1^n \delta_i^2}{g\cdot 10^{-3}}\right)^{-1} + \left(1 - \frac{\sum_1^n \varepsilon_i^2}{\sum_1^n (R(T_i))^2}\right)^{-1}. \quad (10)$$

Необхідною умовою мінімуму функції (10) для системи (1), у випадку неперервності й опуклості частинних критеріїв (8) і (9),

буде система кінцевих нелінійних рівнянь вигляду

$$\begin{cases} \dfrac{\partial I(\varepsilon)^*}{\partial \varepsilon_1} = 0; \\ \dfrac{\partial I(\varepsilon)^*}{\partial \varepsilon_2} = 0; \\ \dots \\ \dfrac{\partial I(\varepsilon)^*}{\partial \varepsilon_n} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Результати розв'язання кінцевої системи нелінійних рівнянь (11) дають змогу отримати оптимальні оцінки ε_n^*.

Модельний приклад

Для перевірки роботоздатності запропонованого алгоритму наведемо модельний приклад.

Нехай дано ГСЗ, що складається з трьох зональних знімків $\nu \in [(2.5751 \cdot 10^{13}, 2.7397 \cdot 10^{13}), (2.7397 \cdot 10^{13}, 2.9268 \cdot 10^{13}), (3.2345 \cdot 10^{13}, 3.3613 \cdot 10^{13})]$ *Гц*. Значення спектральної щільності енергетичної світності першого [18.60602252, 19.19819807, 9.615256305] $Вт \cdot Гц \cdot м^{-2}$ та другого [14.90817286, 15.31033693, 7.04274403] $Вт \cdot Гц \cdot м^{-2}$ об'єктів, відповідно. За першим і другим суміжними каналами згідно з (7) визначаються температури об'єктів (див. рис. 1), які становлять по 296 *К*. Згідно з (11) за кожним з каналів оцінюються ε_n^*, які становлять [0.9560, 0.9555, 0.9560] та [0.7675, 0.7620, 0.7660], відповідно.

Модельний приклад підтвердив очікуваний результат – квазіпаралельний алгоритм дозволяє організувати паралельну комп'ютерну обробку ГСЗ без додаткової інформації.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Розроблений алгоритм, на відміну від відомих, дозволяє провести розпаралелювання розв'язання задачі оцінювання, що дозволяє уникати потребу залучення додаткової інформації та отримувати оптимальний розв'язок без проведення додаткових ітераційних процедур.

У подальшому передбачається програмна реалізація запропонованого алгоритму.

Список літератури

1. *Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В.* Аэрокосмические методы географических исследований. – М.: Издательский центр "Академия", 2004. – 336 с.

2. *Багатоспектральні* методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / Під ред. В.І. Лялько і М.О. Попова – К.: Наук. думка, 2006. – 356 с.

3. *Matsunaga T.* A temperature-emissivity separation method using an empirical relationship between the mean, the maximum, and the minimum of the thermal infrared emissivity spectrum / Jour. Remote Sens. Soc. Japan 14(2). – 1994. – P. 230 – 241.

4. *Лабутина И.А.* Дешифрирование аэрокосмических снимков. Учеб. пособие для студентов ВУЗов. – М.: Аспект Пресс, 2004. – 184 с.

5. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986. – 288 с.

6. *Мартинова О.П.* Параллельный алгоритм маршрутизации на графах и сетях // Проблеми інформатизації та управління. – К.: НАУ, 2005. – Вип. 12. – С. 113 – 119.

7. *Засядько А.А.* Моделювання задач відновлення сигналів за допомогою багатокритеріальної оптимізації // Зб. наук. пр. ЖДТУ. – 2003. – 25, №1. – С. 95 – 98.

8. *Векторная* оптимизация динамических систем / А.Н. Воронин, Ю.К. Зиатдинов, А.И. Козлов, В.С. Чабанюк / Под ред. А.Н. Воронина. – К.: Техніка, 1999. – 284 с.