

УДК 621.396.965.8

Про один підхід до підвищення роздільної здатності складноструктурованих зображень у космічних дослідженнях

О. І. Коваль, Р. Я. Косаревич, Б. П. Русин

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів

Надійшла до редакції 22.01.98

Представлені результати застосування ітераційного методу відновлення складноструктурованих зображень (реальних знімків земної поверхні з космосу) з метою підвищення їх роздільної здатності. Досліджено вплив параметра β на результати обробки. Показана необхідність компромісного вибору величини β та кількості кроків обробки.

ВСТУП

Питання підвищення роздільної здатності складноструктурованих зображень стоїть досить гостро, оскільки далеко не всі користувачі на сьогодні задоволені тією якістю відтворення інформації, яку можуть забезпечити сучасні системи запису візуальної інформації, в тому числі бортові скануючі системи [1].

Інтенсивне дослідження і освоєння природних ресурсів Землі ставить перед дистанційними методами проблему отримання інформації з характеристиками, досягнення яких пов'язані із значними технічними труднощами. Особливо високі вимоги до роздільної здатності інформації в таких областях, як будівництво міст, впорядкування лісових угідь, сільське господарство, контроль забруднень навколишнього середовища, тощо. Окремі задачі вимагають отримання даних про просторову структуру природних об'єктів, розміри яких становлять 3–5 м, тобто знімки земної поверхні повинні мати високу якість. Ця якість буде визначатися ступенем інформативності отриманих зображень, тобто мінімальною деталлю об'єкта, яку можна ідентифікувати на зображенні.

Роздільна здатність скануючих систем з таких міркувань повинна бути якнайвищою. На сьогоднішній день існує два підходи до її підвищення. Перший — апаратний, полягає в збільшенні діаметра дзеркала сканера d (рис. 1), що спричиняє збільшення габаритів, маси установки і супутника в цілому, а значить збільшує його вартість. Другий — програмний, який прагне розв'язати проблему методом математичних перетворень, що спрямовані на компенсацію спотворень зображення в процесі його формування. Як правило, спотворення викликає впливом турбулентності атмосфери, які можна розглядати як внесення додаткового розфокусування оптичної системи, що спричиняє появу розмиття на фотознімку.

На сьогодні відомі різні підходи до покращення візуального сприйняття зображень, які спотворені розмиттям. Ситуація ускладнюється ще й наявністю шумових складових, джерелами яких є як внутрішні (вузли та блоки реєструючої апаратури), так і зовнішні фактори. Найбільш відомим підходом до покращення якості такого класу зображень є інверсна фільтрація, а також застосування фільтра Вілера, фільтра на основі методу найменших квадратів [7], що використовують двовимірне перетво-

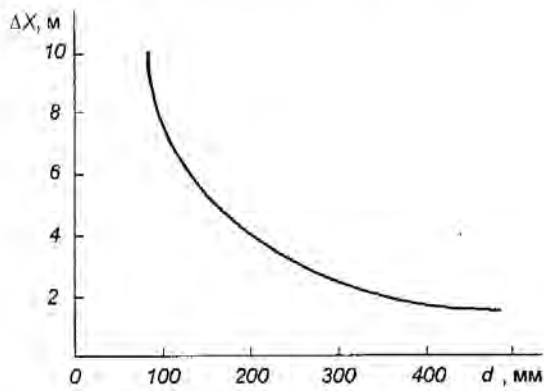


Рис. 1. Залежність роздільної здатності сучасних сканерів ΔX від діаметра дзеркала d

решня Фур'є. Для боротьби з розмиттям можна використовувати і регуляризацию Тихонова-Міллера як метод розв'язку некоректних задач [5].

ДЕЯКІ МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ, СПОТВОРЕНИХ РОЗМИТТЯМ

Розглянемо вищезгадані методи більш детально, зосередивши свою увагу на відновленні розфокусованого зображення при наявності шумів.

Застосування інверсної фільтрації. Як відомо, інверсний фільтр являє собою лінійний фільтр, передаточна характеристика якого h_{inv} обернена до функції розсіювання точки (ФРТ) h в сенсі

$$h_{\text{inv}} h = \delta,$$

де δ — дельта-функція Дірака.

Переходячи в частотну область, маємо

$$H H_{\text{inv}} = 1.$$

Дискретне представлення спотвореного зображення на виході інверсного фільтра визначається виразом:

$$F_n(m, n) = F(m, n) + H_{\text{inv}} N(m, n),$$

де $F_n(m, n)$, $F(m, n)$ — дискретизовані відповідно вихідне зображення та оригінал; $N(m, n)$ — дискретизований шум.

Таким чином, на виході інверсного фільтра маємо адитивну суміш оригіналу та підсиленого ним шуму.

Основними недоліками даного підходу є:

- а) H_{inv} не існує у випадках, коли $H \rightarrow 0$;
- б) факт широкопasmовості шуму ускладнює про-

цес відновлення через підсилення його високочастотних складових в H_{inv} разів [2].

Фільтр Вінера і метод найменших квадратів.

Для усунення чутливості інверсної фільтрації до наявності шуму у спотвореному зображенні було розроблено кілька типів фільтрів, найвідомішими серед яких є фільтр Вінера та розв'язок методом найменших квадратів. Фільтр Вінера являє собою інваріантний лінійний фільтр, в якому надмірне підсилення шуму зменшується введенням в процес відновлення інформації про спектральні складові густини потужності зображення та шуму. Частотна характеристика такого фільтра вибирається з міркувань мінімізації середньої квадратичної похибки відновлення. Розв'язок цієї задачі подається у вигляді

$$H_n(m, n) = H^*(m, n) / [|H(m, n)|^2 + S_n(m, n) / S_s(m, n)], \quad (1)$$

де $H_n(m, n)$ — дискретна частотна характеристика фільтра Вінера; $S_n(m, n)$, $S_s(m, n)$ — спектральні густини потужності відповідно шуму та сигналу; H^* — комплексно-спряжена величина. Бачимо, що при відсутності шуму фільтрація Вінера зводиться до псевдоінверсної. Недоліком даного методу відновлення є в основному боротьба лише з шумом без усунення розмиття. До подібних результатів веде і використання методу найменших квадратів.

Метод регуляризації Тихонова-Міллера. Широко відомим шляхом боротьби з впливом високочастотних шумових складових, які зменшують стійкість шуканого розв'язку, є застосування методу регуляризації Тихонова-Міллера, який полягає в мінімізації на множині розв'язків, які відповідають оригіналу зображення, стабілізуючого функціоналу у вигляді

$$\Omega(f) = Cf,$$

де f — оригінал зображення; C — матричний оператор, який називають регуляризуючим.

Характеристика відновлюючого фільтра тоді має вигляд:

$$H_p = H^* / [HH^* + \alpha CC^*],$$

де α — параметр регуляризації.

Однак даний метод вносить деяку невизначеність, бо не існує чіткого критерію вибору стабілізуючого функціоналу, у зв'язку з чим множина розв'язків залишається надто широкою.

Виходячи з наведених вище міркувань, в даній роботі зроблена спроба підвищення роздільної здатності складноструктурованих зображень з використанням ітераційного підходу [2].

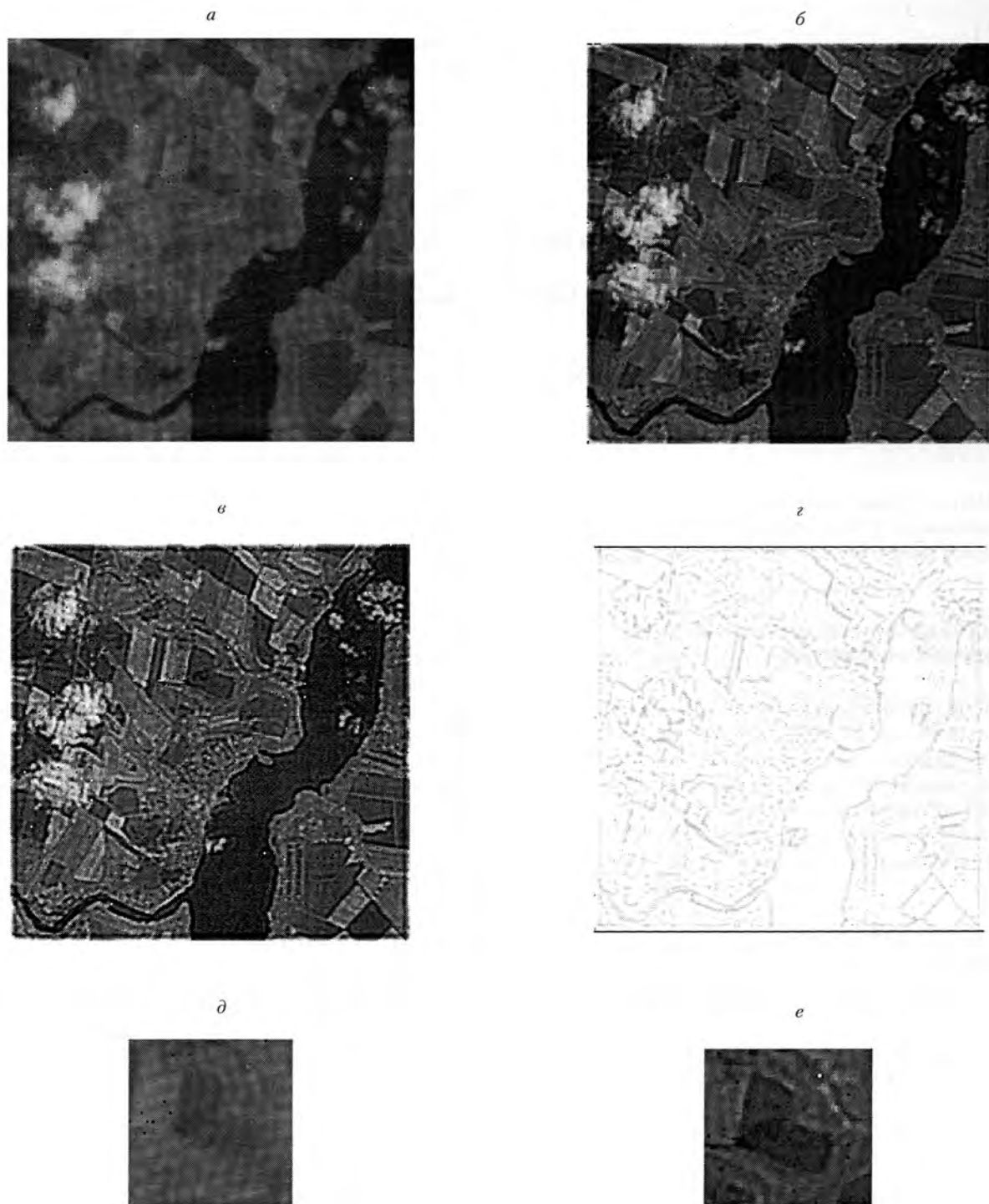


Рис. 2. Результати обробки зображення «річка» алгоритмом Бургера–Ван-Циттерта: *a* – вхідне зображення; *b* – результуюче зображення (3 ітерації); *c* – результуюче зображення (7 ітерацій); *d* – різницеве зображення (*b* та *a*) в інверсних кольорах; *e* – розмита область на вихідному зображенні; *e* – результат обробки розмитої області

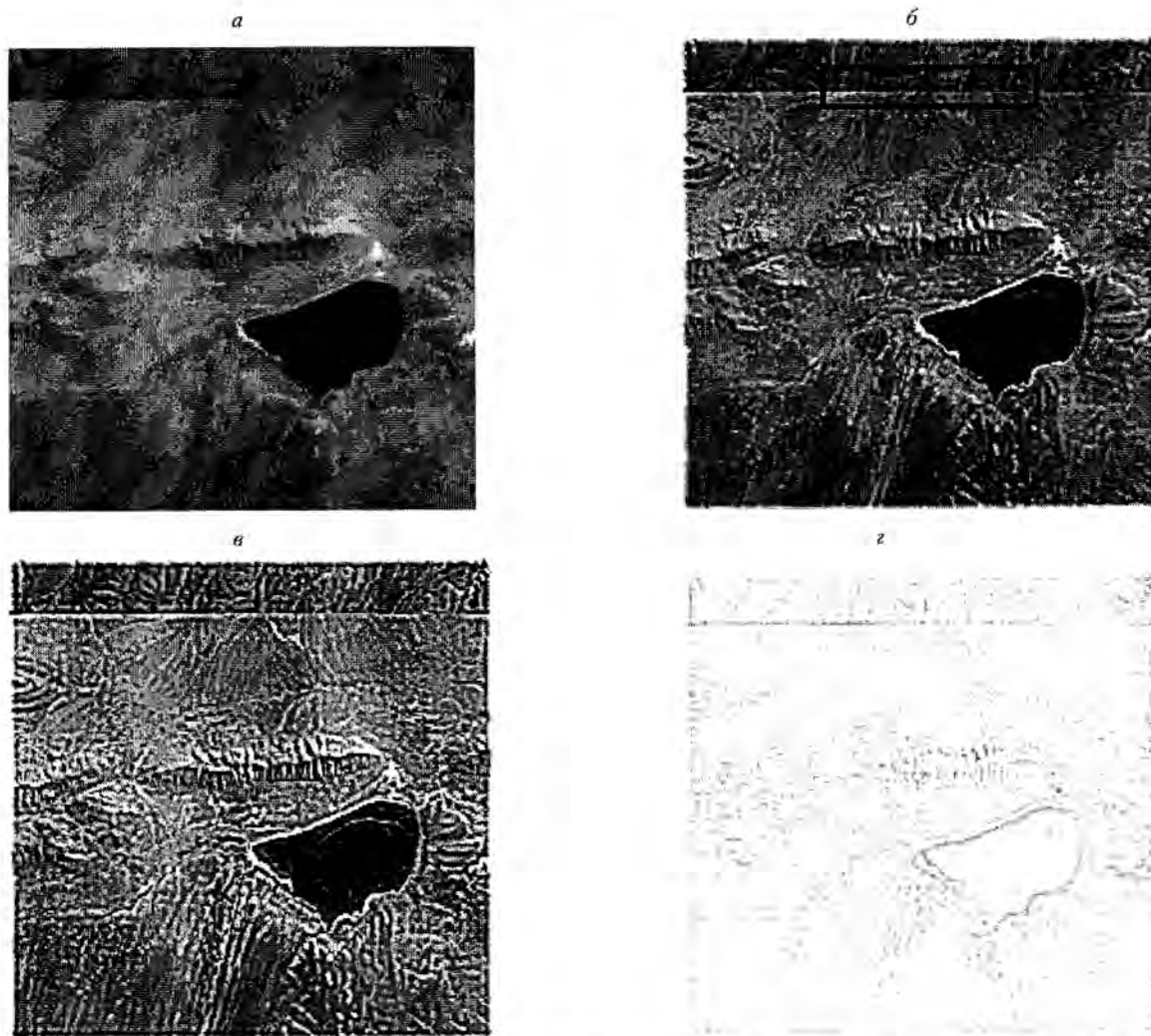


Рис. 3. Результати обробки зображення «поверхня» алгоритмом Бургера–Ван-Циттерта: *a* – вхідне зображення; *б* – результуюче зображення (3 ітерації); *в* – результуюче зображення (7 ітерацій); *г* – різницеве зображення (*б* та *a*) в інверсних кольорах

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Як відомо, розмиття проявляє себе у вигляді низькочастотної фільтрації зображення, що суттєво спотворює його високочастотні складові. Тому існує можливість підвищення інформативності зображення шляхом усунення наслідків впливу турбулентності атмосфери. Механізм розмиття зображення, яке описується функцією $f(x, y)$, можна визначити згорткою:

$$g(x, y) = \mathbf{H}(x, y) \circ f(x, y),$$

де $g(x, y)$ – результуюче розмите зображення; $\mathbf{H}(x, y)$ – імпульсна передаточна характеристика спотворюючої оптичної системи або ФРТ (в цифровій формі \mathbf{H} – матриця $n \times n$ пікселів, а $n = 2R + 1$, де R – радіус ФРТ).

МЕТОД РОЗВ'ЯЗКУ

Серед багатьох методів відновлення розмитих зображень найбільш перспективними вважаються ітераційні, які будуються на основі процедури, що носить назву Бургера–Ван-Циттерта [3]:

$$f_{k+1} = g + \beta f_k (\mathbf{I} - \mathbf{H}),$$

де β – параметр обробки, який визначає швидкість збіжності алгоритму; \mathbf{I} – одиничний оператор; k – номер кроку ітерації.

Будь-який ітераційний алгоритм потребує відповіді на два важливих питання: чи збіжний він, і якщо так, то до якого граничного розв'язку. Шляхом прямих обчислень одержуємо [2]:

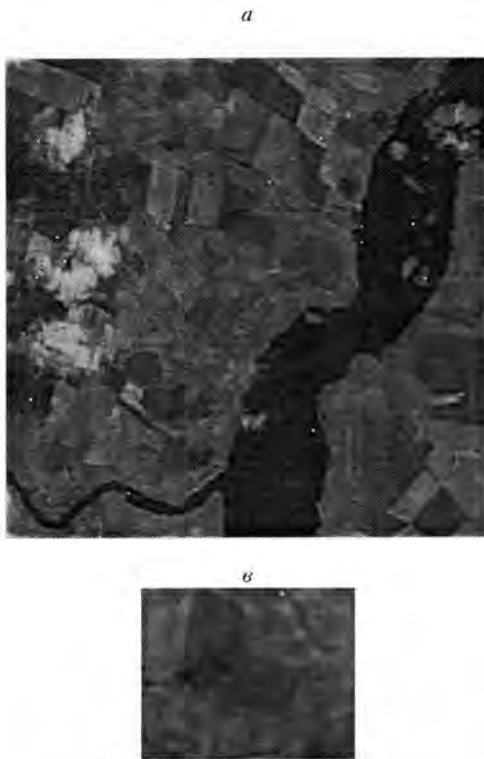


Рис. 4. Результати обробки зображень «поверхня», «річка» та розмитої області (рис. 1, б) алгоритмом Бургера–Ван-Циттерта при зменшеному коефіцієнті обробки ($\beta = 0.55$) після 75 ітерацій

$$f_k = \sum_{r=0}^k \mathbf{G}^r g, \quad (2)$$

де $\mathbf{G} = \beta(\mathbf{I} - \mathbf{H})$.

Якщо матриці $(\mathbf{I} - \mathbf{G})$ та \mathbf{H} мають до себе обернені, то вираз (2) можна записати у вигляді

$$f_k = (\mathbf{I} - \mathbf{G})^{-1}(\mathbf{I} - \mathbf{G}^{k+1})g.$$

При існуванні границі

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{G}^{k+1} g = 0,$$

що є достатньою умовою збіжності алгоритму Бургера–Ван-Циттерта, розв'язок (1) має вигляд

$$f_\infty = \lim_{k \rightarrow \infty} f_k = (\mathbf{I} - \mathbf{G})^{-1} g = \mathbf{H}^{-1} g. \quad (3)$$

Цей розв'язок являє собою інверсний фільтр.

Однак його ітераційна реалізація є кращою від прямої (3), бо з'являється можливість керування підсиленням шумів і відпадає необхідність знаходження зворотного оператора.

Слід також відзначити наступну особливість реалізації оператора розмиття $\mathbf{H}(x, y)$. Із міркувань виконання закону збереження енергії приймається:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mathbf{H}_{ij} = 1. \quad (4)$$

На основі перерахованих вище міркувань з урахуванням особливості виразу (4) запропоновано алгоритм [4]. Він був застосований до реальних зображень земної поверхні, отриманих на борту

ШСЗ «Ресурс» з роздільною здатністю 20 м/піксель), умовно названих «поверхня» та «річка». Результати обробки зображень ілюструються рис. 2 і 3.

Отримані в ході обробки результати показали, що їх достовірність суттєво залежить від кількості ітерацій та величини кроку ітерації.

На рис. 2, б, в наведені результати обробки зображення «річка» після відповідно трьох та семи кроків виконання алгоритму і при значенні коефіцієнта обробки $\beta = 1$.

Стає очевидним той факт, що навіть таке невелике збільшення числа ітерацій призводить до появи на зображенні хибної інформації (артефактів). Це викликано локальними різкими перепадами яскравості (типу одиничного стрибка) на вхідному зображенні (рис. 2, а), що проявляється на результуючому у вигляді хибних осциляцій яскравості, незважаючи навіть на те, що для послаблення цього ефекту приймається умова додатності значень яскравості, тобто $f_{k+1} \geq 0$ [6].

Використання в процесі роботи алгоритму значення коефіцієнта $\beta < 1$ (в нашому випадку $\beta = 0.55$) дозволяє досягнути зменшення впливу вказаного вище недоліку (рис. 4, а). Однак зменшення величини кроку відновлення викликає погіршення результатів з точки зору ідентифікації деталей об'єктів на зображенні (рис. 4, в).

Аналогічні результати одержано також для зображення «поверхня», що представлено на рис. 3 і 4, б. Хибні яскравіші осциляції показані виділенням на рис. 2, б.

ВИСНОВКИ

1. В результаті застосування алгоритму Бурге-ра–Ван-Циттерта є очевидним підвищення чіткості вхідних зображень та їх окремих деталей, що викликано розширенням їх динамічного діапазону.

2. Суцільна розмита область на рис. 2, д була зведена до чіткого контура, який легко піддається ідентифікації (рис. 2, е).

3. Наявність різких локальних перепадів яркості ускладнює питання ідентифікації деталей появою артефактів на зображенні, що викликає необхідність знаходження компромісного рішення про кількість ітерацій обробки і величини їх кроку.

1. Бейтс Р., Мак-Доуелл М. Восстановление и реконструкция изображений. — М.: Мир, 1989. — 336 с.
2. Бьемон Ж., Лагендейк Л., Мерсеро Р. М. Итерационные методы улучшения изображений // ТИИЭР. — 1990. — 78, № 5. — С. 58–84.

3. Василенко Г. И., Тараторин А. М. Восстановление изображений. — М.: Радио и связь, 1986. — 304 с.
4. Коваль О. І., Косареви́ч Р. Я., Русин Б. П., Кобевко Д. Г. Підвищення роздільної здатності космоаерофотографічних зображень // Сучасні технології в аерокосмічному комплексі: Третя міжнар. науково-практична конф. — Житомир, 1997. — С. 26–28.
5. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1979. — 288 с.
6. Шафер Р. У., Мерсеро Р. М., Ричарде М. А. Итерационные алгоритмы восстановления сигналов при наличии ограничений // ТИИЭР. — 1981. — 69, № 4. — С. 34–55.
7. Andrews H. C., Hunt B. R. Digital Image Restoration. — Englewood Cliffs. — New York: Prentice-Hall, 1977.

ONE MORE APPROACH TO THE IMPROVEMENT OF RESOLUTION OF COMPLEX-STRUCTURED IMAGES

O. I. Koval, R. Ya. Kosarevych, and B. P. Rusyn

The iterative method of restoration of complex-structured images was applied to actual space images of the Earth surface with the aim to improve their resolution. The effect of the parameter β on the processing result was studied. We demonstrate that a compromise should be made between the choice of the parameter β and the number of processing steps.