

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ РОЗРІЗНЮВАЛЬНОСТІ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ

В.Г. Бурачек¹, В.І. Зацерковний², Є.К. Углицьких¹

¹ Університет новітніх технологій, вул. Машинобудівників, 28, м. Київ, 03067, Україна

² ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка, вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна, e-mail: vbur2008@ukr.net, vitalii.zatserkovnyi@gmail.com, uglitskih_evgeniy_1993@mail.ru

Розглянуто проблеми цифрового аерознімання, шляхи підвищення якості виконання знімальних робіт. Розроблено нові способи знімання, які дають змогу за використання субпіксельної технології отримувати знімки вищого просторового розрізнення. Проаналізовано існуючі методи підвищення просторового розрізнення космознімків і аерокосмічних знімальних систем. Виділено найперспективніші методи застосування цифрового аерокосмічного знімання для розв'язання геологічних завдань.

Ключові слова: аерокосмічне знімання, дистанційне зондування Землі, субпіксельна технологія.

Актуальність теми дослідження. Прикладні завдання підвищення якості зображень складають пріоритетний напрям розвитку авіакосмічних засобів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) і планет, а також бойових авіакосмічних комплексів розвідки військових підрозділів і частин. Це пов'язано з безперервним ускладненням завдань селекції і оцінювання параметрів наземних об'єктів з незначними яскравісними (температурними, в тому числі динамічними, інерційними), а також спектральними (колірними) відмінностями в умовах зниженої освітленості, впливу атмосферних чинників, заходів інженерно-технічної протидії тощо.

Обробку зображень використовують у фізиці, астрономії, метеорології, кліматології, геології, картографії, географії, геоінформаційних системах, кадастрах і землевпорядкуванні, біології, клінічній медицині, криміналістиці, дефектоскопії, неруйнівному моніторингу стану повітряних, наземних і підводних об'єктів, у разі відстеження переміщень караванів з вантажами, туристів на маршруті тощо. Не менш важливою є її роль для сфер оборонної промисловості, локації, зв'язку і навігації, робототехніки, у розв'язанні багатодисциплінарних проблем штучного інтелекту (машинного зору).

У завданнях геологічної галузі проблема обробки та інтерпретації зображень об'єктів за допомогою матеріалів ДЗЗ є надзвичайно актуальною. Слід зазначити, що часто отримують знімки недостатньої якості або на них важко ідентифікувати малі об'єкти, такі як невеликі родовища, кар'єри, синклінали й антиклінали, зсуви і техногенні явища.

Підвищення просторового розрізнення водночас із збереженням ширини поля огляду знімальної апаратури вимагає збільшення кількості фотоприймальних елементів (фотодетекторів) у матричному фотоприймачі. Проте кількість фотодетекторів у сучасних матрицях, які використовують у спектро-радіометрах, стримується існуючим технологічним

рівнем напівпровідникового виробництва [2]. Це призводить до суттєвих обмежень забезпечуваної детальності одержуваних зображень і, відповідно, до зменшення припустимих граничних дальностей знімання.

Проблему можна розв'язати за допомогою методів поліпшення просторового розрізнення космознімків, використовуючи субпіксельну технологію. Для усунення недоліків існуючих систем запропоновано різні способи одержання зображень субпіксельного розрізнення.

Методи підвищення просторового розрізнення поділяють на технічні (поліпшення знімання літальної камери) і комп'ютерні (подальша обробка цифрових зображень за допомогою програмного забезпечення). Серед технічних методів у статті наведено: спосіб аерокосмічного знімання лінійних об'єктів; сканерний спосіб цифрового аерофото-знімання з літака системою ADS 40; спосіб кутового зміщення оптичної осі знімальної камери під час знімання; метод з використанням напівпровідникових лазерів; метод зсуву зображень місцевості; метод субпіксельної реєстрації. Серед комп'ютерних методів у статті згадано: спосіб геометричного зіставлення; спосіб злиття двох знімків в один; спосіб підвищення розрізнення за рахунок усунення шуму; спосіб підвищення розрізнення за допомогою кокрігінгу, функцію Pansharpening в ENVI і спосіб з модифікацією контрастності зображення. Серед науковців, які працювали над цими методами, слід виділити В.Г. Бурачека, В.Ю. Беленка, В.І. Зацерковного, С.А. Станкевича, М.О. Попова. Незважаючи на те що питанням підвищення якості зображення (підвищення розрізнення) останнім часом приділяють багато уваги, однозначного критерію оцінювання якості зображення і методики його визначення, на жаль, поки ще не створено.

Розв'язання проблеми підвищення просторового розрізнення може бути використано для потреб

геологічної галузі: визначення типу гірської породи; картографування основних геологічних структур; оновлення геологічних карт; картографування вулканічних інтрузій; картографування форм рельєфу; отримання додаткової інформації про закономірності розміщення корисних копалин; моніторинг небезпечних природних явищ; геоморфологічний аналіз тощо.

Мета цієї статті — аналіз існуючих методів підвищення просторового розрізнення космознімків, а також виділення з них найбільш універсальних для геологічної галузі на цей момент.

Об'єкт дослідження — методи, які використовують для вирішення геологічних завдань за допомогою ДЗЗ, аерокосмічні знімки.

Предмет дослідження — просторове розрізнення знімків, субпіксельна технологія.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існують два способи отримання цифрових знімків: сканування фотознімка та отримання електронного зображення безпосередньо під час знімання об'єкта за допомогою цифрової знімальної камери (системи). Результати реєстрації електромагнітного випромінювання, що представлені у вигляді зображення об'єктів місцевості в аналоговій або цифровій формі запису, як відомо, називають відеоінформацією, а процедуру перетворення результатів аналогового або цифрового запису сигналів у видиме зображення — візуалізацією. Отже, першим результатом ДЗЗ є електронний знімок місцевості. Основна характеристика знімка — якість зображення місцевості, яка характеризується функцією передачі модуляції. Важливою її складовою є розрізняювальність знімка, при цьому виділяють лінійне і спектральне розрізнення.

Оптико-електронна цифрова камера містить об'єктив і фотоприймальну матрицю. Ця фотоелектрична частина камери відповідає за прийом світлових сигналів і формування зображення місцевості на мішені матриці з перетворенням його деталей в електронний код. Електронні блоки цифрової камери формують цифровий план місцевості та цифровий знімок. При цьому якість зображення повністю залежить від характеристик блока “об'єктив—фотоприймальна матриця” (ОФОМ). Основні характеристики знімальної камери, що залежать від блока ОФОМ: розрізняювальність, поле зору, розмір поля фотоприймальної матриці, розмір пікселя матриці, фокусна відстань.

Питанню підвищення розрізняювальності останнім часом приділяють багато уваги, проте критерій її визначення однозначно не з'ясований. Розрізнення оптичних систем характеризує їхню здатність створювати роздільні зображення двох близько розташованих точок об'єкта. Розрізнення оцінюють за найменшою відстанню між двома точками, за якої їхні зображення можна роздільно побачити і вони не зливаються в одну точку. Цю відстань виража-

ють у лінійних (мм) або кутових (кутових секундах) величинах і називають відповідно лінійною або кутовою межею розрізнення.

За кількісну міру розрізнення, як правило, приймають величину, обернену межі розрізнення. Відомо, що межа розрізнення зумовлена дифракцією світла на краях оптичних деталей. Відповідно до критерію Релея, сформованого у 1879 р., зображення двох точок однакової яскравості можна бачити роздільно, якщо центр дифракційної плями однієї з них збігається з краєм іншої. Величина лінійної релеївської межі розрізнення [15] дорівнює:

$$\delta = 1,21 \lambda f / D,$$

де f — фокусна відстань оптичної системи; λ — довжина світлової хвилі; D — діаметр вхідної зірничі системи.

Величина кутової релеївської межі розрізнення: $\psi = 1,22 \lambda / D$. Наприклад, для $\lambda = 0,560$ мкм (зелене світло) кутова межа розрізнення становить $140/D$ (тут D — в міліметрах). Стосовно фотографічних оптичних систем (об'єктивів) виділяють візуальне розрізнення $N_{\text{віз}}$ та фотографічне — $N_{\text{ф}}$.

Візуальним називають розрізнення, визначене візуально за оптичним зображенням міри, яку створює об'єктив. На величину $N_{\text{віз}}$ головним чином впливають: дифракція на круглих отворах оправ лінз тощо компонентів об'єктива, залишкові аберації, похибки об'єктива, розсіювання світла в об'єктиві, яскравіший контраст міри. Фотографічне розрізнення $N_{\text{ф}}$ визначають за фотографічним зображенням міри. На цю величину, крім наведених вище факторів, впливає розрізняювальність R фотоматеріалу, ефекти проявлення тощо, а тому завжди $N_{\text{ф}} < N_{\text{віз}}$. При цьому

$$\frac{1}{N_{\text{ф}}} \approx \frac{1}{N_{\text{віз}}} + \frac{1}{R}.$$

На якість знімка також впливають зовнішній світловий фон, прозорість атмосфери. Розрізняювальність блока ОФОМ тісно пов'язана з іншими вищезгаданими характеристиками.

Теоретично можливе розрізнення об'єктива $R_{\text{ог}}$ обчислюють для довжини хвилі $\lambda = 0,555$ мкм за формулою [8]

$$R_{\text{ог}} = 1473D / f \approx 1480 / n,$$

де n — відносний отвір об'єктива. Коефіцієнт 1480 застосовують за умови, що елементи зображення, які можна розрізнити, відрізняються за яскравістю на 25 %. При використанні для обробки зображень оптичних пристроїв цей коефіцієнт може сягати 1800. Отже, теоретично можливе розрізнення об'єктива при $D = 4\text{--}4,5$ мм становить 300–400 ліній на 1 мм. Кращі сучасні аерофотокамери мають розрізнення 100–150 ліній на 1 мм.

У спеціальній літературі широко обговорюють частотно-контрастну характеристику (ЧКХ) об'єктива, яка дає змогу встановити залежність

між частотою штрихів тесту (міри) і контрастом їх зображення, а на цій основі — і розрізнення об'єктива. Проте загальноприйнятої методики застосування ЧКХ поки що не існує.

Спектральним розрізненням знімальної системи називають мінімальну ширину спектральної зони, у якій виконують знімання. Ширину спектральної смуги визначають можливістю сенсора сприймати інтегральний сигнал (рівень випромінювання), який створюється у цій зоні. Для фотографічних систем вона приблизно дорівнює 0,040–0,050 мкм, а для нефотграфічних — 0,01–0,02 мкм і менше. Для підвищення спектрального розрізнення використовують гіперспектрометри, що забезпечують можливість отримання зображень з кількістю спектральних діапазонів від 10 до 1000. Прикладом гіперспектральних систем є літакові системи AVIRIS, HYDIS і супутникові системи Lewis, NEMO, LATI (США).

Слід зазначити, що під час побудови знімальної камери доводиться шукати компромісне рішення:

- високе розрізнення ν' або $1/N$, де N — кількість ліній на міліметр, що можна розрізнити;
- максимальне поле зору цифрової камери;
- максимальний розмір M матриці;
- мінімальний розмір пікселя p матриці;
- мінімальна фокусна відстань f' об'єктива.

Розрізнення блока ОФОМ можна виразити функцією від перелічених елементів:

$$(1/N_{\text{ОФОМ}}) = \varphi(\omega, p, \nu'', f').$$

Максимізації наведеної функції φ , тобто підвищенню розрізнення блока ОФОМ, можна досягнути за рахунок збільшення кута поля зору, зменшення лінійного розміру пікселя і фокусної відстані об'єктива:

$$(1/N_{\text{ОФОМ}}) \rightarrow \max \text{ при } \omega \rightarrow \max; \\ p \rightarrow \min, \nu'' \rightarrow \min, f' \rightarrow \min.$$

При цьому $\text{tg } \omega = M/2f'$.

Використання пристроїв із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) як фотоприймачів — ПЗЗ-лінійок та ПЗЗ-матриць — значно розширює клас знімальних систем, на виході яких отримують цифрове (а отже, й електронне) зображення. Відмінною рисою цих систем є те, що вони не потребують додаткових перетворень знімка в цифрову форму.

Розрізнявальність електронних знімків пов'язана з лінійним розрізненням цифрових знімальних систем, яке, у свою чергу, залежить від розміру елементів, що складають ПЗЗ-приймач (лінійку або матрицю), — пікселів. Їхня кількість у сучасних цифрових знімальних системах сягає 80 млн елементів і більше, що забезпечує розрізнення, близьке до фотографічного. Використання ПЗЗ-матриць як сенсорів під час створення знімка формату 18×18 або 23×23 см обмежене можливістю виготовлення матриць великих розмірів. За-

звичай сенсор цифрових кадрових аерофотокамер складається із 4, 9 чи більше ПЗЗ-матриць, кожна з яких фіксує зображення частини загального знімка, тобто зображення, сформоване кожною з ПЗЗ-матриць, перекривається із сусіднім. За допомогою програмних засобів, з використанням спільних частин зображення, формують цифровий знімок. Розмір пікселя у цифровій камері 3-DAS-1, виготовленій вінницьким НПП “Геосистема”, дорівнює 9 мкм, а у відомій цифровій аерознімальній системі ADS 40 фірми LH Systems розмір пікселя ПЗЗ-лінійки цифрової камери становить 6,5 мкм.

Зазначимо, що “права межа” знімання кремнієвими фотоприймачами (фотодіодами та ПЗЗ) сягає 1,1 мкм. Задачу підвищення розрізнявальності знімків можна розв'язати [1], створивши спосіб дистанційного знімання і дешифрування аерокосмічних знімків, який відрізняється тим, що під час знімання виконують кутове зміщення оптичної осі знімального приладу за напрямком рядків і стовпців фотоприймача матриці на n позицій з інтервалом $P\rho/fn$, де P — лінійний розмір сторони квадрата пікселя матриці; f — фокусна відстань об'єктива цифрової камери; $\rho = 206265''$ — один радіан, виражений у кутових секундах.

За дешифрування визначають рівень електричних сигналів від засвічування прямокутних ділянок $P \cdot P/n$ пікселів, де P/n — коротка сторона прямокутної ділянки відповідно за напрямками рядків і стовпців.

Базуючись на групі пікселів з однаковим рівнем сигналів від їх засвічування, переважно мінімального рівня, за даними сигналами від прямокутних ділянок визначають рівень електричного сигналу для кожної ділянки пікселя площиною P^2/n^2 , що відповідає його засвічуванню, і в такий спосіб поділяють кожен піксел ПЗЗ-матриці на n^2 субпікселів.

Технічним результатом є підвищення розрізнявальності аерокосмічних знімків за площею в n^2 разів за заміни пікселів субпікселями. Отже, за збереження величини поля зору цифрової камери отримують підвищення розрізнення або за збереження розрізнення отримують збільшення поля зору.

Робота пристрою за розробленим способом (рис. 1) реалізується таким чином: світлові промені від об'єкта знімання надходять до блока об'єктива і фокусуються останнім на мішені фотоприймальної матриці (ФПМ).

Блок ФПМ перетворює інформацію на електричні сигнали і через блок обробки інформації спрямовує їх до блока управління. Блок управління включає програмний блок, сигнали від якого перетворюються на керуючі команди і спрямовуються через блок комутації до блока п'єзопластин, де за заданою програмою послідовно із заданим блоком обробки інформації з інтервалом часу у визначеному порядку подається напруга на пластини $u_1, u_2, \dots, u_n$. У результаті створюється дискретний зсув

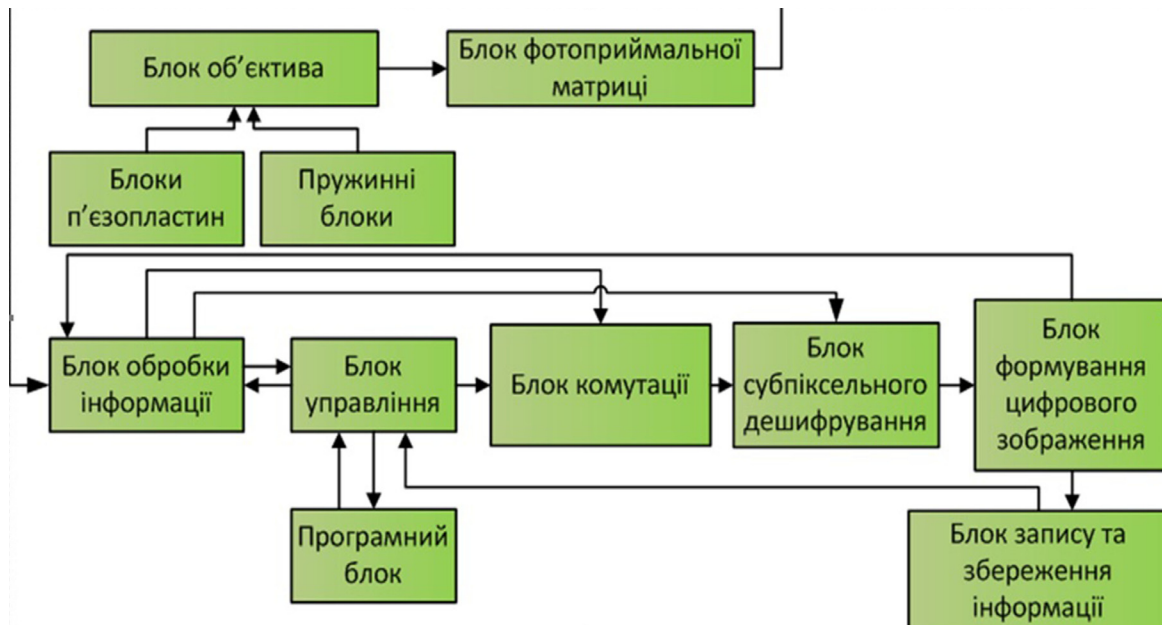


Рис. 1. Блок-схема засобу для дистанційного знімання
Fig. 1. Flowchart of device for remote sensing

оптичної осі пристрою у напрямку однієї з осей матриці (рис. 2). Аналогічно здійснюється зсув оптичної осі пристрою у напрямку до іншої осі матриці перпендикулярно до першої.

Пружинні блоки забезпечують демпфування деформації пластин. Цикли зсуву оптичної осі на n позицій виконують послідовно у напрямку взаємно перпендикулярних осей ФПМ. За кожного зсуву виконують експозицію, знімаючи об'єкт (через блоки об'єктива ФПМ, обробки інформації, управління та комутації).

Після виконання підключення n пластин електричну напругу знімають і оптична вісь пристрою встановлюється у первісне положення.

Під час знімання повторюють цикл за циклом, виконуючи $2n$ експозицій (пакет) для кожної ділянки місцевості із субпіксельним перекриттям між пакетами кадрів об'єкта знімання.

Прийнята від об'єкта інформація попередньо обробляється в блоці. У блок обробки інформації з блока фотоприймальної матриці надходять електричні сигнали від засвічення пікселів ПЗС-матриці — від кожного пікселя, в блоці обробки інформації виконуються ранжування і кодування цих сигналів. Цю оброблену інформацію спрямовують у блок субпіксельного дешифрування. У цьому блоці аналізують, відповідно, сигнали за кожним рядком і кожним стовпчиком для n зрушень оптичної осі приладу.

Розглянемо порядок визначення рівня засвічення пікселів у рядку в блоці субпіксельного дешифрування. При n зрушеннях отримують $n + 1$ субпікселів прямокутної форми. Нехай $n = 1$. На рис. 3, а зображено фрагмент рядка, що складається з 8 пікселів (№ 1...8). Контролер блока 10 вирішує

завдання: знайти групу рівносигнальних пікселів у рядку і вибирає групи суміжних рівносигнальних пікселів (не менше двох або трьох).

Виконується порівняння значень електричних сигналів від засвічення пікселів в рядку (на рис. 3 з інтервалом, що дорівнює 25 %, штрихуванням показано однакові сигнали). Після зсуву оптичної осі приладу відбувається зрушення зображення на ПЗС-матриці на величину $P/(n+1)$, де P — лінійний розмір квадратного пікселя. Звернімо увагу, що на рис. 3, а рівносигнальну межу утворюють сигнали в квадратах 3—5, на рис. 3, б — у квадратах 3', 4', на рис. 3, в — у прямокутниках 33', 43', 44', 54'. Слід зазначити, що в рівносигнальній групі 33', 43', 44', 54' отримані значення і еквівалентність рівнів сигналів є точнішими і достовірнішими порівняно з іншими "полупікселями" (рядки). При цьому чим більше пікселів у рівносигнальних межах (у рядку, стовпці) і більше таких меж, тим точніше результати визначення рівнів сигналів від всіх "полупікселів".

Спосіб аерокосмічного знімання лінійних об'єктів [7] забезпечує підвищення точності дешифрування лінійних об'єктів і дає змогу отримати високу точність для інтерпретації їх розмірів.

Матрицю оптико-електричного знімального приладу повертають навколо оптичної осі, при цьому вимірюють величину кута повороту. При формуванні цифрового плану за величиною електричних сигналів від засвічених пікселів уздовж меж лінійного об'єкта інтерпретують точні межі і ширину об'єкта, а також враховують кут повороту для переходу в систему координат носія. Основні недоліки методу: невеликі території зображення; вихідний супутник має бути з добрим просторовим розрізненням.

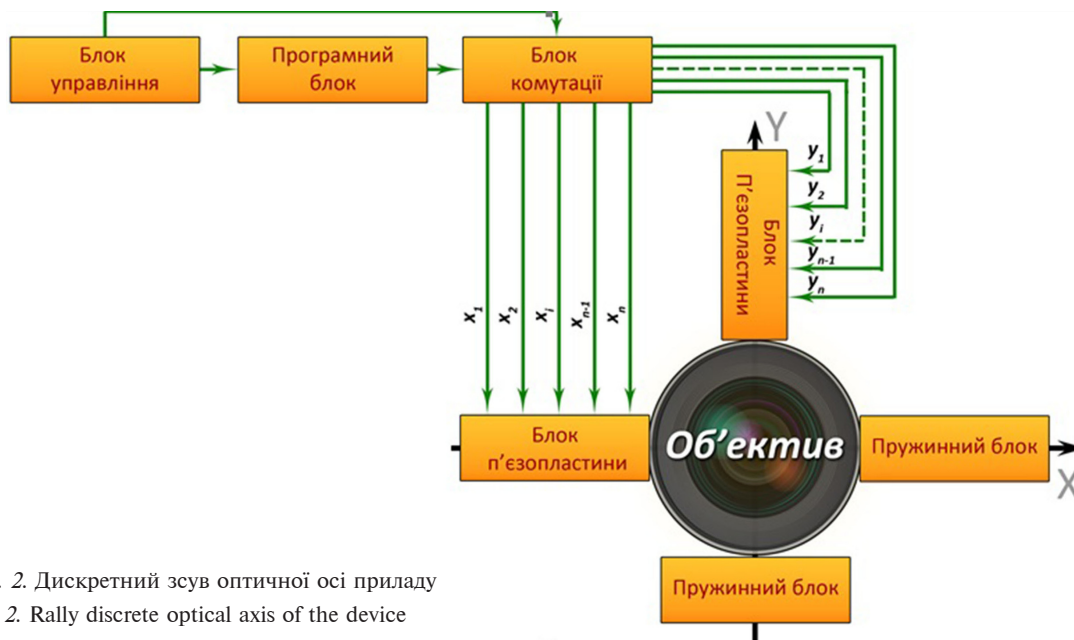


Рис. 2. Дискретний зсув оптичної осі приладу
Fig. 2. Rally discrete optical axis of the device

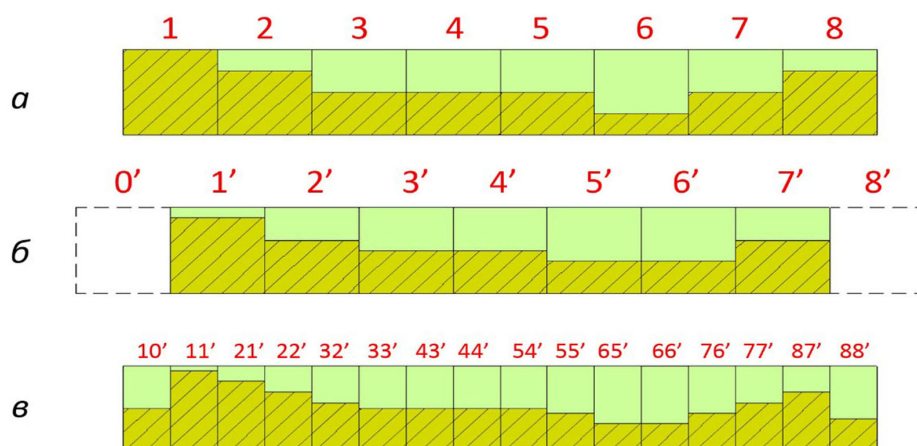


Рис. 3. Отримання субпікселів:
а – вихідні рівносигнальні піксели;
б – “вторинні” рівносигнальні піксели;
в – прямокутні субпіксели
Fig. 3. Receipt of sub-pixels:
а – output equal pixels;
б – “secondary” equal pixels;
в – rectangular sub-pixels

Сканерний спосіб цифрового аерофотознімання з літака системою ADS 40 (Airborne Digital Sensor) [3] забезпечує кольорові знімки, а також спектрональні зображення для поліпшення просторового розрізнення.

Камера літака складається з трьох панхроматичних лінійок, які спрямовано “вперед” (28° до надіра), “назад” (42° до надіра) і “у надір”. У цій системі використовують прибори із зарядовим зв’язком у вигляді лінійки пікселів, а для формування зображення використовують принцип дії електрооптичного сканера.

Спосіб геометричного зіставлення [4] дає змогу створити в синтезованому зображенні геометричну структуру, яка забезпечує в 2 рази більше просторове розрізнення, ніж це запропоновано початковим кроком дискретизації.

В чотириканальній системі у приладі спостереження сітки зрушені по горизонталі і вертикалі одна відносно одної на 0,5 піксела. А за синтезу на приймальній стороні кольорового зображення використовують сітку з кроком, у 2 рази меншим,

ніж це потрібно для отримання зображення в одноосібному спектральному каналі.

У праці [9] описано спосіб і пристрій для реєстрації зображень, у якому забезпечується субпіксельна реєстрація країв зображення шляхом урахування відхилень розподілу яскравості від унімодального. Однак недоліком цього способу є відсутність можливості побудови і розподілу рівня яскравості за рядком або стовпцем.

Спосіб підвищення просторового розрізнення за допомогою прибирання шуму [14] дає змогу отримати краще зображення, ніж вихідне. Спостерігається підвищення контрастності зображення, дані швидко оброблюються. Основними недоліками є можлива велика коштовність отримання знімків або програмного забезпечення (рис. 4).

Шум на зображенні прибирають за допомогою лінійної фільтрації. Можливе також використання фільтрації усереднення для видалення шумів. Застосовують медіанну фільтрацію, кожен вихідний піксел встановлюється у середнє зі значень пікселів в околі відповідного вхідного піксела.

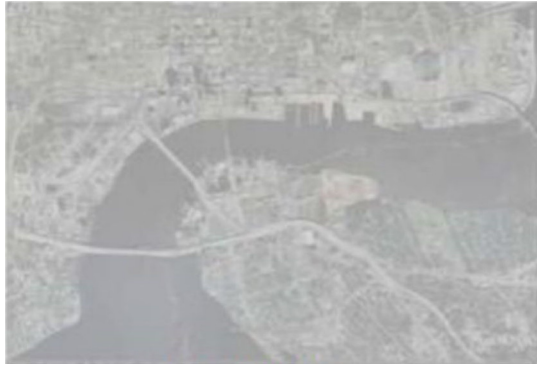


Рис. 4. Спосіб підвищення просторового розрізнення за допомогою прибирання шуму. Початкове і кінцеве зображення, першоджерело: https://www.ijirset.com/upload/2014/july/31_Improving.pdf

Fig. 4. Images way of increasing spatial resolution using cleaning noise. The initial and final image

Існує метод [12] підвищення розрізнення за допомогою кокригінгу, він забезпечує підвищення просторового розрізнення в 2 рази, технологія відносно легка для освоєння. Недоліки — можливість використання методу лише з тепловими каналами знімка і тепловими картами на основі ДЗЗ. В основу способу покладено злиття зображень за допомогою кокригінгу. Застосовують лінійну комбінацію емпіричних зображень, які відправлені космічним сенсором.

Спосіб на основі власних характеристик датчика [11] дає суттєве поліпшення просторового розрізнення за рахунок просторового зсуву пікселів. Можна застосовувати для невеликих територій зображень, однозначною є велика коштовність проведення робіт. Технологія використовує внутрішні просторові спотворення датчика супутника, який передає зображення і застосовує їх як додаткову інформацію для збільшення просторового розрізнення гіперспектральних зображень, а також трапецієподібний просторовий зсув пікселів.

Метод підвищення розрізнення за допомогою функції Pansharpenning у програмному забезпеченні ENVI [13] дає змогу суттєво підвищити якість супутникових знімків Landsat 8, має відносно вільний доступ, можливий у використанні проектів з великими територіями. Паншарпенінг (від англ. “panchromatic sharpening” або “pan sharpening”) — процес, що дає змогу отримати з панхроматичного і мультиспектрального каналів одне зображення. Панхроматичний канал, як правило, має вищу просторову роздільну здатність, мультиспектральний — більш низьку. В результаті злиття каналів виходить кольорове зображення з високою роздільною здатністю (рис. 5). Під час роботи з результатами паншарпенінгу слід враховувати, що процедура істотно змінює властивості зображення з точки зору спектральних характеристик знімка, що, у свою чергу, відчутно вплине на результати класифікації. Зазвичай алгоритм використовують для поліпшення якості візуального

дешифрування, точнішого створення навчальних вибірок для класифікацій, а також для ілюстрування різних матеріалів.

Спосіб з модифікацією контрастності зображення [6] підвищує розрізнення для невдалих знімків з вадами (наприклад, забагато сонця чи хмар). Має вузький профіль дослідження, можлива неспроможність з'єднати дослідження нормальних знімків з поганими при їх злитті. В технології поліпшення контрасту досягають за допомогою збільшення динамічного діапазону яскравостей на оброблюваному зображенні. Використовують гістограму для знаходження та інтерпретації пікселів.

У патенті [5] описано варіант організації зсувів зображення місцевості на мішені фотоприймально-го апарата. Під час руху літального апарата вздовж осі X розгортку вздовж осі Y виконують оптичною системою сканування.

При цьому в полі зору для кожного блока кадрів виконують n експозицій, де одна експозиція відповідає кадру блока; щільність точок експозицій задають через блок управління залежно від необхідного поперечного та поздовжнього перекриттів.

Кожній з n експозицій у блоці кадрів відповідає певне положення дзеркальної призми, безперервне обертання якої забезпечує розширення кута поля зору системи (цьому відповідають саме n кадрів блока, розміщених уздовж осі Y). При повороті дзеркальної призми на кут α крайній лівий і правий світлові промені, які обмежують пучок, що йде від земної поверхні та формує зображення, відхиляються на кут 2α , розширюючи таким чином поле зору.

Як приклад на рис. 6 зображено дві групи знімків, позначених символами ① і ②, кожна з них містить три блоки кадрів: 1.1, 1.2, 1.3 — у першій групі; 2.1, 2.2, 2.3 — у другій, з кількістю експозицій n у кожному блоці кадрів, де L — ширина кадру на місцевості; D_x — величина поздовжнього перекриття на місцевості; D_y — величина поперечного перекриття



Рис. 5. Приклад результатів модуля Pansharpener у програмному забезпеченні ENVI. Зліва – початкове зображення, справа – після обробки, першоджерело: <http://www.harrisgeospatial.com/Home/NewsUpdates/TabId/170/ArtMID/735/ArticleID/14079/WorldView-3--ENVI-52-Will-Be-A-Powerful-Combination.aspx>

Fig. 5. Sample results of Pansharpener plug-in software ENVI. On the left side – the original image, right – after the processing

на місцевості; A_1, A_2, A_3 – центри блоків кадрів першої групи знімків; B_1, B_2, B_3 – центри блоків кадрів другої групи знімків; $\sim t_{90^\circ - (n-1)\alpha^\circ}$ – час між експозиціями A_3 та B_1 (у загальному випадку – між останньою експозицією останнього блока кадрів i -ї групи знімків та першою експозицією першого блока кадрів наступної $(i+1)$ -ї групи знімків), пропорційний лінійній відстані, яку проходить літальний засіб за цей час, тобто це час паузи, протягом якого призма здійснює оберт на $90^\circ - (n-1)\alpha^\circ$, у розрахунках цю величину позначають як t_{α° ; $\sim t_{\alpha^\circ}$ – час між послідовними експозиціями центрів суміжних блоків кадрів у групі, пропорційний лінійній відстані, яку проходить літальний засіб за цей час, тобто це час повороту призми на кут α° .

Літальний засіб рухається вздовж додатного напрямку осі X (рис. 6) і виконує, наприклад, $n = 3$ експозицій у кожному з трьох блоків кадрів двох груп знімків (у загальному випадку блоків і груп може бути багато). Експозиції у кожному блоці виконуються через інтервали часу, які відповідають повороту дзеркальної призми на кут α , що дає змогу зробити кадрову розгортку перпендикулярно до курсу літального апарата.

Рух літального засобу зумовлює зміщення блоків кадрів між групами (поздовжнє перекриття D_x на місцевості).

У статті [10] загальна методологія підвищення просторового розрізнення на підставі субпіксельної реєстрації передбачає послідовний перехід від піксельних сіток вхідних зображень низького розрізнення до створеної на їх основі субпіксельної сітки зображення підвищеного просторового роз-

різнення. Таким чином, у межах одного спільного поля огляду формується n зображень, геометрично зміщених одне щодо одного на $1/n$ частку піксела. Причому зміщення має відбуватися під визначеним заздалегідь кутом α , як уздовж рядка, так і вздовж стовпчика. Наступним кроком є використання алгоритму відновлення значення вихідного зображення у субпікселях.

Субпіксельна реєстрація зображень може бути досягнута різними способами: через послідовне маскування певних часток поверхні фотодетекторів багатоеlementного фотоприймача, шляхом послідовного лінійного субпіксельного зміщення зображення у фокальній площині вздовж рядків і стовпчиків багатоеlementного фотоприймального пристрою, шляхом послідовного кутового зміщення оптичних осей знімальної апаратури вздовж рядків і стовпчиків багатоеlementного фотоприймального пристрою.

Технологія субпіксельної реєстрації зображень нівелює необхідність підвищення кількості фотодетекторів багатоеlementного фотоприймального пристрою за рахунок збільшення часу реєстрації та певного ускладнення конструкції знімальної апаратури. Зазвичай субпіксельна реєстрація зображень є єдиним можливим способом підвищення просторового розрізнення дистанційного знімання, якщо обмежені як кількість фотодетекторів у багатоеlementному фотоприймальному пристрої, так і поле огляду знімальної апаратури.

У статті [2] як джерело зондувального випромінювання використано напівпровідникові лазери, які працюють в імпульсному режимі в ближньому ІЧ-діапазоні.

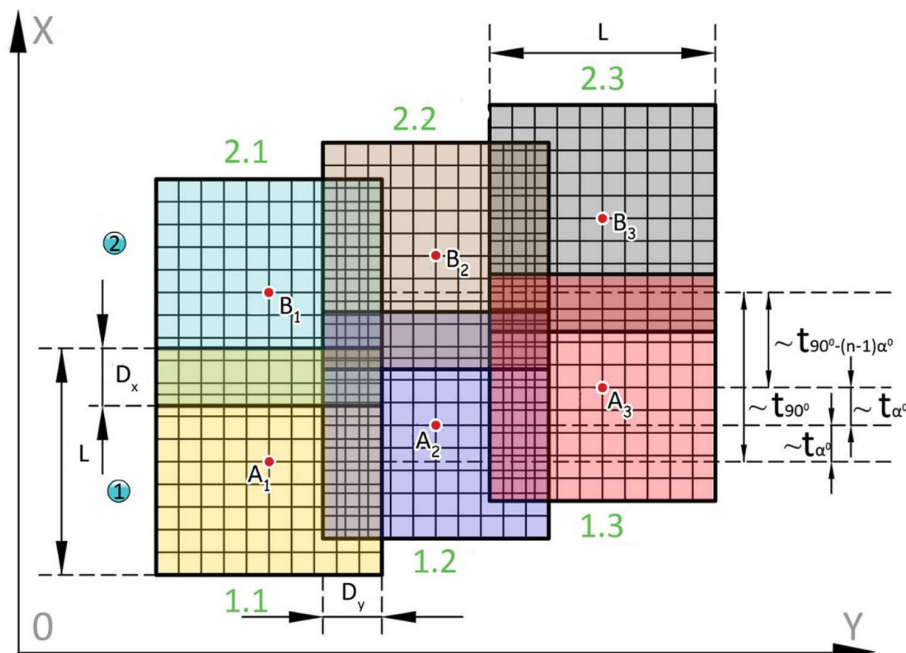


Рис. 6. Приклад знімків, що містять три групи кадрів [5]
Fig. 6. Sample images containing three groups of staff [5]

Лазер випромінює короткі імпульси з частотою кілька тисяч герц на секунду, напрямок поширення яких регулюється оптичною системою, зокрема сканувальним елементом. У процесі знімання безперервно отримують смуги сканування. Лазерний промінь у межах однієї смуги відхиляється дзеркалом чи призмою, а набір смуг отримують унаслідок руху носія. Точність вимірювання відстані становить близько декількох сантиметрів. Імпульси поширюються прямолінійно у напрямку сцени знімання.

При зіткненні з поверхнею Землі або наземними об'єктами імпульс відбивається. Це відбиття, як правило, є дифузним, тобто в бік локатора повертається тільки частина енергії. Моменти часу, що відповідають випромінюванню зондувального імпульсу, а також фіксації відбитого імпульсу приймачем, реєструють з високою точністю за допомогою пристрою Time Interval Meter оптико-електронного блока, що дає змогу визначати часовий інтервал, за який зондувальний імпульс проходить від джерела до приймача і назад, а також вимірювати відстань від джерела до об'єкта, який викликав відбиття. В кожному сеансі вимірювань можна реєструвати відбиття більш ніж від одного об'єкта.

Переваги лазерного сканування: відносно короткий цикл робіт; час отримання цифрової моделі рельєфу (ЦМР), ортофотомозаїки, багатьох контурних об'єктів і просторових моделей географічних об'єктів становить 2–3 дні після польоту; висока точність побудови ЦМР. Здебільшого точність планових і висотних координат становить 15 см; не потрібно виділяти планово-висотні позначки та визначати їх координати; висока продуктивність, на практиці досягнуто продуктивність знімання 500–600 км за день для лінійних об'єктів і 500–1000 км²

для площ; можливість роботи вночі і в будь-яку пору року (оскільки лідар реєструє не відбите сонячне випромінювання, а власне відбите); для сканування не є перешкодою рослинність; кошти на створення ЦМР менші, ніж за використання інших методів, зокрема традиційного фотограмметричного; широкий спектр застосування. Основний недолік – знімки неможливо отримувати за поганої погоди.

Результати аналізу. У таблиці наведено всі необхідні вимоги, що висуваються до методів поліпшення просторового розрізнення знімків: ефективність підвищення просторового розрізнення; їх доступність; види груп знімків; швидкість виконання робіт і доцільність їх універсального використання для подальших досліджень геологічної галузі. Також у таблиці відображено наявність чи відсутність тих чи інших вимог у цих методів.

Спосіб кутового зміщення оптичної осі знімальної камери під час знімання [1]. Цей метод добре підвищує просторове розрізнення, проте не є широкодоступним і не працює зі всіма групами знімків. Одним з плюсів методу є швидкість виконання робіт – знімки літального апарата швидко отримують, і вони готові до обробки. Тому цей метод доцільно використовувати для локальних завдань на малих територіях.

Спосіб аерокосмічного знімання лінійних об'єктів [7]. Метод якісно поліпшує просторове розрізнення об'єктів на космознімках. Проте він не є доступним, працює не зі всіма групами знімків, не є швидким методом.

Сканерний спосіб цифрового аерофотознімання з літака системою ADS 40 [3]. Як і всі методи, добре підвищує просторове розрізнення. Не є доступним і швидким. Проте його доцільно використовувати

через кольорові знімки невеликих територій високої якості, які він забезпечує.

Спосіб геометричного зіставлення [4]. Метод відповідає всім потрібним вимогам, крім доступності, оскільки не завжди можна використати необхідні лабораторні умови. Проте метод працює зі всіма групами знімків і є достатньо швидким. Його доцільно використовувати для завдань геологічного профілю.

Спосіб злиття двох знімків в один за допомогою програмного забезпечення [9]. Цей метод є доступним, оскільки його можна використовувати в програмному забезпеченні вільного доступу. Проте він не є швидким і працює не зі всіма групами знімків. Він може бути корисним для використання у геологічних дослідженнях.

Спосіб підвищення розрізнення за рахунок прибирання шуму [14]. Перший метод, що підходить за всіма параметрами. Доступний, швидкий, працює зі всіма групами знімків. Однозначно доцільно використовувати у дослідженнях геологічного спрямування.

Спосіб підвищення розрізнення за допомогою кокригінгу [12]. Однією з переваг методу є його доступність, проте його швидкість і універсальність невеликі. Недоцільно використовувати.

Спосіб на основі власних характеристик датчика [11]. Метод якісно підвищує просторове розрізнення знімків, проте не є доступним і швидким. Тому не має сенсу розглядати його в геологічних дослідженнях.

Функція Pansharpening в ENVI [13]. Другий метод, який відповідає всім необхідним вимогам.

Аналіз результатів дослідження методів підвищення просторового розрізнення космознімків
Analysis of study methods for improving spatial resolution of satellite imagery

№ п/п	Метод	Якісне підвищення просторового розрізнення	Доступність	Робота зі всіма групами знімків	Швидкість виконання робіт	Використання для завдань геологічної галузі
1	Спосіб кутового зміщення оптичної осі знімальної камери під час знімання	+	—	—	+	+
2	Спосіб аерокосмічного знімання лінійних об'єктів	+	—	—	—	—
3	Сканерний спосіб цифрового аерофотознімання з літака системою ADS 40	+	—	—	—	+
4	Спосіб геометричного зіставлення	+	—	+	+	+
5	Спосіб злиття двох знімків в один за допомогою програмного забезпечення	+	+	—	—	+
6	Спосіб підвищення розрізнення за рахунок прибирання шуму	+	+	+	+	+
7	Спосіб підвищення розрізнення за допомогою кокригінгу	+	+	—	—	—
8	Спосіб на основі власних характеристик датчика	+	—	—	—	—
9	Функція Pansharpening в ENVI	+	+	+	+	+
10	Спосіб з модифікацією контрастності зображення	+	+	—	—	—
11	Метод зсуву зображень місцевості	+	—	+	+	+
12	Метод субпіксельної реєстрації	+	+	+	+	+
13	Метод з використанням напівпровідникових лазерів	+	—	+	—	+

Швидкий, доступний, якісно підвищує просторове розрізнення і працює зі всіма групами знімків. Однозначно доцільно використовувати.

Спосіб з модифікацією контрастності зображення [6]. Цей метод якісно підвищує просторове розрізнення і є доволі доступним, проте його доцільно застосовувати лише для спотворених знімків. Оскільки він має вузький профіль дослідження, його не має сенсу використовувати.

Метод зсуву зображень місцевості [5]. Цей патент не є доступним, проте має чимало переваг: працює зі всіма групами знімків, швидкий і якісний. Однозначно доцільно використовувати для завдань геологічного спрямування.

Метод субпиксельної реєстрації [10]. Третій метод, що відповідає всім вимогам. Дуже універсальна методологія, яку потрібно використовувати. Швидка, доступна і якісна.

Метод з використанням напівпровідникових лазерів [2]. Має вузький профіль дослідження, не є доступним або швидким. Проте якість вихідних матеріалів робить доцільним його використання.

Отже, після аналізу існуючих методів можна виділити 3 методи як універсальні: спосіб підвищення розрізнення за рахунок прибирання шуму, функцію Pansharpening в ENVI і метод субпиксельної реєстрації. Ці методи відповідають усім вимогам. Особливої уваги заслуговують метод геометричного зіставлення і метод зсуву зображень місцевості. Вони недоступні, проте вихідний результат зумовлює їхню актуальність. Також можна використовувати спосіб кутового зміщення оптичної осі знімальної камери під час знімання; сканерний спосіб цифрового аерофотознімання з літака системою ADS 40, спосіб злиття двох знімків в один за допомогою програмного забезпечення і метод з використанням напівпровідникових лазерів. Вони мають чимало недоліків, проте залишаються актуальними для геологічних досліджень.

Практичне значення і висновки. Наведені приклади розв'язання проблеми підвищення просторового розрізнення аерокосмічних знімків засвідчують можливість і ефективність застосування субпиксельної технології для вирішення геологічних завдань. Серед запропонованих методів слід виділити паншарпенінг у програмному забезпеченні ENVI [13] і метод геометричного зіставлення [4]. Вони мають найменше недоліків. Також особливої уваги заслуговує метод субпиксельної реєстрації [10]. Наведено приклади [1, 5, 7] розв'язання проблеми підвищення роздільної здатності аерокосмічних апаратів для здійснення аерокосмічного наземного знімання.

Розв'язання проблеми підвищення розрізнення космознімків може допомогти у чисельних задачах геології, які розв'язують за допомогою ДЗЗ. Практичне значення наукової статті полягає у можливості застосування положень і висновків дослідження у практичній діяльності геологічних підприємств,

компаній, що займаються дослідженням за допомогою ДЗЗ, здешевлення отримання якісної інформації та ефективної підтримки прийняття рішень у процесі управління і моніторингу.

Список бібліографічних посилань

1. Байса Д.Ф., Бурачек В.Г., Зацерковный В.И., Беленок В.Ю. Научно-исследовательская работа "Применение технологий дистанционного зондирования Земли для решения задач кадастра и мониторинга земель". Чернигов; Киев, 2011.
2. Бурачек В.Г., Зацерковный В.И., Беленок В.Ю. Аналіз можливості підвищення якості дешифрування аерокосмічних знімків. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки"*. 2010. № 42. С. 204-212.
3. Бурштинська Х.В., Станкевич С.А. Аерокосмічні знімальні системи. Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2010. 288 с.
4. Селиванов А.С. Субпиксельная обработка как способ повышения разрешающей способности в системах дистанционного зондирования. «Современные проблемы ДЗЗ из космоса». *Вторая открытая всероссийская конференция*. 2004. С. 47.
5. Спосіб цифрового аерофотознімання: пат. 79505 Україна. № G02B 13/08, G03B 37/00; заявл. 25.06.2007, Бюл. № 9. 4 с.
6. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2010. С. 52-55.
7. Belenok V., Burachek V., Zatserkovnyy V., Popov M., Stankevich S. Subpixel Image Acquisition for Detailed Aerospace Imaging. *The Eighth International Conference on Digital Technologies 2011*. Zilina. 2011. V. 7. P. 1-25.
8. Grodecki J., Dial G. Block Adjustment of High-Resolution Satellite Images described by Rational Polynomials. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2003. V. 69. P. 59-68.
9. Herbert J. Kramer. Observation of the Earth and its Environment. *Survey of Missions and Sensors. 4th Edition*. 2002. 1510 p.
10. Liu H.Y., Zhang Y.S., Ji S. Study on the methods of super-resolution image reconstruction. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2008. V. 37, part B2. P. 461-466.
11. Qian S.-E. A decadal P s D of near lossless data compression on-board satellites at Canadian Space Agency. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2010. V. 4. P. 21-22.
12. Rodriguez-Galiano V.F., Pardo-Iquiza E., Chica-Olmo M., Rigol-Sanchez J.P. Increasing the spatial resolution of thermal infrared images using cocriging. *Science Direct, Procedia Environmental Sciences*. 2011. V. 3. P. 117-122.
13. SPEAR Pan Sharpening in ENVI. URL: <http://www.harrisgeospatial.com/docs/SPEARPPansharpening.html> (Accessed 27 November 2014).
14. Sushma Lalwani, Urma Ansari. A new approach for increase resolution of satellite image. *IJETAE*. 2012. V. 2. P. 47-55.
15. Ward K., Tough R., Watts S. Sea clutter: scattering, the K distribution and radar performance. Croydon: CPI Group Ltd. 2013. V. 10. 586 p.

Надійшла до редакції 10.04.2017 р.

В.Г. Бурачек¹, В.И. Зацерковный², Е.К. Углицких²

¹ Университет новейших технологий, ул. Машиностроителей, 28, г. Киев, 03067, Украина

² УНИ “Институт геологии” Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина, e-mail: vbur2008@ukr.net, vitalii.zatserkovnyi@gmail.com, uglitskih_evgeniy_1993@mail.ru

Рассмотрены проблемы цифровой аэросъемки, пути повышения качества выполнения съемочных работ. Разработаны новые способы съемки, которые позволяют за счет использования субпиксельной технологии получать снимки более высокого пространственного разрешения. Приведен анализ существующих методов повышения пространственного разрешения космоснимков и аэрокосмических съемочных систем. Выделены наиболее перспективные методы применения цифровой аэрокосмической съемки для решения геологических задач.

Ключевые слова: аэрокосмическая съемка, дистанционное зондирование Земли, субпиксельная технология.

APPROACHES TO INCREASE SPATIAL RESOLUTION OF SATELLITE IMAGES

V.G. Burachek¹, V.I. Zatserkovny², Ye.K. Uhlitskykh²

¹ University of the New Technologies, 28, Mashinobudivnikiv Str., Kyiv, 03067, Ukraine

² Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology, 90, Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine
e-mail: vbur2008@ukr.net, vitalii.zatserkovnyi@gmail.com, uglitskih_evgeniy_1993@mail.ru

Purpose. One of the main unsolved problems in the use of aerospace images is the problem of developing new, more effective methods and software tools for automated interpretation of these data. With the modern processing of space images, there can be often a problem of interpreting small objects in the desired territory or increasing the accuracy of research. However, not all images have a good spatial resolution or are difficult to access. This problem can be solved by methods for improving the spatial resolution of space images by using subpixel technology. The purpose of the article is to develop and analyze the existing methods to increase the spatial resolution of space images and to select the most appropriate and accurate ones for modern research.

Design/methodology/approach. The general methodology for increasing spatial resolution based on subpixel recording provides for a sequential transition from pixel grids of low-resolution input images to a subpixel grid of an enhanced spatial resolution created on their basis. Thus, within the same general field of view, n images are formed, geometrically offset relative to each other by $1/n$ pixel fraction.

Findings. The above examples of solving the problem of increasing the resolution of aerospace images shows the reality and effectiveness of using sub-pixel technology. Among the proposed methods, we should emphasize allocated pan-sharpening in the ENVI software package and the method of geometric comparison. They have fewer flaws compared to the rest. In addition, the subpixel recording method deserves special attention. Besides, in the analyzed methods, there is a description of increasing the spatial resolution for aerial photography.

Practical value/implications. It should be noted that in solving problems of large-scale mapping, digital cameras used today for aerial photography are inferior to photographic resolution, but they have many advantages, such as the possibility of automating the photogrammetric process, reducing its laboriousness, etc. In addition, increasing the resolution of space images after their processing with the software can help in solving modern problems in geology that need remote sensing. The work carried out makes it possible to apply the findings of the study to practical activities of geological enterprises and companies engaged in remote sensing research, to reduce the cost of obtaining quality information, and to effectively support decision-making in the management and monitoring processes.

Keywords: aerospace photography, remote sensing, the sub-pixel technology.

References:

1. Baysa D.F., Burachek V.G., Zatserkovny V.I., Belenok V.Yu. Nauchno-issledovatel'skaya rabota «Primenenie tekhnologiy distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya resheniya zadach kadastra i monitoringa zemel». Chernigov; Kiev, 2011 [In Russian].
2. Burachek V.Gh., Zacerkovny V.I., Belenok V.Ju. Analiz mozhlyvosti pidvyshhennja yakosti deshyfruvannja aerokosmichnykh znimkiv. *Visnyk Chernighivskogo Derzhavnogo tekhnologichnogo universytetu. Serija "Tekhnichni nauky"*, 2010, no. 42, pp. 204-212 [In Ukrainian].
3. Burshtynska Kh.V., Stankevych S.A. Aerokosmichni znimaljni systemy. Lviv, Ljvivska politekhnika, 2010, 288 p. [In Ukrainian].
4. Selivanov A.S. Subpiksel'naya obrabotka kak sposob povysheniya razreshayushchey sposobnosti v sistemakh distantsionnogo zondirovaniya. *"Sovremennye problemy DZZ iz kosmosa"*. Vtoraya otkrytaya vserossiyskaya konferentsiya, 2004, p. 47 [In Russian].

5. Sposib cyfrovogho aerofotoznmannja: patent 79505 Ukraine. G02V 13/08, G03V 37/00; 25.06.2007, Bjul. 9, 4 p. [In Ukrainian].
6. Tokareva O.S. Obrabotka i interpretatsiya dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli. Tomsk, Izdatelstvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2010, pp. 52-55 [In Russian].
7. Belenok V., Burachek V., Zatserkovniy V., Popov M., Stankevich S. Subpixel Image Acquisition for Detailed Aerospace Imaging. *The Eighth International Conference on Digital Technologies 2011*. Zilina, 2011, vol. 7, pp. 1-25.
8. Grodecki J., Dial G. Block Adjustment of High-Resolution Satellite Images described by Rational Polynomials. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2003, vol. 69, pp. 59-68.
9. Herbert J. Kramer. Observation of the Earth and its Environment. *Survey of Missions and Sensors. 4th Edition*, 2002, 1510 p.
10. Liu H.Y., Zhang Y.S., Ji S. Study on the methods of super-resolution image reconstruction. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, vol. 37, part B2, pp.461-466.
11. Qian S.-E. A decadal P s D of near lossless data compression on-board satellites at Canadian Space Agency. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2010, vol. 4, pp. 21-22.
12. Rodriguez-Galiano V.F., Pardo-Iquiza E., Chica-Olmo M., Rigol-Sanchez J.P. Increasing the spatial resolution of thermal infrared images using cocriging. *Science Direct, Procedia Environmental Sciences*, 2011, vol. 3, pp. 117-122.
13. SPEAR Pan Sharpening in ENVI. Available at: www.harrisgeospatial.com/docs/SPEARPPansharpenning.html (Accessed 27 November 2014).
14. Sushma Lalwani, Urma Ansari. A new approach for increase resolution of satellite image. *IJETAE*, 2012, vol. 2, pp. 47-55.
15. Ward K., Tough R., Watts S. Sea clutter: scattering, the K distribution and radar performance. Croydon, CPI Group Ltd, 2013, vol. 10, 586 p.

Received 10/04/2017