

УДК 004.932

О.М. Кравченко¹, М.С. Лавренюк², Н.М. Куссульт¹
¹Інститут космічних досліджень НАНУ-ДКАУ
²Київський національний університет ім. Тараса Шевченка
inform@ikd.kiev.ua, nick_93@ukr.net

Алгоритм географічної прив'язки знімків супутника «Січ-2»

Запропоновано алгоритм географічної прив'язки знімків українського супутника «Січ-2» в оптичному діапазоні, що полягає в автоматичному пошуку контрольних точок шляхом співставлення фрагментів знімку з фрагментами зображення базового покриття. Використання алгоритму дозволяє ідентифікувати значну кількість контрольних точок у складних умовах зйомки, що дозволяє використовувати нелінійні моделі компенсації зміщень координат об'єктів на знімку. Перевірка точності прив'язки на 73 знімках «Січ-2» показала, що середньоквадратична похибка прив'язки зменшилася у порівнянні з похибкою прив'язки за орбітальними даними у середньому у 42 рази (з 590 м до 14 м), а у порівнянні з існуючими алгоритмами у 4 рази.

Ключові слова: географічна прив'язка, суміщення зображень, супутникові знімки, Січ-2

Вступ

Космічний апарат (КА) «Січ 2» отримує знімки поверхні Землі в оптичному і середньому інфрачервоному діапазонах. Для розв'язання тематичних задач на основі об'єднання зображень отриманих з різних джерел необхідна точна географічна прив'язка знімків. Базова точність геоприв'язки за орбітальними показниками КА Січ-2 (250-2000 м) є дуже низькою і не може використовуватись для аналізу зображень та конкурувати з такими супутниками як RapidEye (точність прив'язки 20-50 м), Landsat5 (50 м), Spot5 (30 м) [1]. Уточнення прив'язки супутникових даних в Україні зазвичай здійснювалось напівавтоматичними методами із залученням людини-оператора для візуального пошуку контрольних точок (ground control points – GCP) на зображенні та опорній карті. Але такий підхід вимагає значних людських ресурсів та часу, що не дозволяє виконувати геоприв'язку в реальному часі для великої кількості знімків.

На сьогодні існують методи автоматичного пошуку контрольних точок та автоматичної прив'язки знімків. Наприклад, для даних Landsat-5,7 розроблений метод AROP, реалізований у відповідному програмному забезпеченні [2].

Цей алгоритм адаптований для КА «Січ-2» [3]. Точність прив'язки даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) КА «Січ-2» до базового покриття для більшості знімків території України становить 50-100м. За наявності хмар та складних умов зйомки алгоритм виявляється непрацездатним.

Основна причина вказаних проблем – знаходження малої кількості опорних точок за наявності хмарності, засніжених та засвічених знімків в умовах зміни земного покриття за 10 років, що розділяють моменти часу отримання базового покриття та сучасних даних.

Для подолання цих проблем в роботі запропонований новий алгоритм пошуку опорних точок, що знаходить на знімках КА «Січ-2» у декілька разів більше опорних точок ніж AROP. Велика кількість опорних точок дозволяє використовувати нелінійні моделі перетворення координат з системи координат сенсору у географічну систему координат, в результаті точність прив'язки підвищується більше ніж в 4 рази і сягає у середньому 13,9 м для знімків зі звичайними умовами зйомки. Більше того, удосконалений алгоритм демонструє працездатність в складних умовах зйомки (точність прив'язки у середньому 36,6 м), за яких існуючі алгоритми не працюють.

Існуючі підходи щодо покращення географічної прив'язки даних ДЗЗ

Геоприв'язка (image registration) — це процес перетворення різних наборів даних, отриманих в різний час або з різних сенсорів в одну систему координат. Існуючі методи прив'язки даних ДЗЗ у більшості випадків складаються з наступних етапів [4-9]:

- пошук опорних точок (feature detection);
- співставлення опорних точок (feature matching);
- побудова моделі перетворення координат або моделі сенсора;

- застосування цієї моделі для перетворення у відповідну проекцію з використанням обраного методу інтерполяції.

Є два основні підходи щодо пошуку контрольних точок — це об'єктно-орієнтований метод, що ґрунтується на визначенні ознак (feature-based method — FBM) та метод, орієнтований на роботу з площами (area-based метод — ABM). В методі, орієнтованому на роботу з площами, у якості опорної точки виступає частина зображення.

Об'єктно-орієнтований метод передбачає пошук локалізованих об'єктів, що є незмінними на обох зображеннях. У випадку знімків ДЗЗ ними можуть бути місця перетину доріг та лісосмуг, основи мостів, берегові лінії, лінії границь ліс-грунт, вершини гірських піків тощо. Такими об'єктами є точкові об'єкти, що виділяються за допомогою методів пошуку кутових точок, зокрема, за допомогою оператора Гарріса [10], Plessey [11], SIFT [8, 12], SURF [12, 13]. Також у якості «об'єктів» можуть використовуватися набори ліній, що отримані, наприклад, на основі перетворення Хафа [14], або замкнені області, наприклад, «об'єкти» MSER [12]. Для об'єктно-орієнтованого методу в кожній точці зображення обчислюється дескриптори, які в подальшому порівнюються між собою, і утворюються пари, дескриптори яких відрізняються найменше.

В ABM-методі першим етапом виконується попередня обробка зображення, наприклад, за допомогою вейвлет-перетворень (wavelet transform) [15], log-polar transform [16] або обчислення градієнтів з використанням операторів Canny [17], Laplacian of Gaussian [18], Prewitt або Собеля. Наступним кроком є узгодження фрагментів базового та отриманого зображень [6] шляхом оптимізації міри схожості між цими двома фрагментами. Існують три основних варіанти реалізації узгодження особливостей для ABM-методу:

- обчислення коефіцієнтів кореляції (correlation coefficient — CC) [19, 20],
- застосування перетворення Фур'є [5, 21],
- використання методу взаємної інформації.

Розглянемо кожен з них більш детально.

Метод обчислення коефіцієнтів кореляції (correlation coefficient — CC) або його модернізації базуються на обчисленні максимуму серед коефіцієнтів кореляції для знаходження найбільшої міри схожості між частинами зображень:

$$CC(i, j) = \frac{\sum_w (W - E(W))(I_{(i,j)} - E(I_{(i,j)}))}{\sqrt{\sum_w (W - E(W))^2}} \times \frac{1}{\sqrt{\sum_{I(i,j)} (I_{(i,j)} - E(I_{(i,j)}))^2}} \quad (1)$$

Схожим алгоритмом по пошуку міри відповідності є алгоритм послідовного пошуку схожих фрагментів (sequential similarity detection algorithm — SSDA) [22], що базується на порівнянні частотних рядів обох зображень. Окремий клас мір схожості оснований на застосуванні перетворення Фур'є [5, 21]. Метод Фур'є використовується для представлення зображення у просторі частот двовимірних гармонічних функцій та ґрунтується на теоремі Фур'є про зсув (Fourier Shift Theorem), яка стверджує, що фаза cross-power spectrum еквівалентна різниці фаз між зображеннями [23]. Виконуючи обернене перетворення Фур'є отримаємо функцію, що майже рівна нулю скрізь, окрім оптимального зміщення одного зображення відносно іншого. Перевагами цього методу є швидкість обчислення, а також стійкість до зашумлення отриманих зображень та отримання зображень за різних умов (в нашому випадку в різні пори року). Саме тому останнім часом цей метод більше застосовується для аналізу супутникових зображень, ніж класичні кореляційні методи.

Основними моделями перетворення координат є наступні:

- лінійна або квадратична, що використовується в алгоритмі AROP [2];
- модель з використанням дробово-раціональних коефіцієнтів (Rational Polynomial Coefficient — RPC);
- перетворення на основі використання фізичної моделі сенсора.

Найчастіше для побудови моделі використовують поліноми невисокого степеня від двох змінних. Лінійна модель, тобто афінне перетворення, є найбільш простим та популярним методом. Розглянемо детально алгоритм автоматичної реєстрації та орторектифікації зображення (AROP), який розроблений для супутників Landsat та базується на лінійній або квадратичній моделях [2].

Алгоритм AROP [2] адаптований для геоприв'язки даних супутника «Січ-2» та впроваджений у Центрі прийому і обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля Державного космічного агентства України [3]. В програмній реалізації системи для України для пошуку опорних точок використовується метод,

орієнтований на роботу з площами, метод обчислення коефіцієнтів кореляції СС, лінійна або квадратична модель перетворення координат. В [3] зазначається, що інформаційна технологія геоприв'язки, реалізована у вигляді програмно-технічного комплексу (ПТК), не позбавлена недоліків і потребує подальшого удосконалення. Основні проблеми наявного ПТК обумовлені значним рівнем хмарності знімків, зйомкою у зимовий період та втратою актуальності базового покриття.

Для подальшого підвищення точності та робастності геоприв'язки необхідно розробити нові робастні методи пошуку контрольних точок, що спеціально адаптовані для порівняння знімків, зроблених у різні періоди часу. Подібні алгоритми мають бути менш чутливими до змін ландшафту внаслідок неактуальності базового покриття, що покращить точність геоприв'язки для тих територій, для яких оновлення базового покриття є ускладненим. Вирішенню саме цієї проблеми присвячена дана стаття.

Алгоритм географічної прив'язки супутникових даних

Запропонований алгоритм складається з декількох кроків, що є загальноприйнятими при розв'язанні задачі геоприв'язки — пошуку та співставлення контрольних точок, оцінки перетворення систем координат та його застосування для геоприв'язки знімку. Оскільки для даних КА «Січ-2» вже існує апробований алгоритм автоматичної геоприв'язки [3], що у свою чергу є адаптацією алгоритму AROP [2], розглянемо запропонований алгоритм у порівнянні з наявним.

На рис.1 зображена блок-схема алгоритму, де штриховкою відмічені етапи які відрізняються від запропонованих в AROP, а пунктирним контуром позначені нові етапи, які додаються в запропонованому алгоритмі. Перелік основних відмінностей між алгоритмами наведено в таблиці 1.

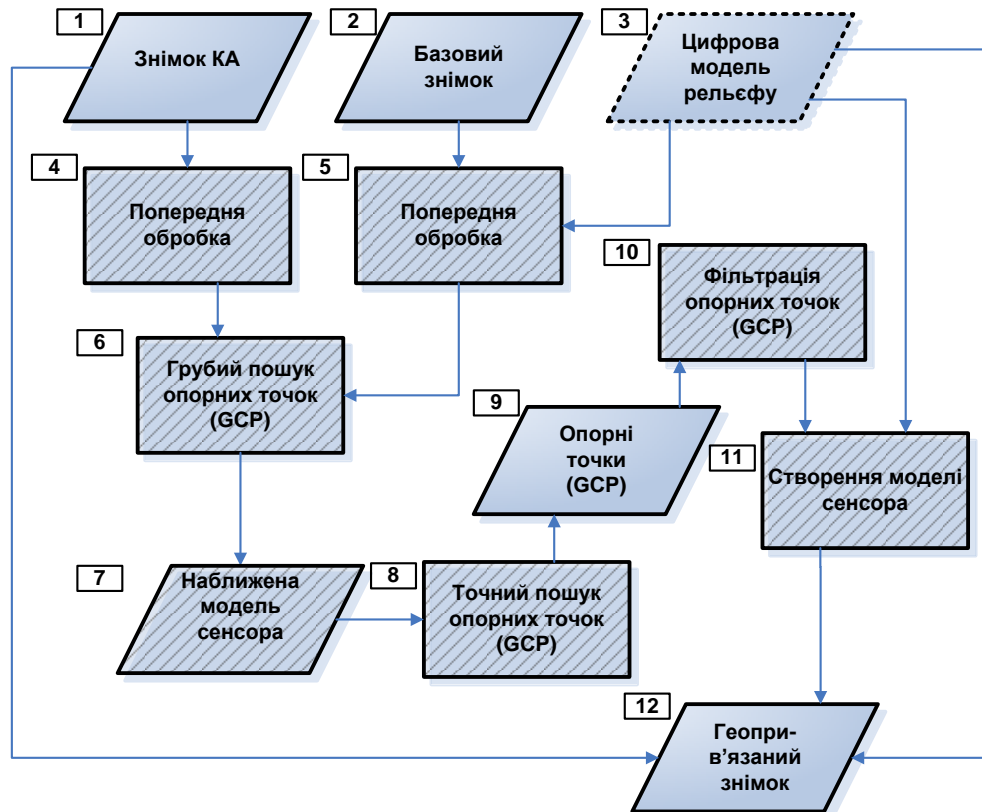


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму геоприв'язки даних КА "Січ-2"

Першим етапом алгоритму геоприв'язки є попередня обробка знімків (препроцесинг), що полягає у трансформуванні базового знімку з використанням даних про геометрію зйомки та моделі рельєфу для штучного внесення спотворень, що спричинені перепадами висоти рельєфу при зйомці під кутом (блоки 4, 5 на рис. 1). Це дає можливість зменшення похибок при подальшому співставленні фрагментів базового зображення та знімку. За рахунок перепроєктування знімків отримуємо обидва зображення в одній проекції. Наступним етапом алгоритму є пошук опорних точок, який здійснюється в 2 кроки (блоки 6 та 8 на рис. 1). Спочатку для обчислення градієнту яскравості зображення в кожній точці застосовується оператор Собеля:

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} * A, \quad G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * A, \quad (2)$$

де A — зображення, для якого потрібно знайти границі об'єктів, а $*$ позначає двовимірну операцію згортки. У подальшому для співставлення зображень використовується модуль градієнту:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (3).$$

В формулі (3) всі операції виконуються для кожного пікселя зображень, що дозволяє визначити границі об'єктів на зображеннях.

Таблиця 1 – Відмінності запропонованого алгоритму та алгоритму AROP

Назва процесу	Реалізація AROP	Запропонована модифікація
Попередня обробка базового знімку (етапи 4-5).	Перетворення у проекцію базового покриття без використання моделі рельєфу.	Використання цифрової моделі рельєфу для перетворення знімків базового покриття до знімків виду "Січ-2" для мінімізації спотворення, що вносяться рельєфом при пошуку опорних точок.
Грубий та точний пошук опорних точок (етапи 6,8).	Використовуються копії зображень зі зменшеним розрізненням (у 3-10 разів) для пошуку опорних точок у випадку значних зміщень, що дозволяє ідентифікувати тільки великі об'єкти (озера тощо).	Використовується метод Фур'є з достатньо великим вікном для знімку та базового зображення, що дозволяє ідентифікувати невеликі об'єкти, такі як лісосмуги, дороги, що є відносно незмінними.
Наближена модель сенсора (етап 7)	Обчислюється як поліном степеня 0, тобто є паралельним переносом всього зображення.	Обчислюється як ступінчата функція, тобто паралельний перенос здійснюється для кожної з частин зображення.
Фільтрація опорних точок (етап 10)	Обчислюється через коефіцієнт кореляції тому сильно залежить від сезону зйомки.	Відкидаються лише явні викиди на базі коефіцієнта кореляції. Основна фільтрація відбувається на кроці побудови остаточної моделі сенсора.
Створення моделі сенсора (етап 11)	Використовується лінійна або квадратична модель, яка приймає два параметри – координати.	Використовується нейронна мережа, яка приймає три параметри – координати та висоту.

Для робастного співставлення фрагментів зображення та пошуку зміщень обрано метод перетворень Фур'є. Згідно з властивостями перетворення Фур'є [23] для двох зображень im_1 та im_2 , що відрізняються зсувом (d_1, d_2)

$$im_2(x, y) = im_1(x - d_1, y - d_2), \quad (4)$$

відповідні перетворення Фур'є IM_1 та IM_2 пов'язані наступним чином:

$$IM_2(\omega_x, \omega_y) = e^{-i(\omega_x d_x + \omega_y d_y)} IM_1(\omega_x, \omega_y), \quad (5)$$

де

$$IM(\omega_1, \omega_2) = \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-i2\pi \left(\frac{x\omega_1}{N} + \frac{y\omega_2}{N} \right)}, \quad (6)$$

що дозволяє обчислити різницю фазових спектрів між двома зображеннями:

$$\frac{IM_1(\omega_x, \omega_y) IM_2^*(\omega_x, \omega_y)}{|IM_1(\omega_x, \omega_y) IM_2^*(\omega_x, \omega_y)|} = e^{(\omega_x d_x + \omega_y d_y)}, \quad (7)$$

де IM^* — комплексне спряжене до IM .

Обчислюючи (7), отримуємо значення різниці фаз між зображеннями. Виконавши обернене перетворення Фур'є, маємо функцію, максимум якої відповідає вектору зміщення між зображеннями.

Для грубого пошуку опорних точок виконується розбиття зображення на фрагменти розміром 1000x1000 пікселів (блок 6 на рис. 1). Після цього оцінюються параметри наближеної моделі сенсора у вигляді ступінчатої функції. Враховуючи середнє значення величини отриманих зміщень, уточнюємо величину зміщень на менших фрагментах зображення розміром 100*100 пікселів (блок 8 на рис. 1). Таким чином отримуємо множину опорних точок, що знаходяться на щільній регулярній сітці, яка розподілена по всьому зображенню. Для кожної із опорних точок відомо її зміщення на знімку «Січ-2».

В літературі [24, 25] описані методи знаходження опорних точок з субпіксельною точністю. Один з таких підходів полягає у інтерполяції зображень на дрібнішій сітці, але такий підхід достатньо ресурсоємний у зв'язку з квадратичною залежністю часу виконання алгоритму від субпіксельної точності. Тому нами був використаний алгоритм на основі крос-кореляції сусідніх пікселів в районі точки максимуму [24].

Наступним кроком відбувається фільтрація отриманих опорних точок. В даному алгоритмі на відміну від AROP відкидаються лише ті точки, які точно є викидами для побудови реалістичнішої моделі. Відкидання відбувається на основі застосування коефіцієнту схожості (крос-кореляції).

Далі будуємо модель сенсора на основі опорних точок, яка в подальшому буде застосована для перетворення зображення. Зупинимось детальніше на розробці цієї моделі, в зв'язку з можливістю суттєво підвищити точність геоприв'язки саме за рахунок цієї ланки в алгоритмі. Модель використовує значення висот рельєфу поверхні, які не враховувались при побудові моделі за допомогою алгоритму AROP. Таким чином, функція перетворення координат залежить від трьох змінних — двох координат та висоти рельєфу. Згідно [3] базова лінійна модель виявилася неадекватною для значної кількості знімків КА «Січ-2». Нелінійність залежності

величини зміщень від координат зумовлена різкими рухами супутника, що, як правило, відбуваються на початку або в кінці сеансу зйомки. Для моделювання вказаних нелінійних залежностей в даній роботі використовуються нелінійні моделі у вигляді поліному ступеня 3 та нейронної мережі на основі радіальних базисних функцій (РБФ):

$$\varphi(x) = \sum_{k=1}^K w_k \cdot \rho(\|x - c_k\|). \quad (8)$$

У якості функції активації використовується Гаусівська функція:

$$\rho = \exp\left\{-\frac{(X - x_k)^2}{2 \cdot \sigma_x^2} - \frac{(Y - y_k)^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right\}. \quad (9)$$

Навчальною вибіркою для оцінки параметрів моделей є множина опорних точок. Отримана модель застосовується для обчислення зміщень для кожного пікселя зображення та побудови результуючого геоприв'язаного зображення з використанням обраного методу інтерполяції.

Результати експериментальних досліджень

Для оцінки точності розробленого алгоритму і перевірки ступеню адекватності запропонованих моделей використаємо тестовий набір із 73-х знімків КА «Січ-2», що рівномірно покривають територію України. У якості базового будемо використовувати покриття GEOCOVER 2000, побудоване на основі даних приладу ETM+ супутника Landsat-7. Для автоматичного пошуку контрольних точок використаємо зображення КА «Січ-2» в каналі ближнього інфрачервоного діапазону (розрізнення 7.75 м) та зображення КА Landsat-7 у панхроматичному діапазоні (розрізнення 15 м). Для співставлення зображення КА Січ-2 приведені до розрізнення 15 м.

На рис. 2 наведено приклад знімку КА «Січ-2» Харківської області України (від 2012-09-11), базового зображення, що у даному випадку є композитом (мозаїкою) з двох знімків КА Landsat-7, та знайдених контрольних точок. Для оцінки зміщень між зображенням КА «Січ-2» та зображенням базового покриття, побудови моделі перетворення координат введемо прямокутну двовимірну систему координат, де вісь OY направлена вздовж, а вісь OX — перпендикулярно напрямку руху супутника «Січ-2» (рис. 2). Одиницею виміру по осях OX та OY є піксель, що відповідає 15 м. Для даної пари зображень КА «Січ-2» та базового покриття знайдено 5200 контрольних точок.

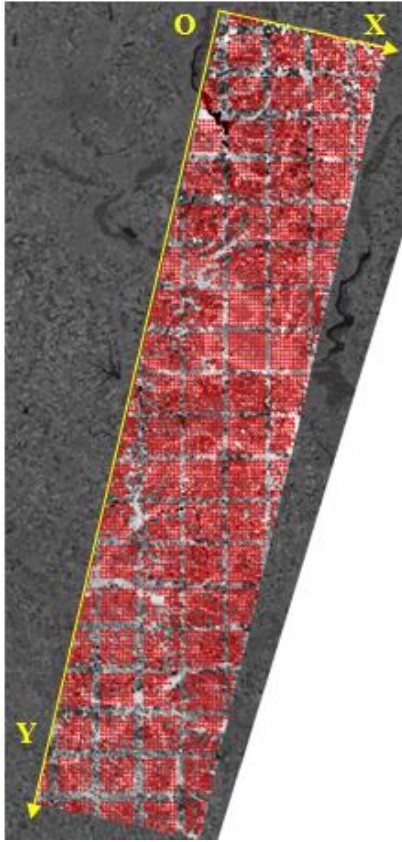


Рисунок 2 – Приклад знімку КА «Січ-2» та введена система координат

На рис. 3 показані графіки залежностей зміщень вздовж осей OX та OY у залежності від координати Y . Дані залежності є суттєво нелінійними, що не дозволяє використовувати афінні перетворення координат для компенсації зміщень об'єктів на зображенні КА Січ відносно базового зображення. Причина подібних зміщень полягає недостатній стабілізації КА по куту тангажа під час зйомки та у помилці в оцінці положення КА за орбітальними даними. Для даного знімку середньоквадратичні похибки (СКП) початкової прив'язки склали 42,5 пікселі по осі OX (645 м), а по осі OY — 31,5 пікселі (475 м)

Для компенсації початкових зміщень даного зображення КА Січ-2 побудовано поліноміальну та нейромережеву моделі перетворення координат. На рис. 4 наведено залежності залишкових зміщень по осі OY від координати Y після застосування поліноміальної на нейромережевої моделі. Застосування поліноміальної моделі перетворення координат не дозволяє повністю компенсувати коливання КА по куту тангажа (рис 3а). СКП по вісі OY склали 0,96 пікселів (14,4 м). Застосування нейромережевої моделі перетворення координат дозволило компенсувати більшість зміщень (рис. 3б). СКП по вісі OY склали 0,75 пікселів (11,2 м).

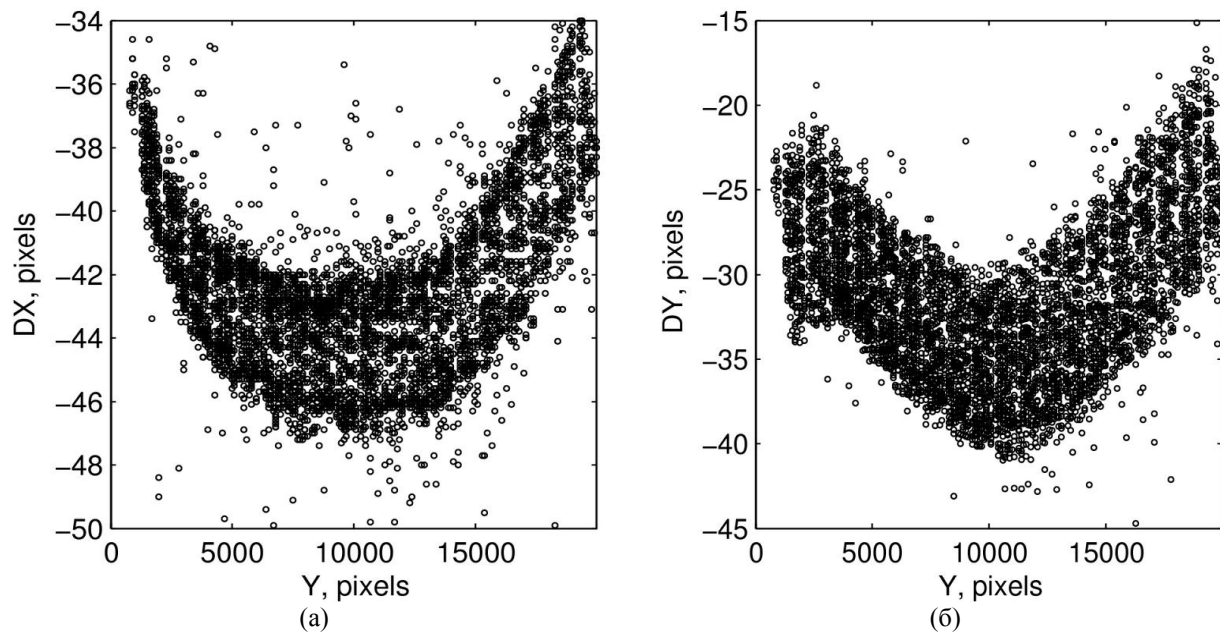


Рисунок 3 – Залежність зміщень по осі OX (а) та OY (б) від Y

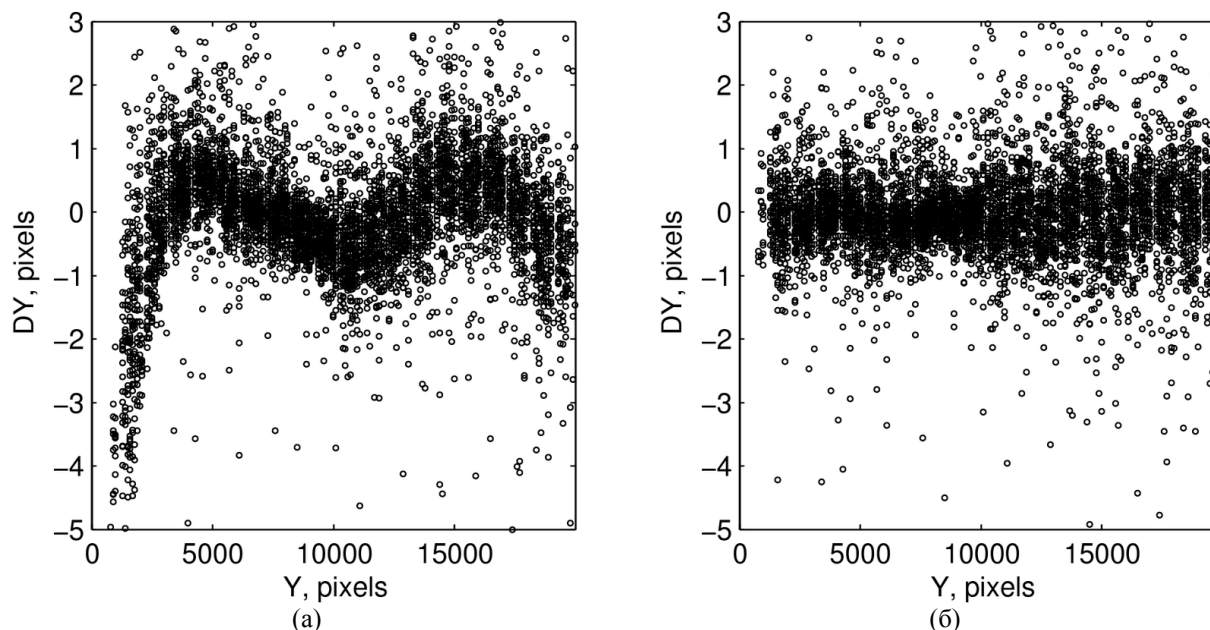


Рисунок 4 – Залежність похибок по вісі OY від координати Y отриманих поліноміальною (а) та нейромережевою (б) моделями

Оцінка точності географічної прив'язки знімків

Для оцінки точності географічної прив'язки проводився візуальний пошук об'єктів на вихідному зображенні КА «Січ-2» та відповідному базовому зображенні. Для кожного зображення КА «Січ-2» з тестового набору людиною-оператором відібрано 5 об'єктів, розташованих, здебільшого, по кутам зображення та в центрі. У якості об'єктів відбирались стаціонарні об'єкти, що не змінились з часом, зокрема перехрестя доріг, основи мостів тощо. Для кожного об'єкта фіксувалися координати на вихідному зображенні КА «Січ-2», на базовому зображенні GEOCOVER 2000, на зображенні КА «Січ-2», що оброблене запропонованим алгоритмом

Таблиця 2 – Оцінки похибок прив'язки

Алгоритм	Середня СКП прив'язки, набір 1 (46 знімків), м	Середня СКП прив'язки, набір 2 (27 знімків), м
Прив'язка за орбітальними даними	590,9	668,0
Алгоритм AROP	56,3	-
Запропонований алгоритм	13,9	36,6

Висновки

В даній роботі розроблений алгоритм автоматичної геоприв'язки супутникових даних

та алгоритмом AROP. На основі отриманої інформації для кожного знімку обчислена СКП відстані між відповідними точками на базовому зображенні та початкових і оброблених зображеннях КА «Січ-2». Отримані результати наведені у таблиці 2. Зауважимо, що з 73 знімків КА «Січ-2» 27 знімків не були оброблені алгоритмом AROP унаслідок недостатньої кількості знайдених контрольних точок або неадекватності лінійної моделі перетворення координат. Відповідно оцінка точності алгоритмів проводилася окремо на двох наборах знімків КА «Січ-2», що складаються з 46 та 27 знімків відповідно.

українського КА «Січ-2». В якості даних, що брались за основу для геоприв'язки, використане базове покриття GEOCOVER 2000, створене на базі знімків КА Landsat-7. Для покращення точності

геоприв'язки розроблений та реалізований алгоритм, в рамках якого шляхом автоматичного пошуку контрольних точок на знімку та базовому зображенні оцінюється нелінійне перетворення системи координат знімку у географічну систему координат. Для моделювання нелінійностей даного перетворення використовується нейронна мережа на основі радіальних базисних функцій.

Проведено аналіз результатів автоматичної прив'язки за допомогою запропонованого алгоритму та наявного алгоритму AROP, адаптованого до даних «Січ-2». Встановлено, що точність географічної прив'язки знімків «Січ-2» в середньому підвищилась у 4 рази, з 56.3м отриманих за допомогою алгоритму AROP до 13.9м отриманих унаслідок застосування розробленого алгоритму. Окрім цього, використання запропонованого алгоритму дозволило обробити додатково 27 знімків, що не змогли бути оброблені

наявними алгоритмами. СКП прив'язки у середньому склала 36,6 м при СКП прив'язки за орбітальними даними у середньому 668 м.

Таким чином, запропонований алгоритм значно покращує геоприв'язку супутникових знімків у порівнянні з наявними алгоритмами та прив'язкою за орбітальними даними, що допоможе заощадити людські ресурси та збільшить точність розв'язання тематичних задач.

Для подальшого підвищення точності в перспективі має сенс замість емпіричних моделей використовувати аналітичні моделі сенсора з урахуванням параметрів орієнтації супутника під час зйомки, а для спрощення використання знімків КА «Січ-2» у стандартних пакетах програм обробки даних ДЗЗ необхідна апроксимація оцінених перетворень координат раціональними поліноміальними функціями (RPC).

Список літератури

1. Spot satellite technical data // Spot Image/CNES. — 2010. — http://www.astrium-geo.com/files/pmedia/public/r329_9_spotsatellitetechnicaldata_en_sept2010.pdf
2. Feng Gao, Jeffrey G. Masek, and Robert E. Wolfe, "Automated registration and orthorectification package for Landsat and Landsat-like data processing", Journal of Applied Remote Sensing, 3, 033515, doi:10.1117/1.3104620, (2009).
3. О.П. Федоров, Н.М. Куссуль, О.М. Кравченко, С.Л. Янчевський, Р.М. Басараб, В.М. Кригін, М.С. Лавренюк. Інформаційна технологія географічної прив'язки даних космічної системи ДЗЗ «Січ-2» для території України. Космічна наука і технологія №1, том 13. К. - 2013р. С. 3-12
4. Barbara Zitova, Jan Flusser, "Image registration methods:A survey", Image and Vision Computing 21(2003)977-1000.
5. Sahil Suri "Automatic image to image registration for multimodal remote sensing images", Dissertation, Technische Universität München (2010).
6. L.M.G. Fonseca, B.S. Manjunath, Registration techniques for multisensor remotely sensed imagery, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 62 (1996) 1049–1056
7. Thomas Jansson. Feature Based Registration, January 27, 2006.
8. Guido Bartoli. Image Registration Techniques: A Comprehensive Survey. June 2007
9. Jimmy Singla. Technique of Image Registration in Digital Image Processing-A Review (Vol.5 No.2 2012), Pages: 275-277
10. Darshana Mistry, Asim Banerjee. Review: Image Registration, February 2012
11. D.Parks, J.P.Gravel, "Corner Detection", International Journal of Computer Vision, 2004.http://ftp.utcluj.ro/pub/users/nedeveschi/AV/5_CornerDetectors/CornerDetection.pdf
12. Gail Carmichael. Matching Spherical Panoramas and Planar Photographs. Ottawa, Ontario, Canada, August 2009
13. Anna Brook, Eyal Ben-Dor. Automatic Registration of Airborne and Spaceborne Images by Topology Map Matching with SURF Processor Algorithm. Remote Sens. 2011, 3, 65-82
14. Sarvaiya Jignesh N, Patnaik Suprava, Kothari Kajal, Feature Based Image Registration Using Hough Transform, S.V. National Institute of Technology, Surat, Gujarat, India
15. L.M.G. Fonseca, M.H.M. Costa, Automatic registration of satellite images, Proceedings of the Brazilian Symposium on Computer Graphic and Image Processing, Brazil, 1997, pp. 219 – 226
16. G. Wohlberg, S. Zokai: robust image registration using log-polar transform, A paper on using the log polar transform for registration
17. E. J. M Rignot, R. Kowk, J. C. Curlander, and S. S. Pang, "Automated multisensor registration: Requirements and techniques," Photogramm. Eng. Remote Sensing, vol. 57, pp. 1029–1038, Aug. 1991

18. T. Schenk, J. Li, and C. Toth, "Toward an autonomous system for orienting digital stereopairs," *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, vol. 57, pp. 1057–1064, Aug. 1991
19. W.K. Pratt, *Digital Image Processing*, 2nd ed., Wiley, New York, 1991
20. C.D.Kuglin and D.C.Hines The phase correlation image alignment method. *Proc. Int. Conf. On Cybernetics and Society*, pages 163–165, 1975
21. Lisa Gottesfeld Brown, A survey of image registration techniques, *ACM Computing Surveys (CSUR) archive*, Volume 24 , Issue 4, December 1992), Pages: 325 – 376
22. D.I. Barnea, H.F. Silverman, A class of algorithms for fast digital image registration, *IEEE Transactions on Computing* 21 (1972) 179–186
23. R.N. Bracewell, *The Fourier Transform and Its Applications*, McGraw-Hill, New York, 1965
24. Manuel Guizar-Sicairos, Samuel T. Thurman, and James R. Fienup, "Efficient subpixel image registration algorithms," *Opt. Lett.* 33, 156-158 (2008).
25. Qi Tian and Michael N. Huhns, "Algorithms for Subpixel Registration," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 35, pp. 220-233, August 1986

А.Н. КРАВЧЕНКО¹, Н.С. ЛАВРЕНЮК², Н.Н. КУССУЛЬ¹

¹Інститут космічних досліджень НАН України і ГКА України

²Київський національний університет ім. Тараса Шевченка

АЛГОРИТМ ГЕОГРАФІЧНОЇ ПРИВ'ЯЗКИ ЗНІМКІВ СУПУТНИКА «СІЧ-2»

Предложен алгоритм географической привязки снимков украинского спутника «Сич-2» в оптическом диапазоне состоящий в автоматическом поиске контрольных точек путем сопоставления фрагментов снимка с фрагментами изображения базового покрытия. Использование алгоритма позволяет идентифицировать значительное количество точек в сложных условиях съемки, что допускает применение нелинейных моделей компенсации смещений координат объектов на снимке. Проверка точности привязки на 73 снимках «Сич-2» показала, что среднеквадратичная погрешность привязки уменьшилась по сравнению с погрешностью привязки по орбитальным данным в среднем в 42 раза (с 590 м до 14 м), а по сравнению с существующими алгоритмами в 4 раза.

Ключевые слова: географическая привязка, совмещение изображений, спутниковые снимки, Сич-2

O.M. KRAVCHENKO¹, M.S. LAVRENYUK², N.M. KUSSUL¹

¹Space Research Institute of NAS of Ukraine and SSA of Ukraine

²Taras Shevchenko National University of Kyiv

SICH-2 SATELLITE IMAGE GEOREFERENCING ALGORITHM

We propose an algorithm for automatic image georeferencing for Ukrainian Sich-2 optical satellite. The idea of the algorithm is to perform automatic control points identification via area-based matching of satellite image with corresponding images from reference dataset. It is possible to identify large amount of control points under severe imaging conditions that enables using non-linear coordinate transformation models. We performed an accuracy assessment of our and existing algorithms on 73 Sich-2 images. The mean root mean squared error decreased in 42 times in comparison with error of georeferencing by orbital data only (from 590 m to 14 m) and decreased in 4 times in comparison with existing algorithms.

Keywords: georeferencing, image registration, satellite images, Sich-2