

## **ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ ДАЛЬНЬОГО ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ НА ОСНОВІ СУБПІКСЕЛЬНОЇ ОБРОБКИ**

**Станкевич С.А., Шкляр С.В., Подорван В.М., Лубський М.С.**  
*Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України*  
*E-mail: nickolo1990@gmail.com*

### **Thermal infrared imagery enhancement using sub-pixel processing**

Spatial resolution is the main specification of infrared imagery quality. Many technical restrictions do not allow realizing the high spatial resolution of thermal infrared band imagers. The software-based method for infrared imagery spatial resolution enhancement is presented. The method used two sub-pixel shifted images that contain time-invariant thermal emissivity data. Enhanced spatial resolution infrared imagery provides better informativity for remote sensing application.

Здатність сенсорних систем формувати зображення високої просторової розрізненості знижується разом із підвищенням довжини хвиль, на чутливість до яких орієнтується дана система. Це пов'язано із рядом фізичних обмежень, таких як зниження енергії квантів світла та необхідність підвищення лінійних розмірів детекторних елементів [1].

Таким чином, для підвищення просторої розрізненості доцільно застосовувати програмні методи. Одним із таких методів є застосування кількох субпіксельно зміщених одне відносно одного зображень.

Часто даний метод застосовуються для підвищення просторової розрізненості проміжних даних для підвищення якості результатів обробки зображень у тепловому інфрачервоному діапазоні, одним із найбільш поширених джерел яких є сенсор TIRS на борту супутника Landsat-8, із просторовою розрізненістю 100 м. Дані цього сенсора є основою для точного визначення температури різноманітних природних та штучних поверхонь [2], що дозволяє вирішити широкий спектр задач.

Субпіксельно зміщені зображення, для яких застосовується підвищення просторової розрізненості мають містити інваріантні дані із мінімальними розбіжностями. У випадку із обробкою даних теплового знімання найбільш доцільно застосовувати два зображення коефіцієнтів теплового випромінювання для досліджуваної території, отримані із мінімально можливим часовим інтервалом. Коефіцієнт теплового випромінювання – власна характеристика поверхні, яка описує її здатність поглинати тепло та дозволяє визначати фізичну температуру поверхні за даними дистанційного теплового знімання. При цьому за період повторного проходження над дослідною територією супутника (16 днів) зміни коефіцієнтів теплового випромінювання більшості об'єктів сцени є мінімальними а для деяких об'єктів (штучні поверхні, водні об'єкти) є незмінним.

Першим етапом підвищення просторової розрізненості є оцінка субпіксельного зміщення одного зображення відносно іншого, за допомогою опорних текстур із чіткими контурами та високим контрастом відносно інших частин зображення, в результаті якої отримуються значення та напрям зміщення по горизонтальній та вертикальній осях.

Наступний етап – відновлення зображень підвищеної розрізненості у субпікселах  $x_{ij}$   $i = 1 \dots n_x + p - 1$ ,  $j = 1 \dots n_y + q - 1$  по відомих значеннях зображення  $y_{ij}$  в пікселях вхідного набору зображень низької розрізненості, зміщених на  $1/p$  та  $1/q$  частки пікселя вздовж осей  $x$  та  $y$  відповідно. Значення пікселів виражаються через субпіксельні зміщення системою рівнянь:

$$y_{ij} = \sum_{k=1}^{i+p-1} \sum_{l=1}^{j+q-1} x_{kl}, \quad i = 1 \dots n_x, \quad j = 1 \dots n_y. \quad (1)$$

яка складається з  $n_x \times n_y$  рівнянь з  $(n_x + p - 1) \times (n_y + q - 1)$  невідомими. Строгий розв'язок системи (1) знаходиться за рекурентною формулою:

$$x_{ij} = y_{(i-p+1)(j-q+1)} - \sum_{k=i-p+1}^{i-1} \sum_{l=j-q+1}^{j-1} x_{kl} - \sum_{k=i-p+1}^{i-1} x_{kj} - \sum_{l=j-q+1}^{j-1} x_{il}, \quad i = p \dots n_x + p - 1, \quad j = q \dots n_y + q - 1. \quad (2)$$

Щоб запобігти накопиченню шумів, можна застосовувати розв'язок у прямокутному вікні зображення. Для розв'язку застосовується вікно розмірністю  $w \times u$  пікселів низької розрізненості для оцінювання єдиного пікселя підвищеної розрізненості  $x_{ij}$ . Припускаючи, що  $w+p-1$  та  $u+q-1$  є непарними числами, розв'язок  $x_{ij}$  з мінімальною вибірковою дисперсією при  $(w+p-1) \times (u+q-1)$  невідомих може бути знайдено із системи рівнянь:

$$y_{ij} = \sum_{k=i}^{i+p-1} \sum_{l=j}^{j+q-1} x_{kl}, \quad k = i - \frac{(w+p)}{2} - 1 \dots i + \frac{(w-p)}{2}, \quad l = j - \frac{(u+q)}{2} - 1 \dots j + \frac{(u-q)}{2}. \quad (3)$$

Модель відновлення зображення підвищеної просторової розрізненості із включеними шумами можна виразити наступним чином:

$$X = R \times Y + \varepsilon, \quad (4)$$

де  $X$  – зображення підвищеної розрізненості, розгорнуте у вектор,  $Y$  – ряд зображень низької розрізненості, розгорнутих у вектори,  $R$  – матриця оператора пересемплювання,  $\varepsilon$  – вектор похибок [3].

Приклад відновлення зображень підвищеної розрізненості за допомогою субпіксельного зміщення представлено на рис. 1.



Рис. 1. Відновлення зображення підвищеної розрізненості.

Оцінка підвищення якості виконується на основі розрахунку функції передачі модуляції вихідних зображень та результуючого зображення. В оцінку окрім самих зображень включаються параметри польоту знімальної системи: висота знімання (висота орбіти Landsat-8 становить 705 км) та швидкість носія – 7,9 км/с, та параметри сенсорної системи: фокусна відстань оптики – 17,8 мм, час експонування – 7,5 мкс, відносний отвір оптики – 0,61, половина кута огляду – 7,475 градусів та розмір фотоприймального елементу 25 мкм [4]. Для результуючого зображення розмір елементу вказується вдвічі меншим.

Результати оцінки представлено на рис. 2.

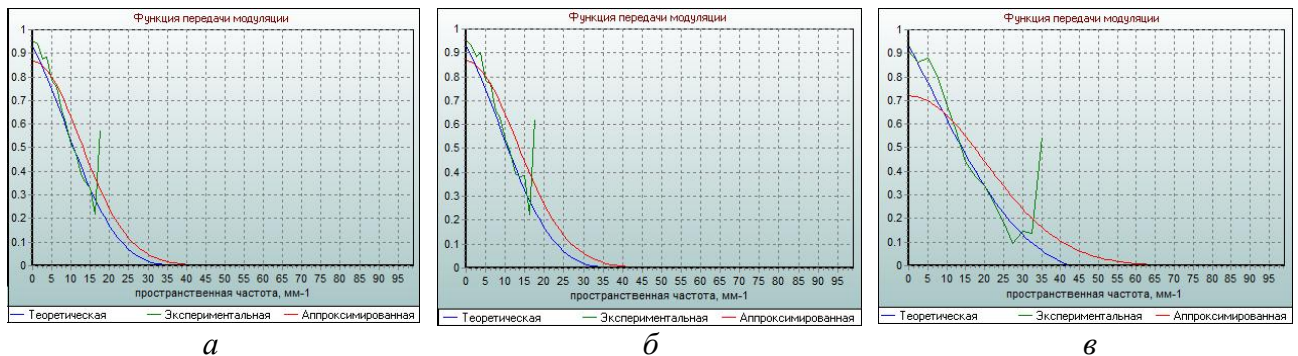


Рис. 2. Функції передавання модуляції зображень.

*a, б* – вхідних зображень, *в* – результуючого після субпіксельної обробки вхідних зображень

Значення ФПМ на рівні 0,3 відповідають розрізненості  $15 \text{ мм}^{-1}$  для зображення рис. 2*a*,  $16 \text{ мм}^{-1}$  – для зображення рис. 2*б* і  $22 \text{ мм}^{-1}$  – для зображення рис. 2*в*. Таким чином, підвищення просторової розрізненості складає 46 %.

В подальшому покращене зображення коефіцієнтів теплового випромінювання застосовується для отримання карт температур на основі даних супутникового теплового знімання, наприклад, зображень сенсора TIRS.

### Література

1. Neumann K.J. Trends for digital aerial mapping cameras // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008.– Vol.XXXVII.– Part B1.– P.551-554.
2. Станкевич С.А. Оцінка точності визначення температури штучних та природних земних поверхонь за результатами інфрачервоного космічного знімання / Станкевич С.А., Пилипчук В. В., Лубський М.С., Крилова Г.Б. // Космічна наука і технологія,– 2016, [У друці].
3. Станкевич С.А. Підвищення просторової розрізненості аерознімання на основі субпіксельної реєстрації зображень / С.А. Станкевич, С.В. Шкляр, М.С. Лубський // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації.– Вип.9(16).– Київ: ДНДІА, 2013.– С.110-117.
4. Reuter, D. C., C. Richardson, J. Irons, et al. 2010. "The Thermal Infrared Sensor on the Landsat Data Continuity Mission." IEEE International Geoscience Remote Sensing Symposium 754-757.