

## ПІДВИЩЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ РОЗРІЗНЕННОСТІ ДИСТАНЦІЙНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

Станкевич С.А., Лубський М.С., Крилова Г.Б.

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України, Україна

E-mail: N.Lubsky@nas.gov.ua

### Spatial Resolution Enhancement of Remote Sensed Imagery of Land Surface Thermal Field

The relevance of thermal infrared data processing strongly depends on spatial resolution. Spatial resolution enhancement needs because the nature of radiation within this infrared range and complexity of acquisition of this data with high detaility. The described technique applies software processing to the pair of land surface thermal field images of low spatial resolution in the frequency domain. This one increased the high-frequency component spatial resolution and improves resulting image detaility.

Застосування сенсорних систем довгохвильового (теплового) інфрачервоного діапазону дозволила значно розширити спектр задач, які можливо вирішити шляхом обробки даних дистанційного зондування. Випромінювання у діапазоні 8-15 мкм яке реєструється як тепло, і сенсори даного діапазону здатні реєструвати інтенсивність теплового потоку від об'єктів земної поверхні та формувати карт теплового поля для вирішення тематичних задач.

Однак, можливість створення детальних карт теплового поля ускладнюється обмеженнями, пов'язаними із значно нижчою енергією квантів випромінювання у порівнянні із видимим та ближнім інфрачервоним діапазоном, як наслідок, результати знімання теплового інфрачервоного діапазону мають значно нижчу просторову розрізненність.

Представлений метод підвищення просторової розрізненності зображень теплового поля включає в себе два етапи. На першому етапі виконується власне розрахунок теплового поля за даними спектральної щільності енергетичної яскравості за допомогою оберненого закону Планка для теплового випромінювання:

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln \left( \frac{\varepsilon c_1}{\lambda^5 L_0} + 1 \right)} \quad (1)$$

де  $T$  – фізична температура поверхні,  $L_0$  – спектральна щільність енергетичної яскравості земної поверхні, яка отримується безпосередньо за даними дистанційного знімання,  $c_1 = 2hc^2 = 1,191 \cdot 10^{-16}$  Вт·м<sup>2</sup> та  $c_2 = \frac{hc}{k} = 1,439 \cdot 10^{-2}$  м·К – перша і друга сталі закону Планка,  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – стала Планка,  $c = 2,998 \cdot 10^8$  м/с – швидкість світла у вакуумі,  $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – стала Больцмана,  $\lambda$  – довжина хвилі електромагнітного випромінювання [1].

Рівняння (1) одночасно містить в собі дві невідомі величини: температуру поверхні та коефіцієнти теплового випромінювання (КТВ). Коефіцієнт

теплого випромінювання – власна, незалежна для кожного типу поверхонь величина, яка визначається як відношення енергії теплового випромінювання “сірого тіла” до випромінювання “абсолютно чорного тіла” при однаковій температурі. В даному випадку “сірим тілом” виступають різні типи покриттів і поверхонь на інфрачервоному зображенні.

Існує велика кількість моделей визначення КТВ, в тому числі за даними знімання у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах. Однією з найбільш уживаних є визначення співвідношення КТВ та вегетаційного індексу NDVI [2] в тому числі і для штучних та інших вільних від рослинності поверхонь, для визначення розподілу КТВ яких застосовуються спектри теплового випромінювання в заданому діапазоні, взяті із зовнішніх джерел, наприклад, ASTER Spectral Library (<https://speclib.jpl.nasa.gov/>).

Визначення КТВ шляхом обробки даних видимого та ближнього інфрачервоного діапазонів дозволяє також значно підвищити деталізацію зображень. Наприклад, одним із найбільш поширених джерел даних теплового космічного знімання є сенсор TIRS на борту супутника Landsat-8, із просторовою розрізненністю 100 м, в той час як дані знімання у видимому та короткохвильовому інфрачервоному діапазоні сенсором OLI мають розрізненність 30 м. Таким чином, до розрахунку температурного поля за даними знімання із просторовою розрізненністю 100 м залучається зображення розподілу КТВ із просторовою розрізненністю 30 м, що значно покращує деталізацію зображення.

На другому етапі підвищення розрізненності застосовуються кілька (зазвичай два) різночасових зображення теплового поля, обробка виконується у два потоки: основний та допоміжний. В основному потоці для вхідних зображень розраховується субпіксельне зміщення одне відносно одного 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. Після оцінки субпіксельного зміщення виконується пересемплювання вхідних температурних полів шляхом черезрядкової розгортки. Пересемплюване поле переводиться у просторово-частотну область та за допомогою смугового фільтра розділяється на високочастотну і середньочастотну компоненти. Середньочастотні компоненти приймаються однаковими для обох відновлюваних полів, за їх граничну частоту приймається частота Найквіста температурних полів низької розрізненності. Паралельно виконується переведення обох вхідних температурних полів у просторово-частотну область дискретним перетворенням Фур'є (ДПФ), спектри яких надалі використовуються як низькочастотні компоненти при деконволюції.

В допоміжному потоці виконується отримання параметрів відновлення температурного поля підвищеної розрізненності методом статистичної регуляризації на основі автоковаріаційних матриць двох вхідних полів та шуму. Для цього вхідні поля центруються і для кожного із них розраховується автоковаріаційна матриця. Автоковаріаційна матриця шуму розраховується як різниця між центрованими температурними полями. Всі отримані

автоковаріаційні матриці за допомогою ДПФ переводиться у просторово-частотну область.

В результаті отримуються окремі Фур'є-спектри як суми частотних компонент: спільної для всіх відновленої високочастотної компоненти (описує розподіл температур дрібних деталей), також спільної для всіх середньочастотної компоненти (відповідає за розподіл коефіцієнта теплового випромінювання), та низькочастотних компонент (описує загальні умови сцени), отриманих для кожного температурного поля низької розрізненності окремо. Застосування оберненого перетворення Фур'є до кожного з цих спектрів забезпечує формування відповідного температурного поля із підвищеною просторовою розрізненністю.

Оцінка функцій передачі модуляції (ФПМ) вхідних та результуючих зображень показала, що підвищення просторової розрізненності при розкладанні вхідних зображень на частотні компоненти може сягати 89%.

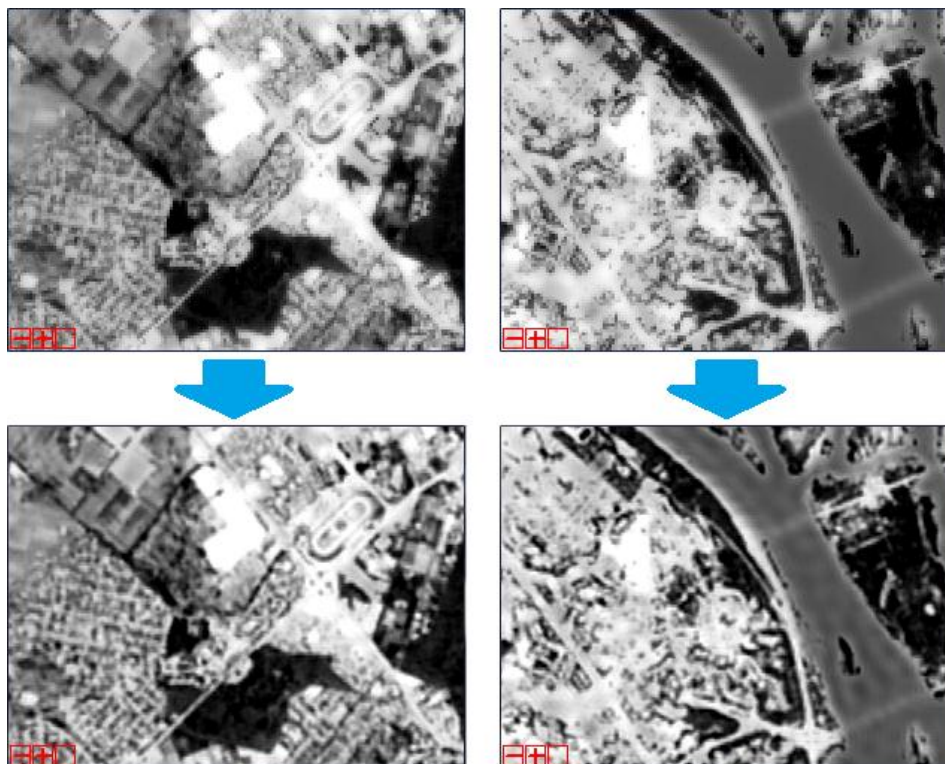


Рис.1. Результати підвищення просторової розрізненності із застосуванням двох різночасових субпіксельно зміщених зображень теплового поля (м. Київ, 13 липня 2016 р.)

### Література

1. Jiménez-Muñoz J.C., A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data / J.C. Jiménez-Muñoz, J.A. Sobrino // *Journal of Geophysical Research*, 108, pp. 4688-4694, 2003.
2. Станкевич С.А. Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизированной территории по материалам тепловой космической съёмки / С.А. Станкевич, В.Е. Филиппович, Н.С. Лубский, А.Б. Крылова, С.Г. Крицук, О.В. Бровкина, В.И. Горный, А.А. Тронин // *Український журнал дистанційного зондування Землі*, № 7, с.14-23, 2015.