



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.3.243>

УДК 528.831.1:621.396.969:004.932.4

Методика підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополаризаційного радару із синтезованою апертурою

А. Р. Лисенко*

ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, вул. Олеся Гончара, 55-Б, Київ, 01054, Україна

Інформативність космічних знімків – невід’ємна складова, яка визначає придатність супутникових даних для вирішення тематичних завдань, а її підвищення є актуальним завданням сьогодення. Радарні засоби дистанційного зондування Землі дають змогу, на противагу оптичним системам, вести знімання за умов хмарності і вночі. В роботі встановлено та описано взаємозв’язок між просторовою розрізненністю зображення та його інформативністю, на основі чого зроблено висновок про доцільність підвищення просторової розрізненності як найважливішої складової інформативності космічного знімка. Для попередньої обробки радарних даних наведено відповідний алгоритм. У статті описується проблематика неузгодженості різнопolarизаційних радарних даних. Застосовуються удосконалені моделі зворотного радарного розсіювання за спеціальною цільовою функцією для перетворення радарних даних в єдиний фізичний показник. Таким показником обрано діелектричну проникність земної поверхні. До перетворених в діелектричну проникність знімків застосовується алгоритм підвищення просторової розрізненності набору субпіксельно зміщених зображень. У результаті отримується просторовий розподіл діелектричної проникності у формі зображення підвищеної розрізненності. Для кількісного оцінювання просторової розрізненності застосовується просторово-частотний аналіз з параметризацією експериментально визначеної перехідної характеристики. Кількісна оцінка просторової розрізненності оброблених реальних двополяризаційних радіолокаційних зображень супутникової системи Sentinel-1 підвищилась на 38,63 %. Описано підхід до підвищення інформативності радарних даних, всі необхідні моделі та алгоритми об’єднано в єдину методику підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополаризаційного радару із синтезованою апертурою.

Ключові слова: радар із синтезованою апертурою (РСА), діелектрична проникність, superresolution, субпіксельна обробка, інформативність, просторова розрізненність, коефіцієнт зворотного радарного розсіювання.

© А. Р. Лисенко. 2023

Вступ

Завдяки нинішнім досягненням в галузях оптики та радіоелектроніки стає можливим вивчення об’єктів не лише у видимих для людського ока спектрах, а й у тих, що наша сенсорна система сприймати нездатна. Це дає змогу отримувати різнобічну широку інформацію про об’єкти дослідження та їх різноманітні властивості. На цій основі, за допомогою зіставлення різношарових даних, були розроблені та надалі розробляються різні алгоритми, методи та методики, що пов’язані з виявленням об’єктів, їх класифікацією, діагностуванням, вимірюванням тощо (He et al., 2018).

Зрозуміло, що для досягнення поставлених перед науковцем цілей важливо отримувати необхідні для вирішення завдання дані належної якості. Часто виникають ситуації, коли характеристики наявних даних є недостатніми для задоволення потреб завдання і тому необхідно покращити їх якість. Важливими характеристиками, що свідчать про якість супутникових зображень, є їх яскравість, контраст, відношення сигнал/шум, а для розв’язання багатьох науково-технічних задач – просторова

розрізненність, яка є комплексним та основним показником здатності розрізнити дрібні деталі на космічних знімках. Таким чином, значення просторової розрізненності напряму впливає на кількість корисної інформації, а отже й інформативність супутникових даних, що використовуються в широкому спектрі розв’язання різних тематичних задач (Fisher et al., 2017).

З уведенням в експлуатацію супутникових радарних знімальних систем стало можливим отримувати дані земних об’єктів не лише в оптичному діапазоні чи малій ділянці короткого мікрохвильового спектра, а й на менших частотах електромагнітного випромінювання. Разом з тим, завдяки більшій довжині хвилі діапазонів радарного зондування, радіолокаційним даним не притаманні деякі недоліки оптичних знімальних систем: обмежене або неможливе зондування в умовах значної хмарності та нічної пори доби.

Інформативність супутникових даних відіграє значну роль у можливостях їх застосування. Підвищення інформативності залежить від різних факторів, таких як: інформативність самих зображень (Станкевич, 2006), методів обробки радарних даних (Rukhovich et al., 2022) та методів

*E-mail: artur.r.lysenko@gmail.com

підвищення інформативності радарних даних, наприклад, завдяки підвищенню їх просторової розрізненності (Stankevich et al., 2016).

Інформативність супутникових зображень добре досліджена різними науковцями (Кононов, 1991; Попов, Станкевич, 2006) і, зазвичай, поділяється на дві основні складові: інформаційна ємність та інформативність у розв'язанні конкретної задачі (Станкевич, 2008). Одним із вагомих показників при кількісному оцінюванні інформативності супутникових зображень є просторова розрізненність (Amgo et al., 2011). Отже, підняття просторової розрізненності нерозривно пов'язано з підвищенням інформативності супутникового зображення. Окрім розрізненності, інформативність космічних зображень визначається також радіометричними (спектральними) відмінностями (контрастами) та відношенням сигнал/шум у зображенні (Кононов, Федоровский, 1996).

Матеріали і методи дослідження

Моделі зворотного радарного розсіювання

На сьогодні в дистанційному зондуванні Землі широко застосовується кілька різних моделей зворотного розсіювання радарного випромінювання, відбитого від земної поверхні. Серед них найбільш вживані: модель Оха (Oh et al., 1992), модель Дюбуа (Dubois et al., 1995), модель інтегрального рівняння (Fung et al., 1992). Всі ці моделі можуть застосовуватися для перетворення зворотного розсіювання на діелектричну проникність (Stankevich et al., 2020a).

Ох запропонував свою початкову емпіричну модель зворотного розсіювання у 1992 році:

$$q \square \frac{\sigma_{vh}^0}{\sigma_{vv}^0} = 0.23 \sqrt{\Gamma_0} [1 - e^{-ks}], \quad (1)$$

де Γ_0 – це Френелівське відбиття від земної поверхні в надирі, σ_{vh}^0 – коефіцієнт зворотного розсіювання при поляризації vh (вертикально поляризована випромінювана електромагнітна хвиля та горизонтально поляризована приймальна антена на супутнику), σ_{vv}^0 – коефіцієнт зворотного розсіювання при поляризації vv), k – хвильове число, s – середньоквадратичне значення перепадів висот поверхні (шорсткість земної поверхні).

Модель Оха є оптимізованою для таких діапазонів значень:

$$\begin{aligned} 0.13 \leq ks \leq 6.98, \\ 4 \leq m_v \leq 29.1 \text{ (відносна вологість ґрунту, \%)}, \\ 10^\circ \leq \theta \leq 70^\circ, \end{aligned} \quad (2)$$

де θ – кут падіння електромагнітної хвилі в радіанах.

Модель підвищення та оцінювання просторової розрізненності

Модель підвищення просторової розрізненності супутникового зображення складається з оцінки цілопикселного зсуву зображень, оцінки субпикселного зсуву зображень та відновлення зображення підвищеної розрізненності (Stankevich et al., 2020б).

Фактична просторова розрізненність супутникового зображення описується двовимірною функцією розсіювання точки (ФРТ), яка є аналогом передавальної функції в теорії автоматичного управління для зображувальних систем (Holst, 2011).

Гауссова апроксимація двоспрямованої функції розсіювання точки цифрового зображення повністю визначається двома параметрами, що є Гауссовими константами σ та ζ вздовж горизонтальної та вертикальної осей зображення (Stankevich, 2020):

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma \cdot \zeta} \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{y^2}{2\zeta^2}}, \quad (3)$$

де $h(x, y)$ – це передавальна функція точки або функція розсіювання точки.

При відомих значеннях параметрів Гауссової апроксимації рівняння двоспрямованої функції передавання модуляції (ФПМ) як результат перетворення Фур'є від $h(x, y)$ набуває вигляду:

$$T(\xi, \eta) = |F\{h(x, y)\}| = e^{-2\pi^2 \cdot \sigma^2 \cdot \xi^2} \cdot e^{-2\pi^2 \cdot \zeta^2 \cdot \eta^2},$$

де $F\{\cdot\}$ – оператор перетворення Фур'є.

Просторова розрізненність може бути обчислена як просторова частота в точці, де ФПМ знижується до задалегідь відомого порогового значення модуляції, за такими формулами:

$$\begin{aligned} r_x = \frac{1}{\xi^*} = \sqrt{-\frac{2\pi^2 \cdot \sigma^2}{\ln K}}, \\ r_y = \frac{1}{\eta^*} = \sqrt{-\frac{2\pi^2 \cdot \zeta^2}{\ln K}}, \end{aligned} \quad (4)$$

де $K = T^*(\xi, \eta)$ – порогове значення модуляції.

Як випливає з (3), просторова розрізненність визначається окремо для горизонтального та вертикального напрямків зображення. Між тим, зображення прийнято характеризувати ізотропною просторовою розрізненністю (Stankevich et al., 2021), яка може бути виражена такою формулою (Кононов, Тепляков, 1968):

$$r = \sqrt{r_x \cdot r_y}. \quad (5)$$

Зв'язок просторової розрізненності з інформативністю

Просторова розрізненність супутникових знімків безпосередньо пов'язана з їх інформативністю (Solomon, Breckon, 2011; Кононов, 2002; Кононов, Станкевич, 2004).

Узагальнена інформативність зображення C визначається формулою:

$$C \cong \frac{D}{4r^2} \log_2(1 + \psi), \quad (6)$$

де D – взаємна інформація Кульбака–Лейблера між імовірнісними розподілами спектральних сигналів об'єкта і фону, r – просторова розрізненність, ψ – відношення сигнал/шум (Станкевич, 2006).

Обробка радіолокаційних даних

Радіолокаційні супутникові дані спершу потрібно обробити, щоб перетворити комплексні значення зареєстрованого радіолокаційного сигналу на фізично коректні величини зворотного розсіювання в кожному каналі поляризації, а також прибрати різні

похибки вимірювань, які могли виникнути під час знімання, такі як: похибки даних про знімальну орбіту, тепловий, сигнальний та спекл шуми, геометричні викривлення та інші. Типовий алгоритм попередньої обробки супутникових даних радіолокаційного знімання наведено на Рис. 1.



Рис. 1. Алгоритм попередньої обробки супутникових радарних даних

Перетворення різнополяризаційних даних в єдиний фізичний показник

На відміну від оптичних знімків радіолокаційні дані, що отримані за допомогою багатополіризаційного радара в різних режимах знімання, таких як різні поляризації випромінюваного радаром імпульсу чи різні поляризації прийнятої складової зворотного розсіяного сигналу, за своєю природою відображають різні аспекти одних і тих самих об'єктів на земній поверхні. А відтак, такі дані не можуть бути інтерпретованими в один і той самий спосіб та не можуть бути оброблені разом. Для розв'язання цієї проблеми потрібно перетворити різнополяризаційні радарні дані в єдину фізичну обґрунтовану величину, що дасть змогу надалі поєднати ці дані з метою покращення їх якості.

Алгоритм зведення різнополяризаційних радарних даних в єдиний фізичний показник описується схемою, наведеною на Рис. 2.

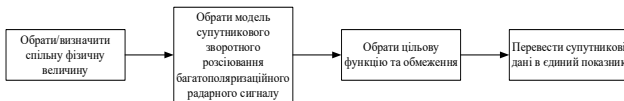


Рис. 2. Схема алгоритму зведення різнополяризаційних радарних супутникових даних в єдиний фізичний показник

Після вибору моделі зворотного радарного розсіявання, потрібно визначити цільову функцію для зведення різнополяризаційних радарних даних в єдиний фізичний показник. Вибір цільової функції та її обмежень залежить як від моделі, що обрана для перетворення супутникових радарних даних, так і від обраного фізичного показника, в який радарні дані перетворюються. Наприклад, для діелектричної проникності справедливим є те, що її показники для ґрунтів становлять, зазвичай, не менше 2.7 (Mohan et al., 2015), а максимальне значення може бути обмежене 30 для аграрних гомогенних ділянок з відносною вологістю ґрунту $m_v \leq 30\%$ (Xu et al., 2022). Шорсткість земної поверхні не має сенсу розглядати більше, аніж на величину половини довжини хвилі радарного випромінювання, бо для не надто зволжених ґрунтів це є середнім значенням глибини проникності електромагнітної хвилі (Li et al., 2018). Для поточних моделей зворотного розсіявання справедливою буде така модель цільової функції та її обмежень:

$$\sum_{i=1}^N \left| \sigma_i^0 - \sigma_i^{\text{mod}}(p_i, Z) \right|^2 \rightarrow \min, \quad \max_{i,j} |p_i - p_j| < \epsilon, \quad 0.001 \leq s \leq \frac{\lambda}{2}, \quad (7)$$

де σ_i^0 – значення коефіцієнта зворотного розсіявання в i -ї поляризації, ϵ – задана похибка максимальної різниці між значеннями показника в різних поляризаціях, s – шорсткість земної поверхні, λ – довжина хвилі електромагнітного випромінювання багатополіризаційного радара, $\sigma_i^{\text{mod}}(p_i, Z)$ – значення зворотного розсіявання модельоване використовуюваною моделлю, p_i – значення показника, в який перетворюються радарні дані (діелектрична проникність).

Методика підвищення інформативності

Методика підвищення інформативності космічних знімків об'єднана в послідовний логічний ланцюг застосування попередньо розглянутих моделей та алгоритмів з можливістю адаптації до різних задач, за умови наявності відповідних моделей та необхідних додаткових даних. Схема операцій методики наведена на Рис. 3.



Рис. 3. Схема операцій методики підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополіризаційного радара із синтезованою апертурою

Результати

Для демонстрації роботи методики, досліджувану ділянкою обрано невелике аграрне поле біля міста Біла Церква, зображення якого отримано 8 серпня 2020 року двополяризаційним радаром із синтезованою апертурою SAR-C, встановленим на європейському супутнику дистанційного зондування Землі Sentinel-1B. Додатково тестова ділянка контролювалася багатоспектральним зображенням оптичного знімального приладу MSI, встановленого на іншому європейському супутнику дистанційного зондування Землі Sentinel-2A, одержаним 15 серпня того ж року.

Результат попередньої обробки радіолокаційних та оптичних супутникових даних наведено на Рис. 4.

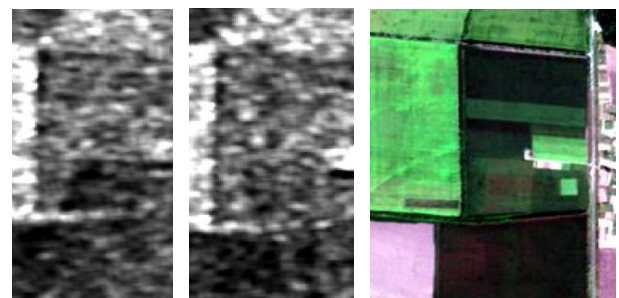


Рис. 4. Вхідні попередньо оброблені супутникові зображення: а – Sentinel-1B, поляризація VV, б – Sentinel-1B, поляризація VH, в – Sentinel-2A, оптичне зображення в умовних кольорах

Результат перетворення радіолокаційних даних в діелектричну проникність земної поверхні показано на Рис. 5.

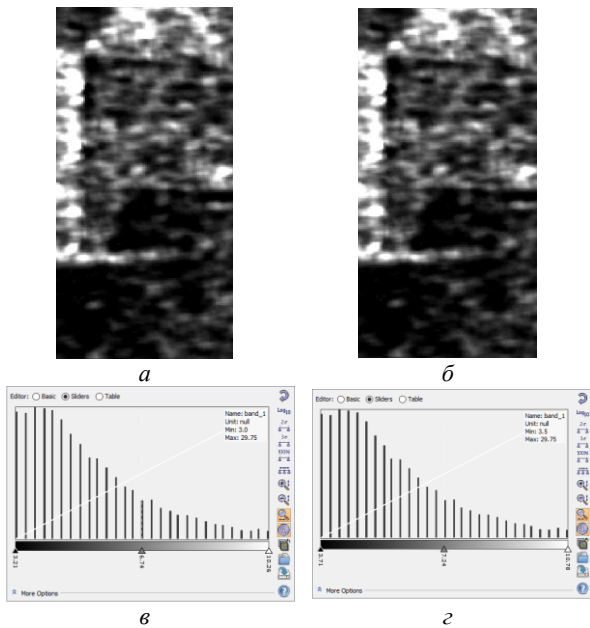


Рис. 5. Розподіли діелектричної проникності земної поверхні: *а* – в поляризації VV, *б* – у поляризації VH та гістограми діелектричної проникності: *в* – у поляризації VV, *г* – у поляризації VH

Схожість гістограм діелектричної проникності, відновленої за радарними даними в різних поляризаціях, свідчить про адекватність застосованої моделі. До отриманих карт діелектричної проникності вже стає коректним застосування алгоритму надрозрізненності (Stankevich et al., 2019).

Результати підвищення просторової розрізненності розподілу діелектричної проникності наведено на рис. 6.

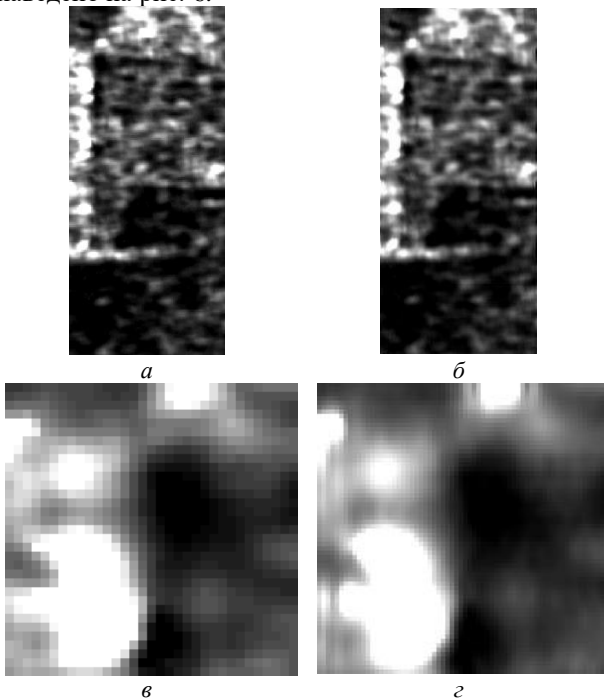


Рис. 6. Порівняння розподілів діелектричної проникності земної поверхні: *а* – низької розрізненності, *б* – підвищеної розрізненності; *в* і *г* – збільшені фрагменти зображень *а* і *б*

У Табл. 1 зведено результати експериментального оцінювання фактичної піксельної просторової розрізненності вхідного та покращеного розподілів діелектричної проникності за допомогою просторово-частотного аналізу відповідних зображень.

Таблиця 1. Оцінка значень фактичної просторової розрізненності зображень

Розподіл діелектричної проникності	у поляризації VV	у поляризації VH	підвищена за двома поляризаціями
Піксельна ізотропна просторова розрізненність	2,846	2,821	4,068

Підвищення просторової розрізненності підраховується як відношення вхідної та вихідної розрізненностей з урахуванням кратності розміру пікселів: $\frac{2,834 \times 2}{4,068} = 1,393$; тобто просторова

розрізненність покращилася на 39,3 %. Відповідно, приріст інформативності можна оцінити за (6):

$$\text{Підвищення інформативності} = \frac{(2 \cdot r_{low})^2}{r_{enhanced}^2} = 1,9401,$$

Тобто інформативність була підвищена на 94.01%.

Висновки

Отже, запропоновано цілісну методику підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополізаційного радара із синтезованою апертурою. Методика забезпечує підвищення просторової розрізненності вихідного радіолокаційного зображення за рахунок спільної субпіксельної обробки кількох вхідних зображень, отриманих в кожній поляризації окремо та приведених до єдиної фізичної величини, притаманної земній поверхні – діелектричної проникності. В результаті такого перетворення можна коректно застосувати раніше розроблені для оптичних зображень алгоритми надрозрізненності до сукупності різнополяризаційних радіолокаційних зображень. Методика припускає застосування будь-якої моделі зворотного розсіювання радіолокаційного сигналу; більш того, при наявності адекватних та точних моделей методику можна використовувати, не залучаючи дані наземних вимірювань.

Розроблену методику експериментально перевірено на реальному двополяризаційному радіолокаційному зображенні, отриманому Європейською супутниковою системою Sentinel-1. Відкалібровані значення відносних коефіцієнтів зворотного розсіювання в обох поляризаціях перетворено на розподіли діелектричної проникності земної поверхні, до яких спільно застосовано алгоритм надрозрізненності. Оцінка фактичної піксельної просторової розрізненності продемонструвала 39 % покращення, в той час, як інформативність була покращена на 94.01%, що є цілком прийнятним результатом. Отже, розроблену методику можна рекомендувати для практичної обробки

багатополяризаційних радіолокаційних супутникових зображень.

Подальші дослідження слід спрямувати на покращення продуктивності використовуваних у методиці алгоритмів обробки радарних даних, а також на поширення моделей перетворення каліброваних радіолокаційних сигналів на фізичні характеристики земної поверхні у випадках порушення дифузності відбиття, зокрема при радіолокаційному зніманні антропогенних об'єктів.

Література

- Кононов, В. И., Тепляков, Н. А. (1968). *Лекции по теории систем, создающих изображения*. Киев: КВВИАУ.
- Кононов, В. И. (2002). Обоснование методики определения разрешения на местности аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками. *Космична наука і технологія*, 8(2/3), 91–102.
- Кононов, В. И., Станкевич, С. А. (2004). Сравнительная оценка информативности цифровых аэрокосмических изображений высокого и низкого разрешения. *Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского*, 17(2), 88–95.
- Попов, М. А., Станкевич, С. А. (2006). Методы оптимизации числа спектральных каналов в задачах обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. Москва: ИКИ РАН, 1, 106–112.
- Станкевич, С. А. (2006). Імовірісно-частотна оцінка еквівалентної просторової розрізненості багато-спектральних аерокосмічних знімків. *Космична наука і технологія*, 12(2/3), 79–82.
- Amro, I., Mateos, J., Vega, M., Molina, R., Katsaggelos, A. K. (2011). A survey of classical methods and new trends in pansharpening of multispectral images. 2011(1). <https://doi.org/10.1186/1687-6180-2011-79>.
- Dubois, P. C., van Zyl, J., Engman, T. (1995). Measuring soil moisture with imaging radars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(4), 915–926. <https://doi.org/10.1109/36.406677>.
- Fisher, J. R. B., Acosta, E. A., Dennedy-Frank, P. J., Kroeger, T., Boucher, T. M. (2017). Impact of satellite imagery spatial resolution on land use classification accuracy and modeled water quality. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 4(2), 137–149. <https://doi.org/10.1002/rse2.61>.
- Fung, A. K., Li, Z. B., Chen, K. F. (1992). Backscattering from a randomly rough dielectric surface. 30(2), 356–369. <https://doi.org/10.1109/36.134085>.
- He, N., Fang, L., Li, S., Plaza, A., Plaza, J. (2018). Remote Sensing Scene Classification Using Multilayer Stacked Covariance Pooling. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(12), 6899–6910. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2018.2845668>.
- Holst, G. C. (2011). Imaging system fundamentals. *Optical Engineering*, 50(5), 052601. <https://doi.org/10.1117/1.3570681>.
- Li, F., Peng, X., Chen, X., Liu, M., Xu, L. (2018). Analysis of Key Issues on GNSS-R Soil Moisture Retrieval Based on Different Antenna Patterns. *Sensors*, 18(8), 2498. <https://doi.org/10.3390/s18082498>.
- Mohan, R. R., Paul, B., Mridula, S., Mohanan, P. (2015). Measurement of Soil Moisture Content at Microwave Frequencies. *Procedia Computer Science*, 46, 1238–1245. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.01.040>.
- Oh, Y. D., Kamal Sarabandi, Ulaby, F. T. (1992). An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2), 370–381. <https://doi.org/10.1109/36.134086>.

- Solomon, C., Breckon, T. (2011). *Fundamentals of Digital Image Processing*. John Wiley & Sons.
- Stankevich, S. A. (2008). Informativity of Earth remote sensing optical bands: practical algorithms. *Космична наука і технологія*, 14(2), 22–27. <https://doi.org/10.15407/knit2008.02.022>.
- Stankevich, S. A. (2020). Evaluation of the Spatial Resolution of Digital Aerospace Image by the Bidirectional Point Spread Function Parameterization. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 317–327. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_31
- Stankevich, S. A., Lubskeyi, M. S., Lysenko, A. R. (2021). Long-wave infrared remote sensing data spatial resolution enhancement using modulation transfer function fusion approach. *2021 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*, 89–94. <https://doi.org/10.1109/IDT52577.2021.9497630>.
- Stankevich, S. A., Piestova, I. O., Lysenko, A. R. (2020a). Radar Data Product Superresolution under Parameter Variation. *Central European Researchers Journal*, 6(2), 8–13. https://ceres-journal.eu/download.php?file=2020_02_02.pdf.
- Stankevich, S., Popov, M., Shklyar, S., Sukhanov, K., Andreiev, A., Lysenko, A., Kun, X., Shixiang, C., Yupan, S., Xing, Z., & Boya, S. (2020b). Subpixel-shifted Satellite Images Superresolution: Software Implementation. *Wseas Transactions on Computers*, 19, 31–37. <https://doi.org/10.37394/23205.2020.19.5>.
- Stankevich, S., Piestova, I., Shklyar, S., Lysenko, A. (2019). Physically constrained SAR data superresolution. Proceedings of the 14th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT 2019). Lviv: IEEE, 228–231. <https://doi.org/10.1109/stc-csit.2019.8929833>.
- Xu, X., Wang, H., Qu, X.-P., Li, C., Cai, B., & PENG, G. (2022). Study on the dielectric properties and dielectric constant model of laterite. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1035692>.

References

- Amro, I., Mateos, J., Vega, M., Molina, R., Katsaggelos, A. K. (2011). A survey of classical methods and new trends in pansharpening of multispectral images. 2011(1). <https://doi.org/10.1186/1687-6180-2011-79>.
- Dubois, P. C., van Zyl, J., Engman, T. (1995). Measuring soil moisture with imaging radars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(4), 915–926. <https://doi.org/10.1109/36.406677>.
- Fisher, J. R. B., Acosta, E. A., Dennedy-Frank, P. J., Kroeger, T., Boucher, T. M. (2017). Impact of satellite imagery spatial resolution on land use classification accuracy and modeled water quality. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 4(2), 137–149. <https://doi.org/10.1002/rse2.61>.
- Fung, A. K., Li, Z. B., Chen, K. F. (1992). Backscattering from a randomly rough dielectric surface. 30(2), 356–369. <https://doi.org/10.1109/36.134085>.
- He, N., Fang, L., Li, S., Plaza, A., Plaza, J. (2018). Remote Sensing Scene Classification Using Multilayer Stacked Covariance Pooling. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(12), 6899–6910. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2018.2845668>.
- Holst, G. C. (2011). Imaging system fundamentals. *Optical Engineering*, 50(5), 052601. <https://doi.org/10.1117/1.3570681>.
- Kononov, V. I., Teplyakov, N. A. (1968). *Lectures on the theory of image-creating systems*. Kyiv: Kyiv Higher Military Aviation Engineering School. (in Russian).
- Kononov, V. I. (2002). Justification of the method of determining the clearance on the terrain of aerospace systems with discrete photodetectors. *Space science and technology*, 8(2/3), 91–102. (in Russian).

- Kononov, V. I., Stankevich, S. A. (2004). Comparative assessment of the informativeness of digital aerospace images of high and low resolution. *Scholarly notes of the Tavrichesky National University named after B. I. Vernadskyi*, 17(2), 88–95. (in Russian).
- Li, F., Peng, X., Chen, X., Liu, M., Xu, L. (2018). Analysis of Key Issues on GNSS-R Soil Moisture Retrieval Based on Different Antenna Patterns. *Sensors*, 18(8), 2498. <https://doi.org/10.3390/s18082498>.
- Mohan, R. R., Paul, B., Mridula, S., Mohanan, P. (2015). Measurement of Soil Moisture Content at Microwave Frequencies. *Procedia Computer Science*, 46, 1238–1245. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.01.040>.
- Oh, Y. D., Kamal Sarabandi, Ulaby, F. T. (1992). An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2), 370–381. <https://doi.org/10.1109/36.134086>.
- Popov, M. A., Stankevich, S. A. (2006). Methods for Optimizing the Number of Spectral Channels in Problems of Processing and Analysis of Earth Remote Sensing Data. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. Moscow: Institute of Space Research of the Russian Academy of Sciences, 1, 106–112. (in Russian).
- Solomon, C., Breckon, T. (2011). *Fundamentals of Digital Image Processing*. John Wiley & Sons.
- Stankevich, S. A. (2008). Informativity of Earth remote sensing optical bands: practical algorithms. *Space science and technology*, 14(2), 22–27. <https://doi.org/10.15407/knit2008.02.022> (in Russian).
- Stankevich, S. A., Piestova, I. O., Lysenko, A. R. (2020a). Radar Data Product Superresolution under Parameter Variation. *Central European Researchers Journal*, 6(2), 8–13. https://ceres-journal.eu/download.php?file=2020_02_02.pdf.
- Stankevich, S., Popov, M., Shklyar, S., Sukhanov, K., Andreiev, A., Lysenko, A., Kun, X., Shixiang, C., Yupan, S., Xing, Z., & Boya, S. (2020b). Subpixel-shifted Satellite Images Superresolution: Software Implementation. *Wseas Transactions on Computers*, 19, 31–37. <https://doi.org/10.37394/23205.2020.19.5>.
- Stankevich, S. A. (2020). Evaluation of the Spatial Resolution of Digital Aerospace Image by the Bidirectional Point Spread Function Parameterization. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 317–327. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_31.
- Stankevich, S. A., Lubskeyi, M. S., Lysenko, A. R. (2021). Long-wave infrared remote sensing data spatial resolution enhancement using modulation transfer function fusion approach. *2021 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*, 89–94. <https://doi.org/10.1109/IDT52577.2021.9497630>.
- Stankevich, S. A. (2006). Probability-frequency estimation of the equivalent spatial resolution of multispectral aerospace images. *Space science and technology*, 12(2/3), 79–82. (in Ukrainian).
- Stankevich, S., Piestova, I., Shklyar, S., Lysenko, A. (2019). Physically constrained SAR data superresolution. Proceedings of the 14th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT 2019). Lviv: IEEE, 228–231. <https://doi.org/10.1109/stc-csit.2019.8929833>.
- Xu, X., Wang, H., Qu, X.-P., Li, C., Cai, B., & Peng, G. (2022). Study on the dielectric properties and dielectric constant model of laterite. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1035692>.

SYNTHETIC-APERTURE MULTI-POLARIZATION RADAR DATA INFORMATIVITY ENHANCEMENT TECHNIQUE

A. R. Lysenko

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, Olesia Honchara Str., 55-b, Kyiv, 01054, Ukraine

The informativeness of satellite images is an integral component that determines the ability of satellite data for solving thematic problems, and its improvement is a relevant task nowadays. Radar tools of remote sensing of the Earth allow, in contrast to optical systems, to remotely sense data in cloudy conditions and at night. The paper established and described the relationship between the spatial resolution of the image and its informativity, which led to a decision of increasing the spatial resolution parameter in order to increase the informativity of the satellite image. For data preprocessing a corresponding algorithm is given. The article describes the problem of inconsistency of different polarization radar data. Improved radar backscatter models are used, using the developed special objective function model, to transform radar data into a single physical property. The dielectric constant of the Earth's surface was chosen as such property. A model and algorithm for subpixel-shifted images spatial resolution enhancement were applied to the images converted to dielectric permittivity. As a result, a spatial distribution of the dielectric constant in a form of an image with increased spatial resolution was obtained. For quantitative assessment of the spatial resolution the spatial-frequency analysis with parameterization of the experimentally determined transient characteristic is used. Quantitative assessment of preprocessed real two-polarization mode radar images, obtained from Sentinel-1, spatial resolution enhancement showed a 38.63% gain. The described approach for radar data informativity enhancement, as well as all necessary models and algorithms, were combined into a single adaptive Synthetic-aperture multi-polarization radar data informativity enhancement technique.

Keywords: synthetic-aperture radar (SAR), dielectric permittivity, superresolution, subpixel processing, informativity, spatial resolution, radar backscattering coefficient

*Рукопис статті отримано 29.08.2023
Надходження остаточної версії: 08.09.2023
Публікація статті: 29.09.2023*