Державна установа “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України”

Державна установа “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України”

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

УДК 528.831.1:621.396.969:004.932.4(043)

ЛИСЕНКО АРТУР РОСТИСЛАВОВИЧ

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИКА ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ, ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ БАГАТОПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО РАДАРУ З СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ

172 – Телекомунікації та радіотехніка
17 – Електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Лисенко А. Р.

Науковий керівник Станкевич Сергій Арсенійович, доктор технічних наук, професор

Київ – 2023

АНОТАЦІЯ

Лисенко А.Р. Методика підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.
Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка (17 – Електроніка і телекомунікації). Державна установа "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України", м. Київ, 2023.

У сучасному світі мікро-, макроекономіки постає необхідність контролю, оцінки, прогнозування ризиків, стану, результатів тощо. Для забезпечення таких потреб вкрай необхідним є залучення великих обсягів відповідних даних. Завдяки сьогоденному супутниковому покриттю та методам дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) стає можливим отримання даних про земні об'єкти, практично, з будь-якої ділянки земної поверхні як у великих масштабах, так і в короткі терміни.

Дані дистанційного зондування Землі широко використовуються у сільському господарстві (для оцінки стану рослинності та прогнозування врожаю, оцінки зволоженості ґрунту, ерозії ґрунту тощо), геодезії (для побудови карт, визначення зміщень ґрунту і т.д.), моніторингу океану (у тому числі і відслідковування нелегальних суден в різних акваторіях), визначення складу слоїв атмосфери та іншому.

Важливою якісною характеристикою даних дистанційного зондування Землі є їх інформативність, яка відповідає за кількість корисної інформації для вирішення конкретної тематичної задачі. А тому, для різних задач цей параметр є різним. Враховуючи лише зростаючі потреби у більш якісних даних для отримання більш точних результатів, підвищення інформативності супутникових зображень є актуальною задачею нинішнього часу.

Об'єктивним загальним параметром якості даних ДЗЗ є просторова розрізненність, яка дозволяє виразити кількісно, наскільки добре розрізняються

окремі об’єкти заданого розміру на зображенні. Отже, просторова розрізненність безпосередньо впливає на інформативність зображення незалежно від задач, для яких інформативність розглядається.

Окрему ланку в дистанційному зондуванні Землі посідають радіолокаційні зображення. Це доволі ефективний засіб спостереження Землі із космосу, який динамічно розвивається та все ширше застосовується. На противагу оптичним знімальним системам, радіолокаційні дозволяють вести знімання земної поверхні як в умовах хмарності, так і нічну пору доби, а оперують у радіохвильовому діапазоні, що дозволяє отримувати дані дещо іншої фізичної природи. Фізична відмінність принципу роботи радарних сенсорів, порівняно з класичними оптичними, вимагає відповідних засобів обробки їх даних: розробку нових алгоритмів, методів та методик.

Отже, ***метою*** цієї роботи є підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою (РСА), шляхом використання сучасних наукових напрацювань для розробки відповідної методики.

Для досягнення заданої мети передбачено виконання кількох наукових завдань, першим з яких постав аналіз існуючих методів підвищення інформативності супутникових зображень, та встановлення взаємозв’язку інформативності з просторовою розрізненністю.

В якості радіолокаційних даних з синтезованою апертурою було обрано знімки отримані з сузір’я супутників радіолокаційної системи Sentinel-1. Так як даний супутник надає дані в одразу двох поляризаціях, одна з яких збігається у випромінюваному та приймальному режимах поляризацій електромагнітного імпульсу, а інша містить міжполяризаційну складову, то для подолання проблем неузгодженості та різнорідності даних було розроблено моделі супутникового зворотного розсіювання радарного сигналу з подальшим їх використанням в алгоритмі зведення різнополяризаційних даних в спільну фізичну величину – діелектричну проникність земної поверхні.

Для вибору моделі зворотного розсіювання було розроблено відповідний алгоритм, який базується на фізичній узгодженості різнополяризаційних даних з урахуванням обмежень самих моделей.

З метою підвищення просторової розрізненності було розроблено математичну модель синтезу супутникових зображень з низькою просторовою розрізненністю у єдине двократно збільшене зображення підвищеної просторової розрізненності та відповідний алгоритм, що її реалізує.

Для забезпечення надрозрізненності використовуючи часову затримку між послідовним прийняттям та надсиланням різних імпульсів бортовим радаром супутника Sentinel-1 у режимах vv та vh (тут перша буква позначення режиму позначає поляризацію згенерованого імпульсу, а друга – поляризацію приймальної складової розсіяного в зворотному напрямку сигналі), була розроблена математична модель та алгоритм оцінки субпіксельних зміщень між парою зображень.

Враховуючи той факт, що супутникові радіолокаційні дані обов'язково потребують попередньої обробки, було розроблено відповідний алгоритм обробки даних, який відповідає потребам розробленої методики. В подальшому, вхідні дані були оброблені згідно з цим алгоритмом.

Враховуючи специфіку радарних даних Sentinel-1, відповідно до алгоритму вибору моделі зворотного розсіювання, базовою робочою моделлю було обрано відому модель Oxa 1992 року, як така, що забезпечена всіма необхідними вхідними даними та пристосована для аналізу міжполяризаційних сигналів.

В подальшому перетворені на синтетичну діелектричну проникність радарні дані використовуються як вхідні дані низької просторової розрізненності в розробленому алгоритмі підвищення просторової розрізненності супутникових зображень. Результатом застосування алгоритму є відновлене зображення синтетичної діелектричної проникності підвищеної розрізненності.

Оцінка досягнутого результату – підвищення інформативності радарних даних – була проведена кількісно порівнянням фактичних просторових розрізненностей вхідних та вихідного зображень. В свою чергу фактичні

просторові розрізненності оцінювалися методами просторово-частотного аналізу через апроксимовані функції передачі модуляції (ФПМ) цифрових зображень.

Тестування методики було проведено обробкою 31 двополяризаційного радіолокаційного зображення супутникової системи Sentinel-1 згідно із запропонованою методикою. Усереднене підвищення інформативності в результаті обробки склало 85.4 %.

В ході тестування методики було виявлено обмеженість моделі Оха до моделювання великих значень сигналу зворотного радарного розсіювання – для яких величина нормованого коефіцієнта зворотного розсіяння σ_{vv}^{0} перевищує 0,6. Це, як правило, призводить до неможливості значного підвищенні інформативності зображень сцен, де присутні багато об'єктів з великими значеннями σ_{vv}^{0}. В основному, переважна частина таких об'єктів є антропогенними, часто металевими, з плоскими гранями, нормальними одна до одної, що у сукупності утворюють своєрідні куткові радіолокаційні відбивачі.

Запропоновано ітераційну модифікацію методики, що стало можливим внаслідок швидкої збіжності процесу прямого-оберненого моделювання відбитого радіолокаційного сигналу, де нульова ітерація відповідає реально зареєстрованим значенням радарного зворотного розсіяння в різних поляризаціях.

В кінці роботи наведено рекомендації щодо можливого застосування розробленої методики, та по її впровадженню у вигляді хмарного web-сервісу, що відповідає обчислювальним потребам методики. Також сформульовано перспективні напрямки подальших досліджень.

Наукова новизна

Вперше розроблено методику підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою. Методика забезпечує підвищення просторової розрізненності вихідного радіолокаційного зображення за рахунок спільної субпіксельної обробки кількох вхідних зображень, отриманих в кожній поляризації окремо та переведених до єдиної фізичної величини, притаманної земної поверхні – діелектричної проникності, шорсткості, вологовмісту та таке інше. В результаті такого

перетворення стає можливим коректно застосувати алгоритм надрозрізненності до сукупності різнополяризаційних радіолокаційних зображень.

Удосконалено модель перетворення різнополяризаційних радарних даних в діелектричну проникність земної поверхні шляхом накладання фізично обумовлених обмежень цільової величини та застосування ітераційного прямого-оберненого моделювання відбитого радіолокаційного сигналу.

Удосконалено алгоритм відновлення спільного зображення субпіксельної розрізненності із набору супутникових знімків за рахунок його адаптації до радіолокаційних даних, яка полягає в застосуванні додаткової спекл-фільтрації безпосередньо в частотній області, де виконується і вся інша обробка.

Практична значимість

За результатами експериментального тестування на багатьох реальних двополяризаційних радарних зображеннях розроблена методика забезпечила, в середньому, підвищення інформативності на 85.4 %. Окрім власне підвищення інформативності матеріалів багатополяризаційного радарного знімання запропонована методика забезпечує відтворення просторового розподілу цільової фізичної характеристики земної поверхні підвищеної розрізненності, що відповідає сучасній концепції ARD (analysis-ready data), яка передбачає отримання з сирих супутникових даних карт фізичних/біофізичних параметрів земної поверхні, зрозумілих фахівцям з тематичних наземних досліджень.

Розроблену методику можна застосовувати для таких тематичних задач спостереження Землі як екологічний моніторинг, геофізичне картування, пошук корисних копалин, прогнозування деградації земель, дослідження кліматичних змін тощо.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), супутникові дані, радар із синтезованою апертурою (РСА), коефіцієнт зворотного розсіювання, діелектрична проникність, надрозрізненність (superresolution), субпіксельна обробка

ABSTRACT

Lysenko A.R. Synthetic-aperture multi-polarization radar data informativity enhancement technique.

Dissertation for the Doctor of Philosophy degree (PhD) with a speciality in 172 – Telecommunications and radio engineering, field of knowledge 17 – Electronics and telecommunications. – State Institution “Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine”, Kyiv, 2023.

In modern world of micro-, macroeconomy the ability for risks, status, results control, assessment or forecast is necessary. To supply growing demands big amounts of relevant data must be provided. Owing to recent satellite coverage and remote sensing methods, it is possible to retrieve huge extent of land objects data, practically, from any point of the land surface in a remarkably short time.

Remote sensing data is widely used in agriculture (for vegetation state assessment and control, for yield forecast, soil moisture retrieval, abrading etc.), geodesy (land mapping, interferometry etc.), ocean monitoring (including illegal vessels tracking in various water areas), atmospheric layers composition determination and others.

An important qualitative characteristic of Earth remote sensing data is their informativeness, which is responsible for the amount of useful information for solving a specific thematic problem. Therefore, this parameter is different for different tasks. Taking into account growing needs for high quality data in order to obtain more accurate results, satellite imagery informativity enhancement is a relevant task of nowadays.

An objective general parameter of the quality of Earth remote sensing data is spatial resolution, which allows us to quantitatively express how well different objects of a given reference size are distinguished in the image. Therefore, spatial resolution directly affects the informativity of the image regardless of the tasks for which the informativity is considered.

In the remote sensing of the Earth a separate place is occupied by radar images. This is a fairly effective means of sensing the Earth from space, which is dynamically developing and increasingly widely applied. In contrast to optical imaging systems, radars allow you to sense land surface both in cloudy conditions and at night, and operate in the radio wave range, which allows you to receive data of a slightly different physical nature. The physical difference in the principle of operation of radar sensors, compared to the classical ones - optics, requires appropriate means of processing their data: the development of new algorithms, methods and techniques.

Thus, ***the aim*** of this work is to increase the informativity of space images obtained with a multi-polarization synthetic-aperture radar (SAR), by using modern exploratory works to develop the appropriate technique.

To achieve the given goal, it is envisaged to perform several scientific tasks, the first of which was the analysis of existing methods for satellite imagery informativity enhancement, and the relationship between informativity and spatial resolution establishment.

The satellite images obtained from the constellation of satellites of the Sentinel-1 radar system were chosen as the source SAR data. Since this satellite provides data in two polarizations at once, one of which coincides in the emitted and received polarization modes of the electromagnetic pulse, and the other contains an interpolarization component, the models of satellite radar backscattering signal were developed to transform different polarization data into a common physical quantity – dielectric permittivity of the land surface.

For the selection of the backscatter model, an appropriate algorithm was developed, which based on the physical consistency of the different polarization data, as well as taking into account the limitations of the models themselves.

In order to enhance the spatial resolution, a corresponding mathematical model and algorithm for the low spatial resolution satellite images fusion into a single two-fold enlarged image of enhanced spatial resolution, were developed.

To provide superresolution using the time delay between the consecutive reception and sending of two different pulses generated in *vv* and *vh* modes by Sentinel's-1 radar

(here the first letter of the mode designation denotes the polarization of the generated pulse, and the second one – polarization of the receiving component of the backscattered signal), a mathematical model and algorithm for estimating subpixel shifts between a pair of images were developed.

Taking into account the fact that satellite radar data necessarily require pre-processing, an appropriate data processing algorithm was developed that meets the needs of the developed technique. Subsequently, the input data were processed according to this algorithm.

Considering the specifics of the Sentinel-1 radar data, according to the backscattering model selection algorithm, the well-known Oh radar backscattering model (1992) was chosen as the basic working model, as it is provided with all the necessary input data and adapted to the analysis of cross-polarization signals.

Subsequently, the transformed into synthetic dielectric permittivity radar data is used as a low spatial resolution data in the developed algorithm for satellite images spatial resolution enhancement. The result of the algorithm application was a reconstructed image of a synthetic dielectric permittivity with an enhanced spatial resolution.

The assessment of the achieved result – radar data informativity enhancement – was carried out quantitatively by comparing the actual spatial resolution of the input and output images. In turn, the actual spatial resolutions were estimated by the methods of spatial-frequency analysis through the approximate modulation transfer functions (MTF) of digital images.

Technique testing was carried out by processing 31 dual-polarization radar images acquired by Sentinel-1 satellite system, according to the proposed methodology. As a result of processing, the average gain in informativity was 85.4 %.

During the testing of the methodology, the limitation of the Oh model to simulating large values of the radar backscatter signal was revealed – for which the value of the normalized backscatter coefficient σ_{vv}^{0} exceeds 0.6. This, as a rule, leads to the impossibility of significant informativity enhancement of images of scenes where there are many objects with large values of σ_{vv}^{0}. Basically, the majority of such objects are

anthropogenic, often metallic, with flat faces normal to each other, which collectively form a kind of angular radar reflectors.

An iterative modification of the technique is proposed, which became possible due to the rapid convergence of the process of direct-inverse modeling of the reflected radar signal, where the zero iteration corresponds to the actually recorded values of radar backscatter in different polarizations.

At the end of the thesis, recommendations are provided regarding the possible application of the developed technique and its implementation in the form of a cloud web service that meets the computational needs of the technique. Prospective directions for future research are also formulated.

Scientific novelty

For the first time a technique for multi-polarization synthetic-aperture radar data informativity enhancement technique was developed. The technique provides an enhancement in the spatial resolution of the output radar image due to the joint subpixel processing of several input images obtained in each polarization separately and converted into a single physical value inherent in the land surface – dielectric permittivity, roughness, moisture content, and so on. As a result of such transformation, it becomes possible to correctly apply the superresolution algorithm to a set of different polarization radar images.

The model for converting multi-polarization radar data into dielectric permittivity of the land surface *has been improved* by imposing physically determined limitations of the target value and applying iterative forward-inverse modeling of the reflected radar signal.

The algorithm for restoring a joint image of subpixel resolution from a set of satellite images *has been improved* by its adaptation to the radar data, which consists in applying additional speckle filtering directly in the frequency domain, where all other processing is performed.

Practical implications

According to the results of experimental testing on many actual dual-polarization radar images, the developed technique provided, on average, an enhancement in spatial

resolution by 85.4 %. In addition to actually enhance the informativity of multi-polarization radar imaging materials, the proposed technique provides restoration of the spatial distribution of the target physical characteristics of the land surface with enhanced resolution, which corresponds to the modern concept of ARD (analysis-ready data), which means obtaining from raw satellite data maps of physical/biophysical parameters of the land surface that are understandable to experts in applied ground-based studies.

The developed technique can be used for such Earth observation applications as: environmental monitoring, geophysical mapping, mineral exploration, land degradation forecasting, climate change research, etc.

Keywords: Earth remote sensing, satellite data, synthetic-aperture radar (SAR), radar backscattering coefficient, dielectric permittivity, superresolution, subpixel processing

Список публікацій за темою дисертації

Розділи у монографіях

1. Stankevich, S., Piestova I., Lubskyi, M., Shklyar, S., Lysenko, A., Maslenko O., & Rabcan, J. (2021). Knowledge-Based Multispectral Remote Sensing Imagery Superresolution. *Studies in Computational Intelligence*, 219–236. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-74556-1_13, URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-74556-1_13 (Індексація: Scopus Q3. *Особистий внесок*: аналіз інформативності супутникових зображень; аналіз методів підвищення просторової розрізненності супутникових зображень; застосування моделі підвищення просторової розрізненності зображення)
2. Stankevich, S., Piestova, I., Shklyar, S., & Lysenko, A. (2019). Satellite Dual-Polarization Radar Imagery Superresolution Under Physical Constraints. In: Shakhovska N., Medykovskyy M.O. (eds) *Advances in Intelligent Systems and Computing IV. CSIT 2019*, Springer, Cham, 1080. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0_30, URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-33695-0_30 (Індексація: Scopus Q3. *Особистий внесок*: застосування моделі IEM до перетворення радарних даних в значення синтетичної діелектричної проникності земної поверхні; застосування моделі субпіксельного зміщення для оцінки зміщення пари зображень; застосування моделі підвищення просторової розрізненності; застосування моделі оцінки просторової розрізненності)
3. Popov, M., Stankevich, S., Kozlova, A., Piestova, I., Lubskiy, O., Titarenko, O., Svideniuk, M., Andreiev, A., Lysenko, A., & Singh, S.K. (2021). Long-Term Satellite Data Time Series Analysis for Land Degradation Mapping to Support Sustainable Land Management in Ukraine. *Advances in Geographical and Environmental Sciences*, 165–189. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-4768-0_11, URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-4768-0_11 (Інші закордонні видання. *Особистий внесок:* аналіз залежності якості

класифікації об’єктів земної поверхні від значень просторової розрізненності та шумової складової супутникових зображень)

Наукові статті, опубліковані у фахових періодичних виданнях

4. Stankevich, S. A., Svideniuk, M. O., & Lysenko, A. R. (2021). Land Surface Roughness Parameter Retrieval by Inverse Simulation of Dual-Polarization Radar Backscattering. *Applied Questions of Mathematical Modeling*, 4(2.1). DOI: https://doi.org/10.32782/kntu2618-0340/2021.4.2.1.22, URL: https://ojs.kntu.net.ua/index.php/aqmm/article/view/150 (Індексація: фахове видання України категорії «Б». *Особистий внесок*: застосування моделі зворотного розсіювання до моделювання шорсткості земної поверхні; оцінка довжини кореляції горизонтального профілю земної поверхні)
5. Stankevich, S. A., Popov, M., Shklyar, S., Sukhanov K., Andreiev A., Lysenko, A., Xing, K., Cao, S., Shh, Y., & Sun, B. (2020). Estimation of mutual subpixel shift between satellite images: software implementation. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 24, 9–14. DOI: https://doi.org/10.36023/ujrs.2020.24.165, URL: https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/165/186 (Індексація: фахове видання України категорії «Б». *Особистий внесок*: розробка моделі та алгоритму оцінки цілопіксельного зміщення пари зображень з їх застосуванням; розробка моделі та алгоритму оцінки субпіксельного зміщення пари зображень з їх застосуванням)
6. Станкевич, С.А., Шкляр, С.В. & Лисенко, А.Р. (2018). Програмний модуль оцінки субпіксельного зміщення знімків, отримуваних з квадрокоптеру. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 17, 10-13. DOI: https://doi.org/10.36023/ujrs.2018.17.128, URL: https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/128/144 (Індексація: фахове видання України категорії «Б». *Особистий внесок*: оцінка субпіксельного зміщення пари зображень; трансформування кольорових зображень в панхроматичний вигляд; збір даних за допомогою квадрокоптера)
7. Станкевич, С.А., Лубський, М.С., & Лисенко, А.Р. (2017). Підвищення просторової розрізненності аерознімання з квадрокоптеру на основі

субпіксельної обробки зображень. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 15, 40-42. DOI: https://doi.org/10.36023/ujrs.2017.15.113, URL: https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/113/130 (Індексація: фахове видання України категорії «Б». *Особистий внесок*: застосування моделі підвищення просторової розрізненності зображення, отриманого за допомогою квадрокоптера; оцінка просторової розрізненності)

8. Лисенко, А.Р. (2023). Методика підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радара із синтезованою апертурою. *Український журнал дистанційного зондування Землі, 10*(3), 10–15. https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.3.243, URL: https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/243/255 (Індексація: фахове видання України категорії «Б».)
9. Stankevich, S. A., Piestova, I. O., & Lysenko, A. R. (2020). Radar Data Product Superresolution under Parameter Variation. *Central European Researchers Journal*, *6*(2), 8–13. URL: https://ceres-journal.eu/download.php?file=2020_02_02.pdf (Інші закордонні видання. *Особистий внесок*: оцінка можливостей зведення різнополяризаційних даних в єдине значення діелектричної проникності земної поверхні; застосування моделі та алгоритму підвищення просторової розрізненності супутникового зображення; застосування моделі оцінки просторової розрізненності)
10. Stankevich, S., Popov, M., Shklyar, S., Sukhanov, K., Andreiev, A., Lysenko, A., Kun, X., Shixiang, C., Yupan, S., Xing, Z., & Boya, S. (2020). Subpixel-shifted Satellite Images Superresolution: Software Implementation. *WSEAS Transactions on Computers*, 19, 31–37. DOI: https://doi.org/10.37394/23205.2020.19.5, URL: https://wseas.com/journals/computers/2020/a105105-063.pdf (Інші закордонні видання. *Особистий внесок*: розробка та застосування моделей та алгоритмів підвищення просторової розрізненності супутникових зображень; оцінка просторової розрізненності)

Патент України на винахід

11. Спосіб підвищення просторової розрізненності розподілу температури земної поверхні, одержаного дистанційно. Станкевич С. А., Пєстова І. О., Лубський М. С., Лисенко А. Р.: пат. 126778 Україна: МПК G06T5/50, G06T7/32, G06V10/20, G06V10/36. № а 2021 01200; заявл. 10.03.2021; опубл. 01.02.2023, Бюл. №5 (*Особистий внесок*: застосування моделі підвищення просторової розрізненності зображення; застосування моделі оцінки просторової розрізненності зображення)

Апробація матеріалів дисертації

12. Stankevich, S. A., Lubskyi, 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 2021),* 89–94. DOI: https://doi.org/10.1109/IDT52577.2021.9497630, URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9497630 (Індексація: Web of Science. *Особистий внесок*: аналіз методів підвищення просторової розрізненності зображення; застосування моделі для оцінки просторової розрізненності зображення)

13. Stankevich, S., Piestova, I., Shklyar, S., & Lysenko, A. (2019). Physically Constrained SAR Data Superresolution. *2019 IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies* (CSIT 2019), 228–231. DOI: https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2019.8929833, URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8929833 (*Особистий внесок*: розробка та застосування алгоритму обробки радарних зображень з метою підвищення їх просторової розрізненності; розробка та застосування алгоритму зведення різнополяризаційних даних в діелектричну проникність земної поверхні; застосування моделі підвищення просторової розрізненності зображення; оцінка просторової розрізненності)

14. Stankevich S.A., Andreiev A.A., & Lysenko A.R. (2020). Multiframe remote sensed imagery superresolution. *Proceedings of the 15th International Scientific-*

Practical Conference on Mathematical Modeling and Simulation Systems (MODS 2020), 128–131. (*Особистий внесок*: застосування моделі підвищення просторової розрізненності зображення; застосування моделі оцінки субпіксельного зсуву пари зображень; оцінка просторової розрізненності)

Розподіл статей

За результатами досліджень опубліковано 14 наукових праць, у тому числі 3 розділи у монографії, з них 2 проіндексовані у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, 5 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України, 2 статті у інших закордонних виданнях, 1 патент України, 3 тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій, з яких одна проіндексована у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ 21

ВСТУП 22

1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ, ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ БАГАТОПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО РАДАРУ З СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ . 29

1.1 Огляд існуючих супутникових сенсорів ДЗЗ 29

1.1.1 Оптичні сенсори 30

1.1.2 Радарні сенсори 31

1.2 Огляд супутникових радарних даних 34

1.3 Огляд сучасних методів підвищення інформативності радарних даних 37

1.3.1 Інформативність супутникових зображень 37

1.3.2 Методи обробки радарних даних 38

1.4 Постановка задачі 40

Висновки до першого розділу 42

Список використаних джерел 43

2. РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ, ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ БАГАТОПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО РАДАРУ З СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ 52

2.1 Модель підвищення просторової розрізненності супутникового зображення 52

2.1.1 Оцінка цілопіксельного зсуву пари зображень 52

2.1.2 Оцінка субпіксельного зсуву пари зображень 53

2.1.3 Побудова зображення підвищеної розрізненності 55

2.2 Моделі перетворення радіолокаційного зворотного розсіювання на діелектричну проникність земної поверхні 58

2.2.1 Модель Оха 58
2.2.2 Модель Дюбуа 60
2.2.3 Модель інтегрального рівняння 61
2.3 Застосування моделей радіолокаційного зворотного розсіяння до визначення діелектричної проникності земної поверхні 64
2.4. Математична модель оцінки просторової розрізненності супутникового знімка 65
2.5. Зв'язок просторової розрізненності супутникових знімків з їх інформативністю 67
Висновки до другого розділу 68
Список використаних джерел 70
3. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ, ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ БАГАТОПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО РАДАРУ З СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ 73
3.1 Розробка алгоритму попередньої обробки супутникових радарних даних ... 73
3.2 Розробка алгоритму зведення різнополяризаційних радарних супутникових даних в єдиний фізичний показник 77
3.2.1 Розробка алгоритму вибору моделі супутникового зворотного розсіювання багатополяризаційного радарного сигналу 79
3.2.2 Визначення цільової функції та її обмежень при оптимізації фізичної величини, що обрана для перетворення супутникових багатополяризаційних радарних даних в спільний показник 81
3.3 Залежність діелектричної проникності від шорсткості та довжини кореляції земної поверхні 82
3.4 Розробка алгоритму підвищення просторової розрізненності кількох субпіксельно зміщених супутникових зображень 86
3.4.1 Розробка алгоритму обчислення цілопіксельного зсуву зображень 90

3.4.2 Розробка алгоритму цілопіксельного обрізання зображень 91
3.4.3 Розробка алгоритму обчислення субпіксельного зсуву зображень 92
3.5 Розробка алгоритму кількісної оцінки підвищення просторової розрізненності та інформативності 93
3.6 Поєднання розроблених алгоритмів в єдину методику підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою 94
Висновки до третього розділу 95
Список використаних джерел 96
4. ТЕСТУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ МЕТОДИКИ ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ, ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ БАГАТОПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО РАДАРУ З СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ 101
4.1 Вибір досліджуваної ділянки 101
4.2 Попередня обробка супутникових радарних даних 104
4.2.1 Додавання файлу орбіти 106
4.2.2 Обтинання зображення до зони інтересу 107
4.2.3 Фільтрування теплового та сигнального шумів 108
4.2.4 Радіометричне калібрування 108
4.2.5 Фільтрування спекл шуму 109
4.2.6 Дальнісно-доплерівська геометрична корекція 110
4.3 Зведення різнополяризаційних супутникових даних в єдиний фізичний показник 112
4.3.1 Вибір моделі супутникового зворотного розсіювання багатополяризаційного радарного сигналу 112

4.3.2 Цільова функція та її обмеження при оптимізації діелектричної проникності 114
4.3.3 Перетворення значень “сигма-нуль” в діелектричну проникність 114
4.4 Підвищення просторової розрізненності супутникових зображень 119
4.5 Оцінка підвищення просторової розрізненності 122
4.6 Оцінка підвищення інформативності 124
4.7 Обмеженість моделі Оха в моделюванні зворотного розсіювання радіолокаційного сигналу від поверхонь з сильним коефіцієнтом зворотного відбиття 125
4.8 Ітеративність розробленої методики 127
4.9 Рекомендації по впровадженню розробленої методики 129
Висновки до четвертого розділу 131
Список використаних джерел 133
ВИСНОВКИ 137
Додаток А 140
Додаток Б 147
Додаток В 182
Додаток Г 186
Додаток Д 190

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ДЗЗ	Дистанційне зондування Землі
ДПФ	Дискретне перетворення Фур’є
РСА	Радар з синтезованою апертурою
ФПМ	Функція передачі модуляції
ФРТ	Функція розсіяння точки
ALOS	Advanced Land Observation Satellite
CADS	Calibration Annotation Data Set
CEOS	Committee on Earth Observation Satellites
DN	Digital Numbers
EOS	Earth Observing System
ESA	European Space Agency
EW	Extra-Wide swath
FQBAQ	Flexible Dynamic Block Adaptive Quantization
GRD	Ground Range Detected
IPF	Instrument Processing Facility
IW	Interferometric Wide swath
LUT	Look Up Table
OCN	Ocean
OSS	Ocean Swell Spectra
OWI	Ocean Wind Field
SLC	Single Look Complex
SM	Stripmap
SNAP	Sentinel Applications Platform
SRV	Surface Radial Velocity
WV	Wave

ВСТУП

Актуальність теми дослідження

Сучасні потреби людства ставлять перед дослідниками нові науково-технічні задачі, які диктуються реальними обставинами. Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) посідає важливе місце у вирішенні таких задач, адже дозволяє отримувати дані про земні об’єкти як дистанційно, так і в глобальних масштабах.

Із запуском перших супутників ДЗЗ масштаби дистанційного зондування, порівняно з аерофотозйомкою, значно збільшились. А внаслідок збільшення супутникового покриття можна отримати дані, практично з будь-якої ділянки Землі з невеликими часовими інтервалами, які вимірюються днями (у разі необхідності отримання даних саме з конкретної знімальної платформи та знімального сенсора).

Завдяки нинішнім досягненням в галузях оптики та радіоелектроніки постає можливим вивчення об’єктів не лише у видимому для людського ока спектрах, а і в тих, що наша сенсорна система сприймати нездатна. Це дозволяє отримувати об’ємну інформацію про об’єкти дослідження в різних аспектах. На цій основі, за допомогою співставлення різношарових даних, були розроблені та продовжують розроблятись різні алгоритми, методи та методики, що пов’язані з виявленням об’єктів, їх класифікації, діагностуванні, вимірюванні тощо.

Зрозуміло, що для досягнення поставлених перед науковцем цілей важливо отримувати необхідні для вирішення задачі дані належної якості. Часто виникають ситуації, коли характеристики наявних даних є недостатніми для задоволення потреб завдання і постає необхідність покращення їх якості.

Основними характеристиками супутникових зображень є їх яскравість, контраст, відношення “сигнал-шум”, а для вирішення сучасних науково-технічних задач – просторова розрізненність, яка є комплексним та основним показником здатності розрізняти дрібні деталі на супутникових знімках. Таким чином, значення просторової розрізненності напряму впливає на кількість корисної інформації, а, отже, і інформативність супутникових даних, що використовуються в широкому спектрі вирішення різних тематичних задач.

Просторова розрізненність може бути напряму покращена завдяки збільшенню фокусної відстані знімальної системи, зменшенню розміру фотоприймальних елементів матричного фотоприймача та покращенню передавальних характеристик видових технічних засобів. На жаль, такі методи призводять до надмірних економічних затрат, а інколи взагалі унеможливлюють, з урахуванням сучасних науково-технічних досягнень, побудову бажаних знімальних систем через технічні обмеження розмірів фотодетекторів та неприйнятно великих кінцевих розмірів і ваги знімальної апаратури.

На противагу прямим, апаратним вирішенням заданої проблеми, програмні методи обробки значно дешевші та не потребують модифікацій існуючих знімальних систем, а спрямовані на підвищення просторової розрізненності шляхом різнорідної обробки та перетворень існуючих даних.

З введенням в експлуатацію супутникових радарних знімальних систем стало можливим отримувати дані земних об’єктів не лише в оптичному діапазоні чи малій ділянці короткого мікрохвильового спектру, а й на менших частотах електромагнітного випромінювання – в радіохвильовому діапазоні. Завдяки більшій довжині хвилі діапазонів радарного зондування, радіолокаційні дані мають деякі переваги над оптичними знімальними системами: незалежність від хмарності та можливість знімання в нічну пору доби.

Радарне ДЗЗ є відносно новітнім та наукомістким методом ДЗЗ, який продовжує швидко розвиватися, а тому необхідність у підвищенні інформативності супутникових знімків, що отримані за допомогою радара з синтезованою апертурою (РСА) залишається нагальною. Багато можливостей в цьому напрямку потенційно забезпечується все ширшим використанням радарного знімання в різних поляризаціях зондувального сигналу. Але сучасні методи радарної поляриметрії сфокусовано, в основному, на використанні власне поляризаційної інформації (*Lee & Pottier, 2017*), а питанням просторової розрізненності при цьому уваги майже не приділяється. Для задоволення цих потреб та підвищення пов’язаної з цим загальної інформативності є необхідною розробка нових алгоритмів, методів та методик.

Отже, розробка методики підвищення інформативності супутникових знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою є ***актуальним науковим завданням*** сьогодення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана в рамках наукових досліджень, що проводились у Державній установі "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України" за такими темами: "Методи тематичного аналізу гетерогенних геопросторових даних при вирішенні задач дистанційного зондування Землі в умовах неповноти та обмеженості наявної інформації" (державний реєстраційний номер 0116U000144); "Розробка нових методів обробки та аналізу супутникових зображень в інтересах вирішення задач сталого розвитку і раціонального природокористування" (державний реєстраційний номер 0121U100673); "Методика оцінювання динаміки опустелювання на основі даних супутникового знімання на прикладі піщаного масиву Олешківські піски" (державний реєстраційний номер 0121U111862); "Програмний модуль підвищення просторової розрізненності оптимального набору субпіксельно зміщених зображень" (державний реєстраційний номер 0122U201983); "Оцінка ризиків негативних змін навколишнього середовища за даними дистанційного зондування Землі" (державний реєстраційний номер 0122U002443).

Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою, шляхом перетворення різнополяризаційних радарних даних у спільну фізичну величину з подальшим їх синтезом у єдине зображення підвищеної розрізненності.

Для досягнення мети були поставлені наступні наукові завдання:

1) оглянути існуючі методи підвищення інформативності радарних даних;
2) встановити взаємозв'язок інформативності з просторовою розрізненністю супутникових зображень;
3) удосконалити модель зворотного супутникового радарного розсіювання;

4) розробити алгоритм перетворення багатополяризаційних радарних даних у спільну фізичну величину;
5) адаптувати модель підвищення просторової розрізненності супутникового зображення;
6) розробити алгоритм підвищення просторової розрізненності супутникових зображень;
7) розробити методику підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою;
8) провести тестування розробленої методики підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою на реальних радарних знімках;
9) надати рекомендації по застосуванню методики підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою.

Об'єкт дослідження – супутникові знімки, отримані за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою.

Предмет дослідження – інформативність супутникових радарних знімків.

Методи дослідження

Для вирішення поставлених завдань використовувалися:

- теорія радіолокації – для моделювання значень зворотного розсіювання радіолокаційного сигналу;
- теорія інтерполяції та апроксимації функцій – для визначення обмеженостей моделі цільової функції зведення різнополяризаційних радарних даних;
- просторово-частотний аналіз – для субпіксельної обробки цифрових зображень та оцінки їх просторової розрізненності;
- теорія ймовірності та математична статистика – для статистичного аналізу та узагальнення кількісних результатів дослідження;
- теорія інформації – для оцінки загальної інформативності цифрових зображень;

- методи алгебраїчної регуляризації – для субпіксельного відновлення цифрових зображень.

Наукова новизна одержаних результатів

1. ***Вперше*** розроблено методику підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою. Методика забезпечує підвищення просторової розрізненності вихідного радіолокаційного зображення за рахунок спільної субпіксельної обробки кількох вхідних зображень, отриманих в кожній поляризації окремо та переведених до єдиної фізичної величини, притаманної земної поверхні – діелектричної проникності, шорсткості, вологовмісту та таке інше. В результаті такого перетворення стає можливим коректно застосувати алгоритм надрозрізненності до сукупності різнополяризаційних радіолокаційних зображень.
2. ***Удосконалено*** модель перетворення різнополяризаційних радарних даних в діелектричну проникність земної поверхні шляхом накладання фізично обумовлених обмежень цільової величини та застосування ітераційного прямого-оберненого моделювання відбитого радіолокаційного сигналу.
3. ***Удосконалено*** алгоритм відновлення спільного зображення субпіксельної розрізненності із набору супутникових знімків за рахунок його адаптації до радіолокаційних даних, яка полягає в застосуванні додаткової спекл-фільтрації безпосередньо в частотній області, де виконується і вся інша обробка.

Практичне значення отриманих результатів

За результатами експериментального тестування на багатьох реальних двополяризаційних радарних зображеннях розроблена методика забезпечила, в середньому, підвищення інформативності на 85.4 %. Окрім власне підвищення інформативності матеріалів багатополяризаційного радарного знімання запропонована методика забезпечує відтворення просторового розподілу цільової фізичної характеристики земної поверхні підвищеної розрізненності, що відповідає сучасній концепції ARD (analysis-ready data), яка передбачає отримання з сирих

супутникових даних карт фізичних/біофізичних параметрів земної поверхні, зрозумілих фахівцям з тематичних наземних досліджень.

Застосування розробленої методики можуть бути корисними для покращення інформативності багатополяризаційних радіолокаційних даних у задачах моніторингу навколишнього середовища за участю Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України; моніторингу, аналізу та запобіганню природніх катастроф за участю Державної служби України з надзвичайних ситуацій; при вирішенні тематичних завдань з використанням радіолокаційних супутникових систем у Національному центрі управління та випробувань космічних засобів; обробки та аналізу результатів радіолокаційного знімання при проведенні наукових досліджень у Національній академії наук України; у прикладних наукових дослідженнях (Д.1); у навчальних процесах ННІ, де застосовуються супутникові радарні дані (Д.2).

Особистий внесок здобувача

Основні результати роботи одержані особисто автором дисертаційної роботи. Результати співпраці з колегами та спеціалістами інших наукових галузей відображено в сумісних наукових публікаціях.

Проведений автором аналіз існуючих методів підвищення інформативності супутникових даних, методів підвищення просторової розрізненності супутникових зображень, оцінки субпіксельного зсуву пари супутникових зображень, моделювання зворотного радіолокаційного розсіювання розглянуто в роботах, перелічених у Додатку Г. Зокрема, методи підвищення інформативності супутникових даних розглянуті в (Г.1), методи підвищення просторової розрізненності розглянути в (Г.1, Г.12), а вплив просторової, радіорозрізненності та шумів на результати класифікації типів покривів земної поверхні розглянуто в (Г.3). Модель та алгоритм підвищення просторової розрізненності зображення розроблені в (Г.10), а застосовані в різноманітних задачах у (Г.1, Г.2, Г.7, Г.9, Г.10, Г.11, Г.13, Г.14). Моделі оцінки цілопіксельного та субпіксельного зсувів цифрових зображень розроблені в (Г.1), а застосування моделі оцінки субпіксельного зсуву описано в роботах (Г.2, Г.5, Г.6, Г.10, Г.14). Аналіз можливостей зведення різнополяризаційних даних в єдиний фізичний показник – діелектричну проникність, було проведено в роботі (Г.9), а зв’язок її з шорсткістю та довжиною

кореляції земної поверхні встановлено в (Г.4). Моделі зведення різнополяризаційних даних в діелектричну проникність були застосовані в (Г.2, Г.13), а відповідні алгоритми розроблено та застосовано в (Г.13). Оцінки просторової розрізненності було отримано в (Г.2, Г.7, Г.9, Г.10, Г.11, Г.12, Г.13, Г.14), а інформативність проаналізовано в (Г.1). Розроблена методика докладно описана в (Г.8).

Апробація матеріалів дисертації

Основні теоретичні та методичні результати дисертаційної роботи були представлені, обговорені та схвалені на 14-й Міжнародній науковій конференції "*14th IEEE International Conference on Computer Sciences and Information Technologies* (CSIT)" (Львів, 17 – 20 вересня 2019 р.), 15-й Міжнародній науковій конференції "*Mathematical Modeling and Simulation Systems* (MODS)" (Чернігів, 29 червня – 1 липня 2020 р.), Міжнародній науково-практичній конференції "*Workshop on Reliability Engineering and Computational Intelligence* (RECI)" (Жиліна, Словаччина, 27 – 29 жовтня 2020 р.), Міжнародній науковій конференції "International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)" (Жиліна, Словаччина, 22 – 24 червня 2021 р.).

Розподіл статей

За результатами досліджень опубліковано 14 наукових праць, у тому числі 3 розділи у монографії, з них 2 проіндексовані у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, 5 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України, 2 статті у інших закордонних виданнях, 1 патент України, 3 тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій, з яких одна проіндексована у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus.

Структура і обсяг дисертації

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел (167 найменувань на 21 сторінці) та 5 додатків на 53 сторінках. Робота викладена на 191 сторінці, що містять 117 сторінок основного тексту, 37 рисунків та 3 таблиці.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ, ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ БАГАТОПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО РАДАРУ З СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ

На сьогодення, дистанційне зондування Землі відіграє значну роль в дослідженні нашої планети, моніторингу перебігу її явищ та процесів, прогнозуванні наслідків та багато іншому (*Navalgund et al., 2007*). Технічні засоби (сенсори) ДЗЗ можна поділити на засоби аерознімання та засоби супутникового знімання (*Jawd et al., 2021*). Так як дана робота присвячена підвищенню інформативності матеріалів супутникового ДЗЗ, то далі будуть розглядатись саме супутникові сенсори ДЗЗ, одержувані ними дані та методи обробки і підвищення інформативності цих даних.

1.1 Огляд існуючих супутникових сенсорів ДЗЗ

Перш за все супутникові сенсори дистанційного зондування Землі поділяються на пасивні та активні: пасивні сенсори реєструють відбите від поверхні Землі сонячне випромінювання, а активні сенсори здатні самостійно генерувати електромагнітне випромінювання, яке після відбиття від об’єктів зйомки реєструється (*Zhu et al., 2018*).

Більшість пасивних сенсорів працюють в оптичному – у видимому, ближньому, середньому та дальньому інфрачервоному – діапазоні і зовсім нечасто – в мікрохвильовому діапазоні електромагнітного спектру. Зазвичай пасивні сенсори ДЗЗ використовуються для визначення фізичних властивостей земної поверхні, таких як спектральне відбиття і температура, характеристик рослинності, спостереження аграрних і урбанізованих ландшафтів, гідрологічного та океанографічного картування (*Parkinson, 2001*), дистанційного зондування атмосфери (*Efremenko & Kokhanovsky, 2021*; *Rogers et al., 2019*), задачах

класифікації (*Popov et al., 2021*) та багатьох інших задач. Варто зазначити, що пасивні системи дистанційного зондування мають і суттєвий недолік: обмежені можливості функціонування вночі (*Laneve et al., 2007*) та проблеми при зніманні в умовах значної хмарності (*Kerle et al., 2004*).

Щодо активних супутникових сенсорів, таких як радари із синтезованою апертурою (РСА), то вони працюють виключно в радіохвильовому діапазоні, а можливості одержання ними даних практично не залежить від хмарності (*Zhao et al., 2021*). Дані від РСА використовуються для таких задач як визначення топографії та рельєфу поверхні суші та моря (*Braun, 2021*; *Rizaev et al., 2022*); визначення структури рослинного покриву (*Tran et al., 2021*); інвентаризації сільськогосподарських культур (*Lavreniuk et al., 2019*; *Shelestov et al., 2020*); прогнозування врожайності (*Kussul et al., 2018*); визначення кількості опадів і вологовмісту ґрунту (*Freeman et al., 1996*) та інших. Окрім РСА, активні сенсори включають в себе радари інших типів, радіовисотоміри, лідари та лазерні альтиметри (*Andersen, 2006*).

1.1.1 Оптичні сенсори

Засоби пасивного дистанційного зондування включають в себе оптичні сенсори, які працюють у видимому, ближньому інфрачервоному, коротко-, середньо- та довгохвильовому інфрачервоному, а також в мікрохвильовому спектральних діапазонах для отримання даних про об’єкти дистанційного зондування (*Shaw & Burke, 2003*).

За кількістю робочих спектральних діапазонів оптичні знімальні системи можна розділити на такі типи (*Wong et al., 2021*; *Gianinetto & Lechi, 2004*):

- **панхроматичні**, де сенсор сприймає інформацію в єдиному широкому спектральному діапазоні. Панхроматичні дані застосовуються для виявлення об’єктів або певних ознак/рис за контрастом. Прикладами панхроматичних знімальних систем є WorldView-1, EROS-B та ALOS PRISM (*Schowengerdt, 2007*);

- **багатоспектральні**, де сенсор працює в невеликій кількості спектральних діапазонів. В такому разі отримуються багатошарові оптичні дані про об'єкт знімання. Прикладами багатоспектральних знімальних систем є Landsat OLI, Sentinel-2 MSI, Січ-2 МСУ та інші (*Landgrebe, 2003*);
- **суперспектральні**, де сенсор має більше каналів, аніж багатоспектральний (зазвичай, більше 10). За допомогою такого знімання можливо отримати дані з більшою спектральною розрізненністю. Прикладами суперспектральних супутникових знімальних систем виступають EOS MODIS та Suomi VIIRS (*Xiong et al., 2003*);
- **гіперспектральні**, де сенсор формує зображення в сотнях, а то й більше, послідовних спектральних діапазонах. В результаті отримується квазібезперервний спектр сцени – гіперкуб даних. Прикладом гіперспектрального супутникового сенсора є EO1 Hyperion (*Qian, 2020*).

Також супутникові сенсори поділяються за типом фотоприймача на матричні та лінійкові, за принципом реєстрації зображення – на кадрові та сканувальні, за кількістю об'єктивів – на інтегровані та відокремлені тощо (*Бурштинська & Станкевич, 2013*).

1.1.2 Радарні сенсори

Останні роки радарні сенсори набувають значної популярності завдяки активному принципу зондування, незалежності від хмарності та часу доби, можливостям багатодіапазонного та багатополяризаційного знімання, високій просторовій розрізненності та проникаючій здатності радарного випромінювання (*Tsai et al., 2020*). Звісно, радарні сенсори мають і недоліки, наприклад, недостатню радіометричну розрізненність, спекл-шуми, а також більшу складність обробки та інтерпретації радарних даних (*Cheney & Borden, 2009*).

За кількістю поляризацій радарні сенсори можна поділити на (*Richards, 2009*):

- **однополяризаційні** – як правило, працюють у режимі однакової поляризації: vv або hh. Радар випромінює вертикально поляризовану електромагнітну хвилю і сприймає вертикально поляризовану її складову, або ж горизонтально поляризовану електромагнітну хвилю і також реєструє горизонтально поляризовану складову, відповідно (*Krieger et al., 2008*). Тобто однополяризаційний радар працює, як правило, у спільній узгодженій поляризації на випромінення та на прийом сигналу;
- **двополяризаційні** – мають два різних режими поляризації і можуть працювати в однаковому режимі на генерацію та прийом електромагнітного імпульсу в обох режимах, наприклад, vv та hh. Або працювати в режимі доповнення однієї поляризації її міжполяризаційною складовою, наприклад, vv та vh, або hh та hv (*Rosen et al., 2013*). Тобто, паралельно генерується електромагнітний імпульс в одній поляризації і сприймається відбитий сигнал в ній же, а також приймається його складова в іншій поляризації;
- **чотири-поляризаційні** – мають чотири режими поляризації, зазвичай це повна комбінація із vv, vh, hh та hv (*Yang et al., 2021*);
- та інші, наприклад фрактально-поляризаційні (*Dmitriev & Chimitdorzhyiev, 2016*).

Також радари мають різну несучу частоту випромінюваних електромагнітних імпульсів і за цим показником поділяються на такі радарні діапазони (*Teferi et al., 2021*):

- ***P*** – має частоту 0.3-1 ГГц, використовується перед усім для картування рослинності та її оцінки, довжина хвилі випромінювання складає 30-100 см;
- ***L*** – має частоту 1-2 ГГц і застосовується у GPS, супутникових мобільних телефонах, супутниковому радіо та іншому завдяки великій довжині хвилі (15-30 см). В цьому діапазоні отримуються дані РСА середньої просторової розрізненності, які використовуються для таких задач як картування біомаси та структури рослинності, геофізичний моніторинг та інше;

- ***S*** – частота 2-4 ГГц, в ньому працюють метеорологічні радари, радари кораблів та деякі супутники зв'язку, а довжина хвилі становить 7,5-15 см; може використовуватись в РСА для моніторингу сільськогосподарських площ. Не є широкозастосовуваним діапазоном для супутникового радарного зондування Землі;
- ***C*** – частота 4-8 ГГц, використовується для супутникового зв'язку, вимірюванні тропічних опадів, збору радарних даних про Землю, інтерферометрії, визначенню змін та іншому. Є найбільш вживаним каналом отримання даних з радарів з синтезованою апертурою. Довжина хвилі складає 3,75-7,5 см;
- ***X*** – частота 8-12 ГГц, використовується для моніторингу погоди, керування повітряним рухом та іншому. Дозволяє отримати дані РСА високої та надвисокої розрізненності. Довжина хвилі 2.5-3.75 см;
- ***Ku*** – частота 12-18 ГГц, в основному використовується для передачі даних, а в радарному зондуванні Землі може застосовуватися для супутникової альтиметрії. Довжина хвилі становить 1,66-2,5 см;
- ***K*** – частота 18-27 ГГц, може бути використаний для вимірювань поглинань води в атмосфері. Довжина хвилі цього діапазону складає 1,1-1,66 см;
- ***Ka*** – частота 27-40 ГГц, використовується для передачі даних, а також для надточного позиціювання об'єктів. У супутникових РСА цей канал може використовуватись як допоміжний засіб для контролю повітряного простору навколо аеропортів. Довжина хвилі становить 7,5 мм – 1,1 см.

В табл. 1.1 наведено основні характеристики сучасних розповсюджених супутникових радарних знімальних систем (*Chen et al., 2017*).

Однією з найбільш популярних та широко застосовуваних супутникових систем, обладнаних двополяризаційним (адже працює лише в обраному режимі, зазвичай vv та vh, поляризацій) радаром з синтезованою апертурою, є сузір'я супутників Sentinel-1, завдяки їх високій просторовій розрізненності, роботі в найбільш практичному радарному діапазоні *C*, і доступності: дані Sentinel-1 є

регулярними для всієї суші Землі з 2014 року, відкритими для споживання та безкоштовними (*Geudtner & Torres, 2012*).

Таблиця 1.1

Характеристики супутникових радарних знімальних систем

Супутникова система (режим)	**Діапазон**	**Поляризації**	**Просторова розрізненність, м**	**Ширина смуги знімання, км**	**Рік запуску**
Seasat	*L*	*hh*	25	100	1978
SIR-A	*L*	*hh*	30	50	1981
Almaz-1	*S*	*hh*	15	20-45	1991
JERS-1	*L*	*hh*	18	76	1992
X-SAR	*X*	*vv*	25	15-40	1994
ERS-2	*C*	*hh*	25	100	1995
SAR-SAT	*C*	*hh*	10-100	50-170	1995
Priroda	*S, L*	*hh*	30	120	1995
Radarsat-1	*C*	*hh*	10-100	50-500	1995
SIR-C	*C*	*hh*	30	60	2000
ALOS-1	*L*	*hh, vv, hv, vh*	10-100	70-250	2002
COSMO-Sky Med (Strip Map)	*X*	*hh, vv, hv, vh*	3-20	30-40	2007
TerraSAR-X (Strip Map)	*X*	*(hh,vv), (hh,hv), (vv/vh)*	3	30	2007
Sentinel-1 (Interferometric Wide)	*C*	*vv+vh, hh+hv, hh, vv*	5×20	250	2014
ALOS-2 (Strip Map)	*L*	*hh, vv, hv*	3, 6, 9	50-70	2014

1.2 Огляд супутникових радарних даних

Супутникові радарні дані, на відміну від класичних оптичних знімків, потребують складнішої та ресурсовитратної попередньої обробки, тому, зазвичай, супутникові радарні дані розповсюджуються з певним рівнем обробки (*Cumming &*

Wong, 2005). Саме за рівнем обробки і варто розділяти базові типи супутникових радарних даних.

Рівні обробки багато в чому визначаються конструктивними особливостями радарних сенсорів і тому в більшості випадків стандартизуються виробниками та операторами супутникових радарних систем по-різному. Але існують певні загальні рекомендації міжнародних організацій, таких як CEOS (Committee on Earth Observation Satellites), які підтримуються більшістю розробників РСА, хоч і не повністю. Ці рекомендації в основному стосуються початкових рівнів обробки радарних даних, з нульового по перший, і більш-менш уніфіковані (*Hein, 2004*). Більш докладно рівні обробки радарних даних варто розглянути на прикладі відкритих та широко розповсюджених супутникових даних Sentnel-1. Отже, супутникові радарні дані Sentinel-1 поділяються на такі рівні обробки (*Miranda et al., 2012*):

- **нульовий рівень** обробки (Level-0) – до цього рівня належать сирі (**Raw**) дані, отримані за допомогою РСА. Ці дані стиснуті за допомогою гнучкого динамічного блокового адаптивного квантування (Flexible Dynamic Block Adaptive Quantization – FQBAQ), що дозволяє, збільшити кількість біт, якими описуються яскравості розсіювання зворотного радіолокаційного сигналу. Ці дані є розфокусованими і, для подальшого використання, вимагають декомпресування та обробки за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для фокусування радіолокаційних зображень;
- **перший рівень** обробки (Level-1) – до цього рівня належать два типи даних: повні комплексні дані, що містять значення як амплітуди, так і фази радарного сигналу SLC (Single Look Complex) та дійсні дані лише амплітуди радарного відбиття GRD (Ground Range Detected). Сфокусовані дані рівня обробки 1 призначені для вжитку аудиторією більшості користувачів. Продукти SLC є не лише сфокусованими, а також геометрично прив’язаними відповідно до орбіти супутника та його положення під час зйомки, і надаються у вигляду нахилу та дальності від радару до кожного елемента зображення (slant-range). Продукти GRD є сфокусованими, когерентно

накопиченими (multi-looked), що дозволяє знизити рівень спекл-шумів, та спроектованими на земну поверхню, що описується еліпсоїдною моделлю Землі WGS84;

- **другий рівень** обробки (Level-2) складається з геоприв'язаних інформаційних продуктів, отриманих спеціальною тематичною переробкою даних рівня обробки 1. До другого рівня належать інформаційні продукти для спеціалізованих потреб користувачів, наприклад, продукти з даними про стан морської поверхні OCN (Ocean), поле вітру OWI (Ocean Wind Field), спектр коливань OSS (Ocean Swell Spectra), поверхневу радіальну швидкість SRV (Surface Radial Velocity) та інші. При чому різні типи продуктів рівня обробки 2 є похідними від базових продуктів рівня обробки 1, наприклад, дані OWI отримуються за допомогою обробки даних GRD, а SRV отримуються з SLC.

Можливість перетворення сирих радіолокаційних даних у той чи інший продукт також залежить і від режиму супутникового радіолокаційного знімання. Наприклад, для Sentinel-1 застосовуються такі режими знімання (*Ustin & Middleton, 2021*):

- **Stripmap** (SM) – в цьому режимі дані отримуються у вигляді прямої (не враховуючи зміщення радару) смуги, поділеної на рівні проміжки, де кожен проміжок знімався радаром окремо шляхом опромінення місцевості радаром під певним кутом (чим далі від радару ділянка, тим більший кут). Для Sentinel-1 – це знімання 6-ти ділянок шириною 80 км зі зміною кута нахилу знімання від 18,3° до 46,8°;
- **Interferometric Wide swath** (IW) – це основний режим зйомки Sentinel-1. Він полягає у зніманні смуги шириною 250 км у три субсмуги IW1, IW2 та IW3. Кожна субсмуга сканується за азимутом на окремі ділянки (bursts);
- **Extra-Wide swath** (EW) – формується зображення ширшої смуги знімання за принципом аналогічним до режиму зйомки IW. Але для цього вся смуга знімання поділяється на 5 субсмуг розміром поменше, ніж ті, для яких виконується зйомка IW;

- **Wave** (WV) – спеціальний режим зйомки, при якому дані отримуються у вигляді хвилі, де нез'єднані фрагменти знімання земної поверхні лежать, умовно, на двох лініях. В цьому режимі дані отримуються у вигляді віньєток розміром 20×20 км, які розташовані на відстані 100 км одна від одної під певними двома кутами нахилу, що чергуються. Наприклад, друга отримана після першої під кутом 36°, третя від другої під кутом 23°, а четверта від третьої знову під кутом 36° і так далі.

Таким чином, певні види продуктів радіолокаційного знімання можуть бути отримані лише при певних режимах зйомки, наприклад, GRD не може бути отриманий по результатам зйомки WV.

1.3 Огляд сучасних методів підвищення інформативності радарних даних

Інформативність супутникових даних відіграє значну роль у можливостях їх застосування. Підвищення інформативності залежить від різних факторів, таких як: інформативність самої сцени зображення (*Станкевич, 2006*), методів обробки радарних даних (*Rukhovich et al., 2022*) та застосованих методів підвищення інформативності радарних даних, наприклад, завдяки підвищенню їх просторової розрізненності (*Stankevich et al., 2016*).

1.3.1 Інформативність супутникових зображень

Інформативність супутникових зображень добре досліджена різними науковцями (*Кононов, 1991*; *Попов & Станкевич, 2006*) і, зазвичай, поділяється на дві основні складові: інформаційна ємність та інформативність у вирішенні конкретної задачі (*Станкевич, 2008*). Одним із вагомих показників при кількісній оцінці інформативності супутникових зображень є просторова розрізненність (*Amro et al., 2011*). Отже, підняття просторової розрізненності нерозривно пов'язано з підняттям інформативності супутникового зображення. Окрім

розрізненності, інформативність космічних зображень визначається також радіометричними (спектральними) відмінностями (контрастами) та відношенням “сигнал-шум” в зображенні (*Кононов & Федоровский, 1996*).

1.3.2 Методи обробки радарних даних

Методи обробки радарних даних можна поділити на такі категорії: методи відновлення і попередньої обробки радарних даних (*Filipponi, 2019*; *Mandal et al., 2019*), різні методи покращення якості радіолокаційних зображень і методи тематичної обробки та інтерпретації радіолокаційних зображень (*Jansing, 2020*).

До методів відновлення і попередньої обробки радарних даних належать різні методи цифрової обробки, які стосуються формування цілісного радарного зображення із заданими властивостями. Наприклад, для задач інтерферометрії обробка полягає у використанні даних, отриманих в режимі IW, їх взаємної геометричної прив’язки (coregistration), виборі ділянок знімання, коригування орбіти, зворотному геокодуванню та формуванню інтерферограми (*Braun & Veci, 2021*). Для попередньої обробки сформованих радарних знімків застосовується багатий арсенал відомих методів цифрової обробки космічних зображень (*Кашкин, Сухинин, 2001*).

До методів підвищення якості супутникових радарних даних належать методи фільтрування зображення (згладження, загострення, частотні фільтри) (*Kourgli & Oukil, 2013*; *Oguzhanoglu et al., 2022*), методи надрозрізненності (superresolution) (*Benecki et al., 2018*; *Stankevich et al., 2018*; *Станкевич та ін., 2023*) та методи засновані на використанні нейронних мереж та машинного навчання (*Rohith & Kumar, 2019*; *Müller et al., 2020*; *Dorr, 2020*; *Stankevich et al., 2021*).

Методи фільтрування, як правило, дозволяють виокремити певну інформацію з наявної, наприклад загострити певні межі об’єктів чи пригнічити шум (*Кобилін & Творошенко, 2021*). Хоча, при правильному використанні, ці методи і можуть підвищити інформативність зображення для вирішення конкретної задачі, але привнести нову інформацію в зображення вони не здатні

через обмеження джерела даних (такі методи працюють лише з одним зображенням). Тим не менш, вони є доволі гнучкими і можуть використовуватись у якості доповнення для будь-яких інших методів обробки (*Painam & Manikandan, 2021*). Важливим саме для радарних зображень різновидом фільтрації є фільтрація специфічних спекл шумів (*Lee et al., 1994*), які виникають внаслідок інтерференції відбитих від земної поверхні радарних сигналів при когерентному їх накопиченні (*Singh & Shree, 2016*).

Методи засновані на нейронних мережах та машинному навчанні хоча і досить популярні, але все ще розвиваються і знайшли найбільше використання для задач широкого вжитку, а не в задачах дистанційного зондування Землі. Це пов'язано з важкістю відслідковування логіки роботи нейронних мереж, адже складні нейронні мережі складаються з багатьох шарів, які самостійно себе налаштовують базуючись на методі навчання та навчальній вибірці, що ускладнює інтерпретацію результатів обробки нейронними мережами супутникових зображень і, навіть, ставить під сумнів їх валідність (*Ma et al., 2019*). Адже, на відміну від звичайних медіа зображень, супутникові зображення повинні відображати точну інформацію в кожному пікселі. Іншою проблемою застосування нейронних мереж в ДЗЗ виступає складність та трудомісткість створення навчальних вибірок (наборів даних) достатнього – дуже великого – обсягу розмічених супутникових зображень різних типів, включаючи багатоспектральні, гіперспектральні та радарні (*Xu et al., 2023*).

Незважаючи на вказані недоліки, методи на основі глибоких нейронних мереж є досить перспективними як для тематичної, так і для попередньої обробки супутникових радарних даних. Зокрема, нейронні мережи зарекомендували себе ефективним засобом придушення спекл шумів радарних зображень (*Wang et al., 2022*).

Натомість, методи надрозрізненності здатні об'єднувати інформацію з декількох супутникових зображень низької розрізненності для побудови одного спільного зображення високої розрізненності. А виконавчим механізмом відновлення зображення високої розрізненності може бути один з відомих методів

надрозрізненності, математична модель якого повністю піддається аналізу, а, отже, і інтерпретації його результатів. Такими методами можуть бути різні регуляризації, наприклад, Тихонова (*Zhang et al., 2008*), Лоренца (*Patanavijit & Jitapunkul, 2007*), Соболєва (*Buzykanov, 2012*) і можуть бути застосовані в різних областях обробки: просторовій, частотній, вейвлет і т. д. (*Taubman & Marcellin, 2002*). Обробка в частотній області здається досить перспективною завдяки більш високій обчислювальній ефективності, а також простоті виконання низки допоміжних операцій, таких як кореляційна взаємна реєстрація вхідних зображень (*Vandewalle et al., 2006*) та обчислення субпіксельних зсувів між ними (*Balci & Foroosh, 2006*).

1.4 Постановка задачі

Успішне виконання задачі дослідження, а саме – розробки методики підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою – потребує виконання кількох окремих завдань: огляду існуючих методів підвищення інформативності радарних даних та встановлення взаємозв’язку інформативності з просторовою розрізненністю супутникових радіолокаційних зображень, розробки моделей зворотного розсіювання радарного сигналу та власне підвищення просторової розрізненності, розробки необхідних алгоритмів і процедур обробки багатополяризаційних супутникових радіолокаційних зображень та на їх основі – повної методики підвищення інформативності, перевірки її працездатності шляхом тестування на реальних радіолокаційних зображеннях і кількісного оцінювання одержаних результатів, а також надання рекомендацій по подальшому застосуванню “методики”.

Порядок виконання часткових завдань та їх взаємозв’язок описується схемою дослідження на рис. 1.1

Отже, на основі проведеного огляду існуючих джерел, форматів та методів обробки і підвищення інформативності радарних даних зрозуміло, що дослідження має проводитися по двох майже паралельних напрямках: перетворення

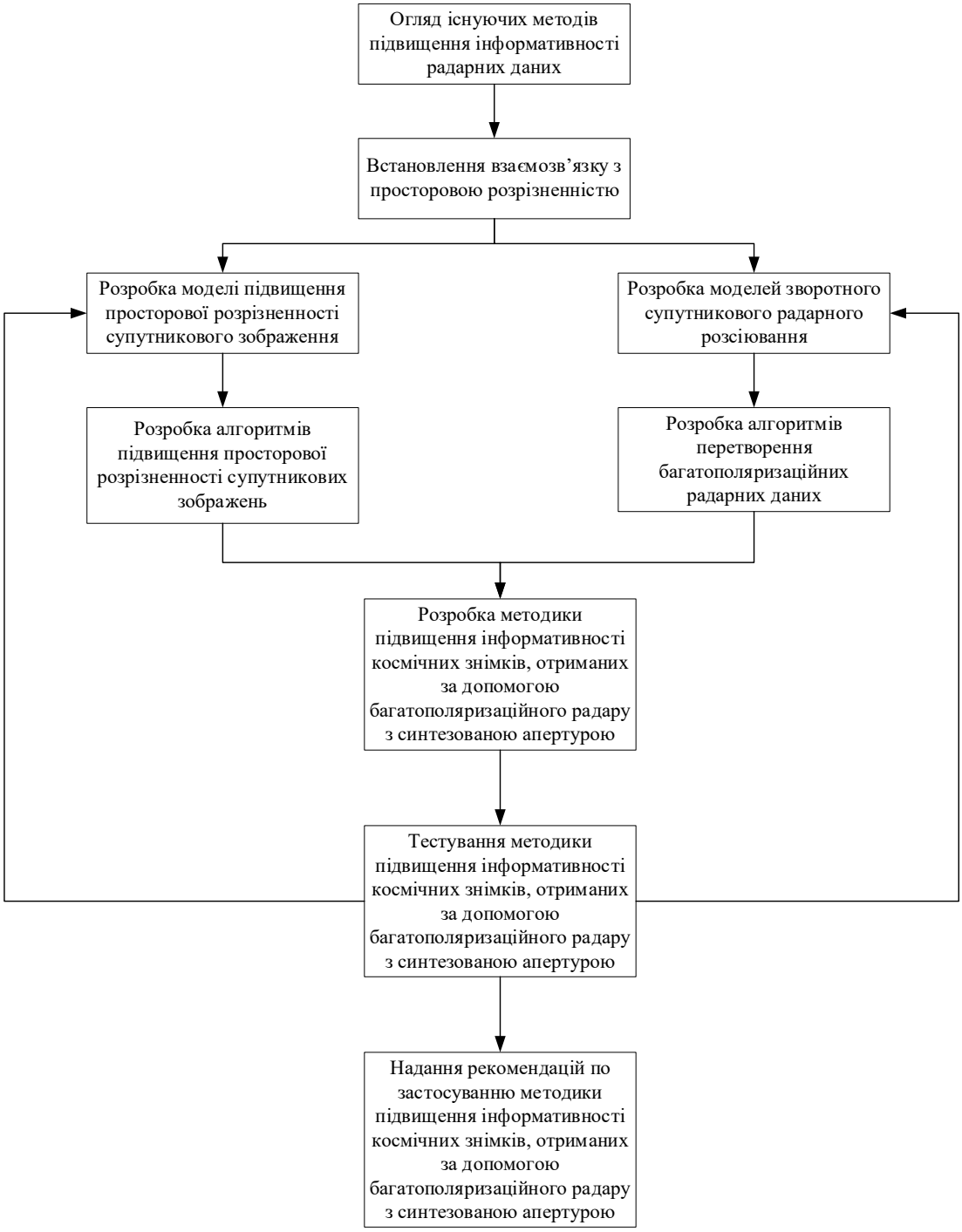


Рис. 1.1 Схема проведення дослідження з розробки методики підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою

багатополяризаційних радарних даних до певного спільного вигляду, придатного для забезпечення надрозрізненності, та підвищення просторової розрізненності одержаного набору супутникових зображень. Обидві гілки дослідження потребують розробки власних моделей і алгоритмів, які по готовності мають

узгодитися та поєднатися в єдиній методиці підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою.

Висновки до першого розділу

В даному розділі було оглянуто існуючі типи супутникових сенсорів (оптичні та радарні), їх можливі застосування у різних задачах ДЗЗ.

В підрозділі 1.1 розглянуто класифікацію видових супутникових сенсорів за різними характеристиками. Оптичні сенсори було розділено за кількістю робочих спектральних діапазонів, а радарні – за кількістю поляризацій та за робочими радіохвильовими діапазонами. Було стисло описано деякі існуючі радарні супутникові системи та їх основні характеристики.

В підрозділі 1.2 був проведений аналіз радарних даних за видами їх інформаційних продуктів та методами отримання.

В підрозділі 1.3 розглянуті основні методи підвищення інформативності супутникових знімків, зазначено зв’язок інформативності з важливою характеристикою супутникових зображень – просторовою розрізненністю. Проаналізовано різні методи обробки радарних даних з метою підняття просторової розрізненності, наведені їх переваги та недоліки.

В кінці розділу було наведено формалізовану постановку наукової задачі разом із схемою проведення необхідних досліджень для розробки методики підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою.

Список використаних джерел

Lee J.-S., & Pottier E. (2017). *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*. Boca Raton: CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781420054989

Navalgund, R. R., Jayaraman, V., & Roy, P. S. (2007). Remote sensing applications: An overview. *Current Science*, *93*(12), 1747–1766. https://www.jstor.org/stable/24102069

Jawd, S. M., Yahya Almuhana, W. H., & Hussein, H. A. (2021). Technologies and Types of Remote Sensors. *Journal of Advances in Electrical Devices*, *6*(3), 15–23.

Zhu, L., Suomalainen, J., Liu, J., Hyyppä, J., Kaartinen, H., & Haggren, H. (2018). A Review: Remote Sensing Sensors. *Multi-Purposeful Application of Geospatial Data*. https://doi.org/10.5772/intechopen.71049

Parkinson, C. L. (2001). Satellite Passive Microwave Measurements of Sea Ice. In: *Elsevier EBooks*, 2531–2539. https://doi.org/10.1006/rwos.2001.0336

Efremenko D., & Kokhanovsky, A. A. (2021). Foundations of Atmospheric Remote Sensing. In: *Springer eBooks*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66745-0

Rogers, R. F., Velden, C. S., Zawislak, J., & Zhang, J. A. (2019). Tropical Cyclones and Hurricanes: Observations. In: *Elsevier EBooks*. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.12065-2

Popov, M., Stankevich, S., Kozlova, A., Piestova, I., Lubskiy, M., Titarenko, O., Svideniuk, M., Andreiev, A., Lysenko, A., & Singh, S. K. (2021). Long-Term Satellite Data Time Series Analysis for Land Degradation Mapping to Support Sustainable Land Management in Ukraine. *Advances in Geographical and Environmental Sciences*, 165–189. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4768-0_11

De, A., Laneve, G., Cerra, D., Mielewczyk, M., Garcia, M., Santilli, G., Cadau E., & Joyanes G. (2007). On the Application of Nighttime Sensors for Rapid Detection of Areas Impacted by Disasters. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 17–36. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72108-6_2

Kerle, N., Bakker, W. H., Grabmaier, K. A., Huurneman, G. C., van der Meer, F. D., Prakash, A., Tempfli, K., Gieske, A. S. M., Hecker, C. A., Janssen, L. L. F., Parodi,

G. N., Reeves, C. V., Weir, M. J. C., Gorte, B. G. H., Horn, J. A., Pohl, C., van Ruitenbeek, F. J. A., & Woldai, T. (2004). *Principles of remote sensing: an introductory textbok*. Enschede: ITC. https://research.utwente.nl/en/publications/principles-of-remote-sensing-an-introductory-textbook-3

Zhao, M., Olsen, P. A., & Chandra, R. (2021). Seeing Through Clouds in Satellite Images. *ArXiv (Cornell University)*. https://doi.org/10.48550/arxiv.2106.08408

Braun, A. (2021). Sentinel-1 Toolbox DEM generation with Sentinel-1 Workflow and challenges. *Open Geosciences*, 13(1), 0246. https://doi.org/10.1515/geo-2020-0246

Rizaev, I. G., Karakuş, O., Hogan, S. J., & Achim, A. (2022). Modeling and SAR imaging of the sea surface: A review of the state-of-the-art with simulations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *187*, 120–140. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.02.017

Tran, V. A., Le, T. L., Nguyen, N. H., Le, T. N., & Tran, H. H. (2021). Monitoring Vegetation Cover Changes by Sentinel-1 Radar Images Using Random Forest Classification Method. *Inżynieria Mineralna*, *1*(2). https://doi.org/10.29227/im-2021-02-41

Lavreniuk, M., Shelestov, A., Kussul, N., Rubel, O., Lukin, V., & Egiazarian, K. (2019). Use of Modified BM3D Filter and CNN Classifier for SAR Data to Improve Crop Classification Accuracy. *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. https://doi.org/10.1109/ukrcon.2019.8879805

Shelestov, A., Lavreniuk, M., Vasiliev, V., Shumilo, L., Kolotii, A., Yailymov, B., Kussul, N., & Yailymova, H. (2020). Cloud Approach to Automated Crop Classification Using Sentinel-1 Imagery. *IEEE Transactions on Big Data*, *6*(3), 572–582. https://doi.org/10.1109/tbdata.2019.2940237

Kussul, N., Lavreniuk, M., Shelestov, A., & Skakun, S. (2018). Crop inventory at regional scale in Ukraine: developing in season and end of season crop maps with multi-temporal optical and SAR satellite imagery. *European Journal of Remote Sensing*, *51*(1), 627–636. https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1454265

Freeman, A., Evans, D., van Zyl, J.J. (1996). SAR Applications in the 21st Century. *European Conference on Synthetic Aperture Radar* (EUSAR'96). Königswinter: VDE-Verlag, 1996, 25–30.

Andersen, H.-E., Reutebuch, S. E., & McGaughey, R. J. (2006). Active remote sensing. *Computer Applications in Sustainable Forest Management*, 43–66. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4387-1_3

Shaw, G. A., & Burke, H. K. (2003) Spectral imaging for remote sensing. *Lincoln Laboratory Journal, 14(1)*, 3–28. https://archive.ll.mit.edu/publications/journal/pdf/vol14_no1/14_1remotesensing.pdf

Wong, M. S., Zhu, X., Abbas, S., Kwok, C. Y. T., & Wang, M. (2021). Optical Remote Sensing. *Urban Informatics*, 315–344. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8983-6_20

Gianinetto, M., & Lechi, G. (2004). The Development of Superspectral Approaches for the Improvement of Land Cover Classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *42*(11), 2670–2679. https://doi.org/10.1109/tgrs.2004.835347

Schowengerdt, R. A. (2007). *Remote sensing: Models and methods for image processing*. SanDiego: Academic Press, 560 p.

Landgrebe, D. A. (2003). *Signal Theory Methods in Multispectral Remote Sensing*. Hoboken: John Wiley. https://doi.org/10.1002/0471723800

Xiong, X., Sun, J., Esposito, J. J., Guenther, B., & Barnes, W. L. (2003). *MODIS reflective solar bands calibration algorithm and on-orbit performance*. Proceedings of SPIE, 4891, 95–104. https://doi.org/10.1117/12.466096

Qian, S.-E. (2020). *Hyperspectral Satellites and System Design*. Boca Raton: CRC Press, 626 p. http://dx.doi.org/10.1201/9780429266201

Бурштинська, Х.В., & Станкевич, С.А. (2013). *Аерокосмічні знімальні системи*. Львів: Львівська політехніка, 316 с.

Tsai, Y.-L. S., Klein, I., Dietz, A., & Oppelt, N. (2020). Monitoring Large-Scale Inland Water Dynamics by Fusing Sentinel-1 SAR and Sentinel-3 Altimetry Data and by

Analyzing Causal Effects of Snowmelt. *Remote Sensing*, *12*(23), 3896. https://doi.org/10.3390/rs12233896

Cheney, M., & Borden, B. (2009). Problems in synthetic-aperture radar imaging. *Inverse Problems*, *25*(12), 123005. https://doi.org/10.1088/0266-5611/25/12/123005

Richards, J. A. (2009). Remote Sensing with Imaging Radar. In: *Signals and Communication Technology*. Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02020-9

Krieger, G., Gebert, N., Younis, M., Bordoni, F., Patyuchenko, A., & Moreira, A. (2008) Advanced Concepts for Ultra-Wide-Swath SAR Imaging. *European Conference on Synthetic Aperture Radar* (EUSAR), 2, 31–34. https://core.ac.uk/download/pdf/11134159.pdf

Rosen P., Kim Y., Eisen H., Shaffer S., Veilleux L., Hensley S., Chakraborty M., Misra T., Satish R., Putrevu D., & Bhan R. (2013) A Dual-Frequency Spaceborne SAR Mission Concept. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (IGARSS), 2293–2296. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2013.6723276

Yang, R., Dai, B., Tan, L., Liu, X., Yang, Z., Li, H. (2021) *Polarimetric Microwave Imaging*. Singapore: National Defence Industry Press. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-8897-6

Dmitriev, A. V., & Chimitdorzhyiev, T. N. (2016). New Type of Polarization Signatures for Radar Images of the Earth Cover with Fractal Properties. *Автометрия*, *3*. https://doi.org/10.15372/aut20160305

Teferi, E., Bantider, A., Zeleke, G., Bewket, W., & Kassawmar, T. (2021). Mapping Aboveground Carbon Stocks and Emissions Induced by Land Use and Land Cover Changes in Ethiopia: A Remote Sensing Approach. *Working Paper No. 3*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12540.67209.

Chen, F., Lasaponara, R., & Masini, N. (2017). An overview of satellite synthetic aperture radar remote sensing in archaeology: From site detection to monitoring. *Journal of Cultural Heritage*, *23*, 5–11. https://doi.org/10.1016/j.culher.2015.05.003

Geudtner, D., & Torres, R. (2012). *Sentinel-1 system overview and performance*. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2012), Munich: IEEE, 1719–1721. https://doi.org/10.1109/igarss.2012.6351191

Cumming, I. G., & Wong, F. H.-C. (2005). *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*. Boston: Artech House, 660 p.

Hein, A. (2004). Processing of SAR Data. In: *Springer eBooks*. https://doi.org/10.1007/978-3-662-09457-0

Miranda, N., Rosich, B., & Putignano, C. (2012). *The Sentinel-1 data processor and operational products*. https://doi.org/10.1109/igarss.2012.6351188

Ustin, S. L., & Middleton, E. M. (2021). Current and near-term advances in Earth observation for ecological applications. *Ecological Processes*, *10*(1). https://doi.org/10.1186/s13717-020-00255-4

Станкевич, С. А. (2006) Кількісне оцінювання інформативності гіперспектральних аерокосмічних знімків при вирішенні тематичних задач дистанційного зондування Землі. *Доп. НАН України*, 8, 53–58.

Rukhovich, D. I., Koroleva, P. V., Rukhovich, A. D., & Komissarov, M. A. (2022). Informativeness of the Long-Term Average Spectral Characteristics of the Bare Soil Surface for the Detection of Soil Cover Degradation with the Neural Network Filtering of Remote Sensing Data. *Remote Sensing*, *15*(1), 124. https://doi.org/10.3390/rs15010124

Stankevich, S. A., Shklyar, S., Podorvan, V. N., & Lubskyi, M. S. (2016). *Thermal infrared imagery informativity enhancement using sub-pixel co-registration*. https://doi.org/10.1109/dt.2016.7557181

Кононов, В. И. (1991) Связь информационных и вероятностных оценок систем формирования изображений (иконических систем). *Оптико-механическая промышленность*, 11, 13–18.

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*. М.: ИКИ РАН, 1, 106–112.

Станкевич, С. А. (2008) Информативность оптических диапазонов дистанционного наблюдения Земли из космоса: практические алгоритмы. *Космічна наука і технологія*, 14(2), 22-27. https://doi.org/10.15407/knit2008.02.022

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. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2011(1), 79. https://doi.org/10.1186/1687-6180-2011-79

Кононов, В. И., Федоровский, А. Д. (1996). Обоснование методики оценки эффективности космических оптических систем дистанционного зондирования Земли. *Космічна наука і технологія*, *2*(1-2), 53–56. https://doi.org/10.15407/knit1996.01.053

Filipponi, F. (2019). Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. *Proceedings*, *18*(1), 11. https://doi.org/10.3390/ecrs-3-06201

Mandal, D., Vaka, D. S., Bhogapurapu, N. R., Vanama, V. S. K., Kumar, V., Rao, Y. S., & Bhattacharya, A. (2019). Sentinel-1 SLC Preprocessing Workflow for Polarimetric Applications: A Generic Practice for Generating Dual-pol Covariance Matrix Elements in SNAP S-1 Toolbox. *www.preprints.org*. https://doi.org/10.20944/preprints201911.0393.v1

Jansing, E. D. (2020). *Introduction to Synthetic Aperture Radar: Concepts and Practice*. New York: McGraw-Hill, 208 p.

Braun, A., & Veci, L. (2021). Sentinel-1 Toolbox TOPS Interferometry Tutorial. *SkyWatch Space Applications Inc*, 25. https://step.esa.int/docs/tutorials/ S1TBX TOPSAR Interferometry with Sentinel-1 Tutorial_v2.pdf

Кашкин, В. Б., Сухинин, А. И. (2001) *Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений*. М.: Логос, 264 с.

Kourgli, A., & Oukil, Y. (2013). Very High Resolution Satellite Images Filtering. *Eighth International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications* (BWCCA). Compiegne, IEEE, 465-470. https://doi.org/10.1109/bwcca.2013.81

Oguzhanoglu, S., Kapucuoglu, I., & Sunar F. (2022). Comparison of Satellite IMAGE Denoising Techniques in Spatial and Frequency Domains. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLIII-B3-2022*, 1241–1247. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xliii-b3-2022-1241-2022

Benecki, P., Kawulok, M., Kostrzewa, D., & Skonieczny, L. (2018). Evaluating super-resolution reconstruction of satellite images. *Acta Astronautica*, *153*, 15–25. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.07.035

Stankevich, S., Lybskyi, M., & Lysenko, A. (2018). Aerial imaging superresolution based on subpixel processing of images acquired by quadcopter. *Ukraïns'kij Žurnal Distancìjnogo Zonduvannâ Zemlì*, *15*, 40–42. https://doi.org/10.36023/ujrs.2017.15.113

Спосіб підвищення просторової розрізненності розподілу температури земної поверхні, одержаного дистанційно. Станкевич С. А., Пєстова І. О., Лубський М. С., Лисенко А. Р. : пат. 126778 Україна : МПК G06T5/50, G06T7/32, G06V10/20, G06V10/36. № a 2021 01200; заявл. 10.03.2021; опубл. 01.02.2023, Бюл. №5

Rohith, G., & Kumar, L. S. (2019). Performance analysis of Satellite Image Super Resolution using Deep Learning Techniques. *IEEE Bombay Section Signature Conference* (IBSSC 2019), Mumbai: IEEE, 1-6 https://doi.org/10.1109 /ibssc47189.2019.8973105

Müller, M. U., Ekhtiari, N., Almeida, R. M., & Rieke, C. (2020). Super-Resolution of Multispectral Satellite Images Using Convolutional Neural Networks. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *V-1-2020*, 33–40. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-v-1-2020-33-2020

Dorr, F. (2020). Satellite Image Multi-Frame Super Resolution Using 3D Wide-Activation Neural Networks. *Remote Sensing*, *12*(22), 3812. https://doi.org/10.3390/rs12223812

Stankevich, S., Piestova, I., Lubskyi, M. S., Shklyar, S., Lysenko, A., Maslenko O., & Rabcan, J. (2021). Knowledge-Based Multispectral Remote Sensing Imagery Superresolution. *Studies in Computational Intelligence*, 219–236. https://doi.org/10.1007/978-3-030-74556-1_13

Кобилін О.А., Творошенко І.С. *Методи цифрової обробки зображень*. Харків: ХНУРЕ, 2021, 124 с.

Painam, R. K., & Manikandan, S. (2021). A comprehensive review of SAR image filtering techniques: systematic survey and future directions. *Arabian Journal of Geosciences*, *14*(1). https://doi.org/10.1007/s12517-020-06416-1

Lee, J. S., Jurkevich, L., Dewaele, P., Wambacq, P., & Oosterlinck, A. (1994). Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review. *Remote Sensing Reviews*, *8*(4), 313–340. https://doi.org/10.1080/02757259409532206

Singh, P., & Shree, R. (2016). Analysis and effects of speckle noise in SAR images. *2nd International Conference on Advances in Computing, Communication & Automation* (ICACCA 2016). Bareilly: IEEE, 1–5. https://doi.org/10.1109/icaccaf.2016.7748978

Ma, L., Liu, Y., Zhang, X., Ye, Y., Yin, G., & Johnson, B. A. (2019). Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *152*, 166–177. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.015

Xu, L., Shi, S., Liu, Y., Zhang, H., Wang, D., Zhang, L., Wan, L., & Chen, H. (2023). A large-scale remote sensing scene dataset construction for semantic segmentation. *International Journal of Image and Data Fusion*, 1–25. https://doi.org/10.1080/19479832.2023.2199005

Wang, C., Yin, Z., Ma, X., & Yang, Z. (2022). SAR Image Despeckling Based on Block-Matching and Noise-Referenced Deep Learning Method. *Remote Sensing*, *14*(4), 931–931. https://doi.org/10.3390/rs14040931

Zhang, X., Lam, E. Y., Wu, E. X., & Wong, K. K. E. (2008). Application of Tikhonov Regularization to Super-Resolution Reconstruction of Brain MRI Images. In: *Springer EBooks*, 51–56. https://doi.org/10.1007/978-3-540-79490-5_8

Patanavijit, V., & Somchai Jitapunkul, S. (2007). A Lorentzian Stochastic Estimation for a Robust Iterative Multiframe Super-Resolution Reconstruction with Lorentzian-Tikhonov Regularization. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, *2007*(1). https://doi.org/10.1155/2007/34821

Buzykanov, S. N. (2012). Enhancement of poor resolution text images in the weighted Sobolev space. *19th International Conference on Systems, Signals and Image Processing* (IWSSIP), Vienna, IEEE, 536–539.

Taubman, D., & Marcellin, M. W. (2002). Image Transforms. In: *Springer EBooks*, 143–207. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0799-4_4

Vandewalle, P., Süsstrunk, S., & Vetterli, M. (2006). A Frequency Domain Approach to Registration of Aliased Images with Application to Super-resolution. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, *2006*(1). https://doi.org/10.1155/asp/2006/71459

Balci, M. E., & Foroosh, H. (2006). Subpixel estimation of shifts directly in the Fourier domain. *IEEE Transactions on Image Processing*, *15*(7), 1965–1972. https://doi.org/10.1109/tip.2006.873457

РОЗДІЛ 2
РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ, ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ БАГАТОПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО РАДАРУ З СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ

Як зазначено в пункті 1.3.1 цієї роботи, інформативність космічних знімків в найбільшій ступені залежить від їх просторової розрізненності, а тому задачу підвищення їх інформативності можна розглядати як задачу підвищення просторової розрізненності. Підвищення просторової розрізненності багатополяризаційних радіолокаційних супутникових зображень вимагає відповідного математичного забезпечення, зокрема розроблення моделей перетворення різнополяризаційних радіолокаційних зображень до єдиної фізичної величини – діелектричної проникності земної поверхні, та власне моделі підвищення просторової розрізненності двох отриманих субпіксельно зміщених супутникових зображень одним з методів надрозрізненності.

2.1 Модель підвищення просторової розрізненності супутникового зображення

Модель підвищення просторової розрізненності супутникового зображення складається з оцінки цілопіксельного зсуву зображень, оцінки субпіксельного зсуву зображень та відновлення зображення підвищеної розрізненності (*Stankevich et al., 2020а*).

2.1.1 Оцінка цілопіксельного зсуву пари зображень

Для оцінки цілопіксельного зсуву, за допомогою перетворення Фур’є обчислюється кореляційна функція пари зображень (*Stankevich et al., 2020б*). Нехай

дано набір точок $\{x_i\}$ та $\{y_i\}$, $i = \overline{1, m}$. Для одновимірного випадку кореляція r двух наборів точок може бути розрахована за наступною формулою:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{m}(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{m}(y_i - \bar{y})^2}}, \tag{2.1}$$

де $\bar{x}$ – середнє значення набору $\{x_i\}$, а $\bar{y}$ – середнє значення набору $\{y_i\}$.

Чисельник у формулі (2.1) є коваріацією c_k. Так як значення кореляції не залежить від середніх значень, то коваріація може бути записана як:

$$c_k = \sum_{i=1}^{m} x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^{m} x_i \sum_{i=1}^{m} y_i. \tag{2.2}$$

У формулі (2.2) сума $\sum_{i=1}^{m} x_i$ може бути обчислена наперед, а для обчислення $\sum_{i=1}^{m} x_i \cdot y_i$ може бути використано швидке перетворення Фур'є. Знаменник у формулі (2.1) є коренем добутку дисперсій і може бути обчислений аналогічно, як і чисельник.

2.1.2 Оцінка субпіксельного зсуву пари зображень

При оцінюванні субпіксельного зсуву пари зображень (*Stankevich et al., 2018*) однієї сцени, тобто, коли зображення суміщені цілопіксельно і зміщення між ними по горизонталі чи вертикалі не перевищує розміру одиниці піксела, друге зображення (з пари зображень) розглядається як паралельне перенесення першого зображення. Отже, задачею є знаходження вектору цього паралельного перенесення.

Загальний алгоритм визначення субпіксельного зміщення пари зображень відштовхується від наступних припущень:

1) істинне значення субпіксельного зміщення відповідає максимальній кореляції між двома зображеннями;
2) обробка здійснюється в частотній області для зменшення обчислювальних затрат;
3) пригнічення низькочастотної компоненти може бути використане для інтерполяції дискретного зображення.

Нехай є два вхідних зображення Y_1 та Y_2 розмірності $m \times n$. Розмірність піксела – лінійна одиниця. Дискретне перетворення Фур'є має наступний вигляд:

$$\hat{Y}_k(\theta, \vartheta) = \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} Y_k(x, y) e^{-2\pi i(\theta x + \vartheta y)},$$

де $k = \overline{1,2}$, $\theta = \cdots, -\frac{2}{m}, -\frac{1}{m}, 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \cdots$ та $\vartheta = \cdots, -\frac{2}{n}, -\frac{1}{n}, 0, \frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \cdots$. Значення $\widehat{Y_k}(\theta, \vartheta)$ розглядаються при таких обмеженнях: $|\theta| \leq \frac{1}{2}$ та $|\vartheta| \leq \frac{1}{2}$.

Внесок низькочастотної компоненти може бути зменшено домножуючи результат перетворення Фур'є на функцію $\omega(\theta)\omega(\vartheta)$:

$$\hat{F}_k(\theta, \vartheta) = \widehat{Y_k}(\theta, \vartheta)\omega(\theta)\omega(\vartheta),$$

де $\omega(\theta) = 1$ при $-\frac{1}{4} \leq \theta \leq \frac{1}{4}$; $\omega(\theta) = 2 - 4|\theta|$ при $\frac{1}{4} < |\theta| < \frac{1}{2}$; $\omega(\theta) = 0$ при $|\theta| \geq \frac{1}{2}$.

Відповідне перетворення в просторовій області відповідає згортці зображення з функцією $const \cdot \left(\cos\frac{\pi x}{2} - \cos \pi x\right)\left(\cos\frac{\pi y}{2} - \cos \pi y\right)$. Але, насправді, це перетворення не є точною інтерполяцією, адже воно заміняє значення в точках, де функція визначена. Для того, щоб забезпечити незмінність визначених функцією значень, рекомендується брати $\omega(\theta) = 1$ при $-\frac{1}{3} \leq \theta \leq \frac{1}{3}$; $\omega(\theta) = 2 - 3|\theta|$ при $\frac{1}{3} < |\theta| < \frac{2}{3}$ та $\omega(\theta) = 0$ при $|\theta| \geq \frac{2}{3}$.

В результаті паралельного перенесення зображення $Y_1(x, y)$ на величину $(\Delta x, \Delta y)$, тобто $Y_2(x, y) = Y_1(x + \Delta x, y + \Delta y)$, Фур'є перетворення зображення Y_2 може бути записано у наступному вигляді:

$$\hat{Y}_2(\theta, \vartheta) = \hat{Y}_1(\theta, \vartheta) e^{2\pi i(\theta \Delta x + \vartheta \Delta y)}, \tag{2.3}$$

при цьому піксели на межах зображення ігноруються. Фактично, Фур'є перетворення означене рівнянням (2.3), відповідає згорнутому перенесеному зображенню: частина зображення, яка відповідає його межі, переноситься на протилежну межу зображення.

Для обчислення кореляції між зображеннями використовується рівняння Парсеваля: якщо $\hat{Y}_k(\theta, \vartheta)$ є Фур'є перетворенням функції $Y_k(x, y)$ визначеної на $0 \leq x \leq m$ та $0 \leq y \leq n$, тобто $\hat{Y}_k(\theta, \vartheta) = \int_0^m \int_0^n Y_k(x, y) e^{-2\pi i(\theta x + \vartheta y)} dxdy$, тоді

$$\int_0^m \int_0^n Y_1(x,y)Y_2(x,y)dxdy = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{\theta=\cdots,-\frac{1}{m},0,\frac{1}{m},\cdots} \sum_{\vartheta=\cdots,-\frac{1}{n},0,\frac{1}{n},\cdots} \hat{Y}_1(\theta,\vartheta)\hat{Y}_2(\theta,\vartheta).$$

Фур'є перетворення другого зображення зміщеного після пригнічення високочастотної компоненти матиме вигляд:

$$\hat{F}_2^{(\Delta x,\Delta y)}(\theta,\vartheta) = \hat{F}_2(\theta,\vartheta)e^{2\pi i(\theta\Delta x+\vartheta\Delta y)}.$$

Цільова функція означена наступним чином:

$$Q(\Delta x,\Delta y) = \sum_{\theta=\cdots,-\frac{1}{m},0,\frac{1}{m},\cdots} \sum_{\vartheta=\cdots,-\frac{1}{n},0,\frac{1}{n},\cdots} \hat{F}_1(\theta,\vartheta)\hat{F}_2^{(\Delta x,\Delta y)}(\theta,\vartheta) =$$

$$\sum_{k=-\lfloor m/2\rfloor}^{\lfloor m/2\rfloor} \sum_{l=-\lfloor n/2\rfloor}^{\lfloor n/2\rfloor} \hat{F}_1\left(\frac{k}{m},\frac{l}{n}\right)\hat{F}_2\left(\frac{k}{m},\frac{l}{n}\right)e^{2\pi i\left(\frac{k\Delta x}{m}+\frac{l\Delta y}{n}\right)}.$$

У випадку, якщо зміщення між зображеннями становить величину більше розміру одного піксела, тоді загальне зміщення може бути розділене як $\Delta x = \Delta x_0 + \Delta x_1$ та як $\Delta y = \Delta y_0 + \Delta y_1$, де $(\Delta x_0, \Delta y_0)$ є цілопіксельним зміщенням між зображеннями. Тоді

$$Q(\Delta x,\Delta y) = \sum_{\theta=\cdots,-\frac{1}{m},0,\frac{1}{m},\cdots} \sum_{\vartheta=\cdots,-\frac{1}{n},0,\frac{1}{n},\cdots} \hat{F}_1(\theta,\vartheta)\hat{F}_2^{(\Delta x,\Delta y)}(\theta,\vartheta) =$$

$$\sum_{k=-\lfloor m/2\rfloor}^{\lfloor (m-1)/2\rfloor} \sum_{l=-\lfloor n/2\rfloor}^{\lfloor (n-1)/2\rfloor} \hat{F}_1\left(\frac{k}{m},\frac{l}{n}\right)\hat{F}_2\left(\frac{k}{m},\frac{l}{n}\right)e^{2\pi i\left(\frac{k\Delta x_0}{m}+\frac{l\Delta y_0}{n}\right)}e^{2\pi i\left(\frac{k\Delta x_1}{m}+\frac{l\Delta y_1}{n}\right)}.$$

Для фіксованих Δx_1 та Δy_1 значення функції $Q(\Delta x_0 + \Delta x_1, \Delta y_0 + \Delta y_1)$ отримуються шляхом зворотного перетворення Фур'є масиву

$$\hat{F}_1\left(\frac{k}{m},\frac{l}{n}\right)\hat{F}_2\left(\frac{k}{m},\frac{l}{n}\right)e^{2\pi i\left(\frac{k\Delta x_1}{m}+\frac{l\Delta y_1}{n}\right)},$$

де $k = 0,1,\cdots,\left\lfloor\frac{m-1}{2}\right\rfloor,-\left\lfloor\frac{m}{2}\right\rfloor,\cdots,-1$, $l = 0,1,\cdots,\left\lfloor\frac{n-1}{2}\right\rfloor,-\left\lfloor\frac{n}{2}\right\rfloor,\cdots,-1$.

2.1.3 Побудова зображення підвищеної розрізненності

Зображення підвищеної розрізненності отримується з двох субпіксельно зміщених зображень низької розрізненності за наступними кроками: підготовка субпіксельно зміщених зображень низької розрізненності, пошук значень субпіксельних зміщень між кожною парою зображень низької розрізненності, обчислення автоковаріаційної матриці зображень низької розрізненності, обчислення автоковаріаційної матриці шумів (*Vaseghi, 2008*), обчислення

передаточних функцій зображень низької розрізненності (*Boreman, 2001*) та побудова зображення підвищеної розрізненності (*Young et al., 2008*).

Автоковаріаційна матриця зображень низької розрізненності може бути середньою сумою спектральних щільностей кожного зображення низької розрізненності (*Kak & Slaney, 2001*).

Шумове зображення може бути отримане шляхом проекції кожного зображення низької розрізненності на спільну піксельну сітку підвищеної розрізненності, та оцінюванні шуму як середнього значення попарних різниць всіх спроектованих зображень низької розрізненності.

Нехай маємо N вхідних зображень низької розрізненності. Нехай U та V будуть матрицями, що відповідають за зміщення між вхідними зображеннями, де u_{ij} та v_{ij} є горизонтальними та вертикальними зміщеннями між i-им та j-им вхідними зображеннями, відповідно. Матриця середніх зміщень M_{ij} між всіма зображеннями визначається наступним чином:

$$M_{i1} = \sum_j u_{ij}, M_{i2} = \sum_j v_{ij}, i = \overline{1,N}, j = \overline{1,N}.$$

Матриця спроектованих зміщень на спільну піксельну сітку підвищеної розрізненності A може бути знайдена за такою формулою:

$$A_{1j}^{sin} = \sum_j \sin\left[(4\pi M)_{ij}\right], A_{1j}^{cos} = \sum_j \cos\left[(4\pi M)_{ij}\right], i = \overline{1,N}, j = \overline{1,2};$$

$$A_{1j} = \frac{\operatorname{atan}\left(A_{1j}^{sin}, A_{1j}^{cos}\right)}{4\pi}, j = \overline{1,2}.$$

Матриця оптимізованих зміщень O має вигляд:

$$O_{ij} = M_{ij} - A_{1j}, i = \overline{1,N}, j = \overline{1,2}.$$

Нехай I буде вхідним зображенням розмірності $m \times n$. Тоді, зміщене зображення S буде оптимізовано по вертикальній та горизонтальній осях використовуючи наступний підхід.

Для вертикального зміщення:

$$S_i^k = \begin{cases} (1 - O_k)I_{ij} + O_k I_{i+1,j}, O_k > 0, i = \overline{1, m-1}, j = \overline{1,n}, k = \overline{1,N} \\ -O_k I_{i-1,j} + (1 + O_k)I_{ij}, O_k \leq 0, i = \overline{2,m}, j = \overline{1,n}, k = \overline{1,N} \end{cases}.$$

Для горизонтального зміщення:

$$S_i^k = \begin{cases} (1-O_k)I_{ij} + O_k I_{i,j+1}, O_k > 0, i = \overline{1,m}, j = \overline{1,n-1}, k = \overline{1,N} \\ -O_k I_{i,j-1} + (1+O_k)I_{ij}, O_k \leq 0, i = \overline{1,m}, j = \overline{2,n}, k = \overline{1,N} \end{cases},$$

де k це порядковий номер вхідного зображення низької розрізненності, а O_k – оптимізована матриця зміщень k-го зображення для вертикального чи горизонтального зміщення, відповідно.

Шумове зображення є середньою сумою всіх попарних різниць між S^k, $k = \overline{1,N}$.

Нехай X та Y будуть матрицями зображення високої розрізненності та низької розрізненності, відповідно. Для того, щоб відновити зображення високої розрізненності потрібна передаточна функція, яка містить в собі процес підвищення розрізненності. Модель відновлення піксела високої розрізненності з кількох пікселів низької розрізненності наведена нижче:

$$Y(y,x) = G(\Delta y, \Delta x) \otimes X(y,x),$$

$$-0.5 \leq \Delta y \leq 0.5, -0.5 \leq \Delta x \leq 0.5,$$

$$G(\Delta y, \Delta x) = \begin{pmatrix} (0.5-\Delta y)(0.5-\Delta x) & (0.5-\Delta y) & (0.5-\Delta y)(0.5+\Delta x) \\ (0.5-\Delta x) & 1 & (0.5+\Delta x) \\ (0.5+\Delta y)(0.5-\Delta x) & (0.5+\Delta y) & (0.5+\Delta y)(0.5+\Delta x) \end{pmatrix},$$

де $G(\Delta y, \Delta x)$ – це загальна матриця згортки перетворення надрозрізненності.

Передаточна функція у частотній області має наступний вигляд:

$$T(\eta,\xi) = \left((0.5-\Delta y)e^{-2i\pi\eta/m} + 1 + (0.5-\Delta y)e^{2i\pi\eta/m}\right) \times \left((0.5-\Delta x)e^{-2i\pi\xi/n} + 1 + (0.5-\Delta x)e^{2i\pi\xi/n}\right).$$

Прикінцева модель підвищення розрізненності виглядає таким чином:

$$4\hat{Y}_k = T_k(\eta,\xi) \times \hat{X}(\eta,\xi) + T_k(\eta \pm m,\xi) \times \hat{X}(\eta \pm m,\xi) + T_k(\eta,\xi \pm n) \times \hat{X}(\eta,\xi \pm n) + T_k(\eta \pm m,\xi \pm n) \times \hat{X}(\eta \pm m,\xi \pm n) + 4\hat{E}_k(\eta,\xi),$$

де $\hat{Y}_k$ є перетворенням Фур'є k-го зображення низької розрізненності, $\hat{X}(\eta,\xi)$ є перетворенням Фур'є зображення високої розрізненності, а $\hat{E}_k(\eta,\xi)$ – перетворення Фур'є похибок (шумів) у k-му зображенні низької розрізненності.

2.2 Моделі перетворення радіолокаційного зворотного розсіювання на діелектричну проникність земної поверхні

На сьогодення, 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*; *Oh et al., 2002а*; *Oh et al., 2002б*; *Oh, 2004*), модель Дюбуа (*Dubois et al., 1995*), модель інтегрального рівняння (*Fung et al., 1992*). Всі ці моделі можуть застосовуватися для перетворення зворотного розсіяння на діелектричну проникність (*Stankevich et al., 2020в*).

2.2.1 Модель Оха

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

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

де Γ_0 – це Френелівське відбиття від земної поверхні в надирі, σ_{hv}^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 перепад висот поверхні (шорсткість земної поверхні).

Примітка: в оригіналі у моделі присутнє значення σ_{hv}^0 через інший спосіб позначення черговості поляризацій падаючої та відбитої електромагнітної хвилі. Для узгодження з іншими сучасними моделями та сучасним стилем позначення індексів падаючої та відбитої електромагнітної хвилі, дане значення було замінене на σ_{vh}^0.

$$\Gamma_0 = \left|\frac{1-\sqrt{\varepsilon_r}}{1+\sqrt{\varepsilon_r}}\right|^2,$$

де ε_r – дійсна частина значення діелектричної проникності.

$$\sqrt{p} \triangleq \sqrt{\frac{\sigma_{hh}^0}{\sigma_{vv}^0}} = 1 - \left(\frac{2\theta}{\pi}\right)^{[1/3\Gamma_0]} e^{-ks}, \tag{2.4}$$

де θ – кут падіння електромагнітної хвилі в радіанах.

$$\sigma_{vv}^0(\theta, \varepsilon_r, ks) = \frac{g\cos^3\theta}{\sqrt{p}} \cdot [\Gamma_v(\theta) + \Gamma_h(\theta)],$$

де

$$g = 0.7\left[1 - e^{-0.65(ks)^{1.8}}\right],$$

а p дано рівнянням (2.4).

В 1994 році модель була оновлена автором та набула напівемпіричного характеру:

$$\sigma_{vv}^0 = 13.5e^{-1.4(ks)^{0.2}} \frac{1}{\sqrt{p}} \Gamma_h(ks)^2 (\cos\theta)^{3.25-0.05kl} \cdot e^{-(2ks\cos\theta)^{0.6}} W_k,$$

де W_k – спектр ізотропних нерівностей земної поверхні, що базується на квадратично-експоненційній кореляційній функції

$$\rho(\xi) = \left\{1 - \frac{\xi^2}{(al)^2}\right\} \cdot e^{-\frac{\xi}{bl}},$$

в якій параметри a та b є деякими константами, а l – радіус кореляції. Сам спектр ізотропних нерівностей представлений в наступному вигляді:

$$W_k = \frac{(kl)^2}{1+(2.6kl\sin\theta)^2}\left[1 - 0.71\frac{3(2.6kl\sin\theta)^2}{[1+(2.6kl\sin\theta)^2]^2}\right],$$

$$\Gamma_h = \left|\frac{\cos\theta - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta}}\right|^2.$$

Значення p та q було оновлено таким чином:

$$\sqrt{p} = 1 - \left(\frac{2\theta}{\pi}\right)^{0.314/\Gamma_0} e^{-ks},$$

$$q = 0.25\sqrt{\Gamma_0}(0.1 + \sin^{0.9}\theta)\left[1 - e^{-(1.4-1.6\Gamma_0)ks}\right].$$

В 2002 році автор додав до моделі вплив відносної вологості ґрунту (*Oh et al., 2002б*):

$$\sigma_{vh}^0 = am_v^b(\cos\theta)^c\left[1 - e^{-d(ks)^f}\right],$$

де m_v – відносна вологість ґрунту, а значення параметрів моделі були визначені такими, що $a = 0.11$, $b = 0.7$, $c = 2.2$, $d = 0.32$, $f = 1.8$.

Оновлене відношення q прийняло вигляд:

$$q = \frac{\sigma_{vh}^0}{\sigma_{vv}^0} = a\left(\frac{s}{l} + \sin b\theta\right)^c \left\{1 - e^{-d(ks)^f}\right\},$$

автором були встановлені такі значення параметрів: $a = 0.1$, $b = 1.3$, $c = 1.2$, $d = 0.9$ та $f = 0.8$.

Звідси слідує:

$$\sigma_{vv}^0 = \frac{\sigma_{vh}^0}{q} = \frac{0.11 m_v^{0.7} \cos^{2.2}\theta\left\{1 - e^{-0.32(ks)^{1.8}}\right\}}{0.1\left[\frac{s}{l} + \sin(1.3\theta)\right]^{1.2}\left\{1 - e^{-0.9(ks)^{0.8}}\right\}}.$$

Відношення p:

$$p \equiv \frac{\sigma_{hh}^0}{\sigma_{vv}^0} = 1 - \left(\frac{\theta}{90^0}\right)^{a m_v^{-b}} \cdot e^{-c(ks)^d},$$

де рекомендовані автором значення параметрів моделі склали $a = 0.35$, $b = 0.65$, $c = 0.4$ та $d = 1.4$.

В 2004 році автор знов оновив модель спростувавши вплив в показнику q параметра l – радіуса кореляції, через його малозначний внесок і вплив на результат:

$$q \equiv \frac{\sigma_{vh}^0}{\sigma_{vv}^0} = 0.095(0.13 + \sin 1.5\theta)^{1.4}\left\{1 - e^{-1.3(ks)^{0.9}}\right\}.$$

2.2.1.1 Визначеність моделі Оха

Модель Оха є оптимізованою для таких діапазонів значень:

$$0.13 \le ks \le 6.98,$$

$$4 \le m_v \le 29.1 \text{ (відносна вологість ґрунту \%)},$$

$$10^0 \le \theta \le 70^0.$$

2.2.2 Модель Дюбуа

В моделі Дюбуа рівняння зворотного розсіювання має наступний вигляд:

$$\sigma_{hh}^0 = 10^{-2.75}\frac{\cos^{1.5}\theta}{\sin^5\theta}10^{0.028\varepsilon\tan\theta}(ks\sin^{1.4}\theta)\lambda^{0.7}$$

$$\sigma_{vv}^{0} = 10^{-2.35}\frac{\cos^3\theta}{\sin\theta}10^{0.046\varepsilon\tan\theta}(ks\sin^3\theta)^{1.1}\lambda^{0.7},$$

де θ – кут падіння електромагнітного випромінювання, ε – дійсна частина діелектричної константи, s – шорсткість земної поверхні, k – хвильове число, λ – довжина хвилі в сантиметрах.

2.2.2.1 Визначеність моделі Дюбуа

Модель Дюбуа визначена на таких значеннях:

$$ks \leq 2.5,$$

$$m_v \leq 35 \text{ (відносна вологість ґрунту \%)},$$

$$\theta \geq 30^0.$$

2.2.3 Модель інтегрального рівняння

Модель інтегрального рівняння є фізично обумовленою моделлю і поділяється на дві підмоделі: модель малих (а також помірних) збурень та модель великих збурень.

Під малими збуреннями мається на увазі, що $ks < 3$, а при великих – навпаки, $ks > 3$.

2.2.3.1 Модель малих збурень

В моделі інтегрального рівняння загальний зворотній розсіяний сигнал поділяється на дві компоненти: зворотне розсіювання одиночного відбиття та багаторазове зворотне розсіювання електромагнітного випромінювання:

$$\sigma_{qp}^{0} = \sigma_{qp}^{S} + \sigma_{qp}^{M},$$

де q – поляризація падаючої (випромінюваної) електромагнітної хвилі, p – поляризація відбитої (розсіюваної) електромагнітної хвилі, σ^S – зворотне розсіювання одиночного відбиття (single scattering), а σ^M – багаторазове зворотне

розсіювання (multiple scattering). Тобто одиночне відбиття містить енергію випромінювання, яке відбилось від земної поверхні і не зазнало повторних відбиттів на своєму шляху від інших поверхонь, таких як стіни будинків, листкова поверхня дерев та інші, як на противагу багаторазовому зворотному розсіюванню.

Компоненти загального зворотного розсіювання обчислюються за наступними формулами:

$$\sigma_{qp}^{S} = \frac{k^2}{2} e^{-2k_z^2 s^2} \sum_{n=1}^{\infty} s^{2n} \left| I_{qp}^{n} \right|^2 \frac{W^n(-2k_x,0)}{n!},$$

де

$$I_{qp}^{n} = (2k_z)^n f_{qp} e^{-s^2 k_z^2} + \frac{k_z^n \left[F_{qp}(-k_x,0)+F_{qp}(k_x,0)\right]}{2},$$

де $k_z = k\cos\theta$, а $k_x = k\sin\theta$. Значення f_{qp} можна обчислити як

$$f_{vh} = f_{hv} = 0,$$

$$f_{vv} = \frac{2R_{\parallel}}{\cos\theta},$$

$$f_{hh} = -\frac{2R_{\perp}}{\cos\theta}.$$

Тут W^n – це Фур'є перетворення функції кореляції поверхні n-тої степені, а F_{qp} виражається наступними формулами (*Choker et al., 2017*):

$$F_{hh} = 2\frac{\sin^2\theta}{\cos\theta}\left[4R_h - \left(1-\frac{1}{\varepsilon_r}\right)(1+R_h)^2\right],$$

$$F_{vv} = 2\frac{\sin^2\theta}{\cos\theta}\left[\left(1-\frac{\varepsilon_r\cos^2\theta}{\mu_r\varepsilon_r-\sin^2\theta}\right)(1-R_v)^2 + \left(1-\frac{1}{\varepsilon_r}\right)(1+R_v)^2\right],$$

$$F_{hv}(u,v) = \frac{uv}{k\cos\theta}\left[\frac{8R^2}{\sqrt{k^2-u^2-v^2}} + \frac{-2+6R^2+\frac{(1+R)^2}{\varepsilon_r}+\varepsilon_r(1-R)^2}{\sqrt{\varepsilon_r k^2-u^2-v^2}}\right],$$

$$R = \frac{R_v-R_h}{2},$$

$$W^n(a,b) = \frac{1}{2\pi}\iint \rho^n(x,y)e^{-t(ax+by)}dxdy.$$

Розподіл функції $\rho(x,y)$ експоненційний для поверхонь з малою шорсткістю та гаусовий для поверхонь з великою шорсткістю:

$$\rho(x) = e^{-\left(\frac{x}{L}\right)} \text{ – експоненційний,}$$

$$\rho(x) = e^{-\left(\frac{x}{L}\right)^2} \text{ – гаусовий,}$$

де L – радіус кореляції.

Коефіцієнти Френеля можна розрахувати за наступними формулами:

$$R_h = \frac{\mu_r \cos\theta - \sqrt{\mu_r \varepsilon_r - \sin^2\theta}}{\mu_r \cos\theta + \sqrt{\mu_r \varepsilon_r - \sin^2\theta}},$$

$$R_v = \frac{\varepsilon_r \cos\theta - \sqrt{\mu_r \varepsilon_r - \sin^2\theta}}{\varepsilon_r \cos\theta + \sqrt{\mu_r \varepsilon_r - \sin^2\theta}},$$

де R_h – це коефіцієнт Френеля при горизонтальній поляризації, а R_v – коефіцієнт Френеля при вертикальній поляризації.

Багаторазове зворотне розсіювання може бути обчислене за такою формулою:

$$\sigma_{qp}^M = \frac{k^2}{4\pi} e^{-3k_z^2 s^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(2k_z^2 s^2)^{n+m}}{n!m!} \cdot \int \mathrm{Re}\left[f_{qp}^* F_{qp}(u,v)\right] W^n(u-k_x,v) W^m(u+k_x,v) dudv + \frac{k^2}{16\pi} e^{-2k_z^2 s^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(k_z^2 s^2)^{n+m}}{n!m!} \cdot \int \left[\left|F_{qp}(u,v)\right|^2 + F_{qp}^*(u,v) F_{qp}^*(-u,-v)\right] \cdot W^m(u-k_x,v) W^n(u+k_x,v) dudv,$$

тут f_{qp}^* та F_{qp}^* є комплексно спряженими до f_{qp} та F_{qp} відповідно, а $\mathrm{Re}(\cdot)$ – дійсна частина комплексної величини.

2.2.3.2 Модель великих збурень

Для великих збурень зворотне розсіювання одиночного відбиття виражається наступною формулою:

$$\sigma_{qp}^S \approx \frac{k^2 \left|f_{qp}\right|^2}{8k_z^2 s^2 \sqrt{\left|\rho_{\xi\xi}(0)\right|\left|\rho_{\varsigma\varsigma}(0)\right| - \rho_{\xi\varsigma}^2(0)}} \cdot \exp\left(-\frac{\left|\rho_{\varsigma\varsigma}(0)\right| k_x^2}{2k_z^2 s^2 \left[\left|\rho_{\xi\xi}(0)\right|\left|\rho_{\varsigma\varsigma}(0)\right| - \rho_{\xi\varsigma}^2(0)\right]}\right),$$

де $\xi = x - x''$, $\varsigma = y - y''$, а $\rho(x)$ – нормалізована функція автокореляції поверхні.

Багаторазове зворотне розсіювання має такий вигляд:

$$\sigma_{qp}^M = \frac{k^2}{16\pi s^4 k_z^4 \left[\left|\rho_{\xi\xi}(0)\right|\left|\rho_{\varsigma\varsigma}(0)\right| - \rho_{\xi\varsigma}^2(0)\right]} \cdot \mathrm{Re}\left\{\int f_{qp}^* \exp\left\{-\frac{\left|\rho_{\varsigma\varsigma}(0)\right|(k_x^2+u^2) + \left|\rho_{\xi\xi}(0)\right| v^2 - 2\left|\rho_{\xi\varsigma}^2(0) vu\right|}{2s^2 k_z^2 \left[\left|\rho_{\xi\xi}(0)\right|\left|\rho_{\varsigma\varsigma}(0)\right| - \rho_{\xi\varsigma}^2(0)\right]}\right\} F_{qp}(u,v) dudv\right\} +$$

$$\frac{k^2}{8\pi s^4 k_z^4\left[|\rho_{\xi\xi}(0)||\rho_{\varsigma\varsigma}(0)|-\rho_{\xi\varsigma}^2(0)\right]}\int\left|F_{qp}(u,v)\right|^2\cdot$$

$$\exp\left(-\frac{|\rho_{\varsigma\varsigma}(0)|(u-k_x)^2+|\rho_{\xi\xi}(0)|v^2-2\left|\rho_{\xi\varsigma}^2(0)\right|(u-k_x)v}{s^2k_z^2\left[|\rho_{\xi\xi}(0)||\rho_{\varsigma\varsigma}(0)|-\rho_{\xi\varsigma}^2(0)\right]}\right)dudv.$$

2.2.3.3 Визначеність моделі інтегрального рівняння

Для малих збурень модель є визначеною при таких значеннях:

$$ks \leq 3,$$

$$\left(\frac{(ks\cos\theta)^2}{\sqrt{0.46kL}}\right)\exp\left\{-\sqrt{0.92kL(1-\sin\theta)}\right\} < 0.25.$$

Для великих збурень визначеність моделі не наводиться.

2.3 Застосування моделей радіолокаційного зворотного розсіяння до визначення діелектричної проникності земної поверхні

Різні моделі зворотного розсіювання мають різний діапазон їх визначеності, а, отже, вони обмежені у використанні. Тому, перш ніж використовувати будь-яку з них, потрібно переконатись у відповідності наявних даних до діапазону визначеностей тієї чи іншої моделі зворотного розсіювання. У разі, якщо для наявних даних є придатними більш, аніж одна модель, варто звернути увагу на їх особливості та спроможності у вирішенні поставлених перед науковцем задач.

Тому обирати модель для подальшого застосування варто враховуючи такі критерії:

- визначеність моделі в заданому проміжку кута падіння θ;
- визначеність моделі в заданому проміжку шорсткості земної поверхні s;
- наявність необхідних даних для експлуатації моделі (такі як двовимірний спектр ізотропних нерівностей земної поверхні);
- підтримка моделлю симуляцій міжполяризаційних взаємодій та інші.

На рис. 2.1 наведена схема залежностей різних моделей зворотного розсіювання, що згадані в розділі 2.2 цієї роботи, від різних параметрів.

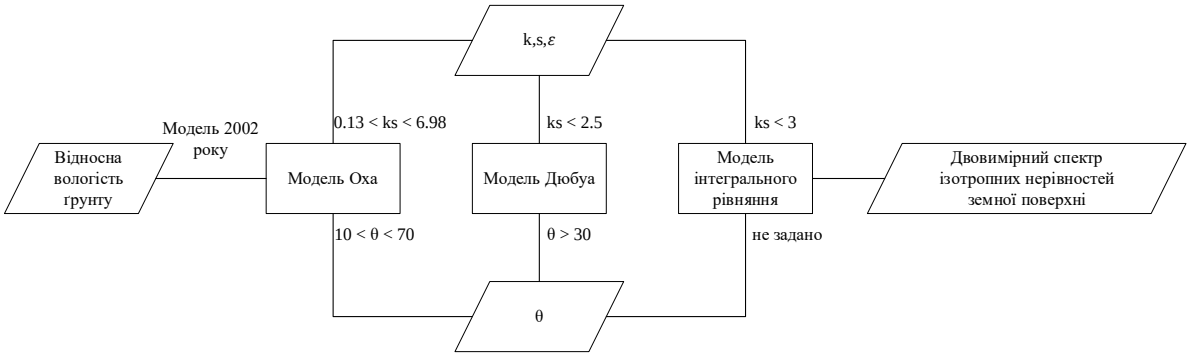


Рис. 2.1. Схема залежностей моделей зворотного розсіювання від вхідних параметрів

Як видно зі схеми, для залучення вологості ґрунту варто застосовувати модель Оха 2002 року. Модель Дюбуа може бути використана тільки за умови, якщо кут падіння $\theta \geq 30^{\circ}$, у той час, як для моделі інтегрального рівняння обмеження по куту падіння не задані. Модель інтегрального рівняння потребує важкодоступних даних у вигляді двовимірного спектру ізотропних нерівностей земної поверхні і, для малих збурень обмежена значенням $ks \leq 3$. Модель Оха більш гнучка і визначена на діапазоні $0.13 \leq ks \leq 6.98$ і, як і модель інтегрального рівняння, містить міжполяризаційну взаємодію, на відміну від моделі Дюбуа.

Таким чином, найбільш придатною та гнучкою моделлю для перетворення двох радіолокаційних супутникових знімків, з урахуванням міжполяризаційної взаємодії (наприклад vh), є модель Оха, яка не потребує важкодоступних даних у вигляді двовимірного спектру ізотропних нерівностей земної поверхні і придатна для значно більш широкого діапазону значень ks (від 0.13 до 6.98).

2.4. Математична модель оцінки просторової розрізненності супутникового знімка

Фактична просторова розрізненність супутникового зображення описується двовимірною функцією розсіяння точки (ФРТ), яка є аналогом передавальної

функції в теорії автоматичного управління для зображувальних систем (*Holst, 2011*).

Гаусова апроксимація двоспрямованої функції розсіяння точки цифрового зображення повністю визначається двома параметрами, що є Гаусовими константами σ та ς вздовж горизонтальної та вертикальної осей зображення (*Stankevich, 2020*):

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

де $h(x,y)$ – це передаточна функція точки або функція розсіяння точки.

Параметри σ та ς можна отримати з одновимірних функцій розсіяння лінії $h(x)$ та $h(y)$, які апроксимуються гаусоїдами:

$$h(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}},$$

$$h(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\varsigma}\cdot e^{-\frac{x^2}{2\varsigma^2}}.$$

При відомих значеннях параметрів Гаусової апроксимації рівняння двоспрямованої функції передачі модуляції (ФПМ) як результат перетворення Фур'є від $h(x, y)$ приймає вигляд:

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

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

Просторова розрізненність може бути обчислена як просторова частота у точці, де ФПМ знижується до заздалегідь відомого порогового значення модуляції, за наступними формулами:

$$r_x = \frac{1}{\xi^*} = \sqrt{-\frac{2\pi^2\cdot\sigma^2}{\ln K}},$$

$$r_y = \frac{1}{\eta^*} = \sqrt{-\frac{2\pi^2\cdot\varsigma^2}{\ln K}}, \tag{2.5}$$

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

Як випливає з (2.5), просторова розрізненність визначається окремо для горизонтального та вертикального напрямків зображення. Між тим, зображення

прийнято характеризувати ізотропною просторовою розрізненністю (*Stankevich et al., 2020г*; *Stankevich et al., 2021*), яка може бути виражена такою формулою (*Кононов, Тепляков, 1968*):

$$r = \sqrt{r_x \cdot r_y}.$$

2.5. Зв'язок просторової розрізненності супутникових знімків з їх інформативністю

Просторова розрізненність супутникових знімків безпосередньо пов'язана з їх інформативністю (*Solomon, Breckon, 2011*; *Кононов, 2002*; *Кононов, Станкевич, 2004*). Інформативність будь-якого конкретного спектрального діапазону $C_1(\lambda)$ чи різних комбінацій спектральних діапазонів варто розглядати в контексті їх корисної інформації, що може бути використана для вирішення конкретної задачі поставленої перед дослідником. Це є принциповою відмінністю між інформативністю та Шеннонівською інформаційною ємністю C_0:

$$C_0 = n \log_2 w,$$

де n – кількість елементів зображення певної заданої просторової розрізненності, а w – кількість градацій в кожному елементі.

Для одновимірних дискретних зображень кількість елементів розрізненності є зворотно пропорційною величиною до квадрату подвоєного розміру еквівалентної розрізненності r, а кількість градацій можна визначити за допомогою співвідношення між динамічним діапазоном зображення та відношенням "сигнал-шум" ψ в ньому (*Станкевич, 2005*).

Оцінка інформативності може бути пов'язана з певним характерним елементом об'єкта, який підлягає розрізненню, адже розмір об'єкта d_0 є сталим у всіх спектральних діапазонах. В такому разі інформативність, як і інформаційна ємність, оцінюється в бітах, що припадають на один піксел дискретного зображення d.

Але на практиці рішення різних тематичних задач дистанційного зондування Землі зводиться до класифікації різних зображень, а сама класифікація – до розділення класів об'єктів за певними ознаками. В такому разі інформативність зводиться до спроможностей розрізненності різних пар об'єктів, що потрібні для рішення тих чи інших задач. Тоді кожен типовий об'єкт має свою спектральну характеристику на цілому наборі спектральних діапазонів, що досліджуються. Повна інформативність такого набору може бути оцінена за формулою:

$$C(\lambda) = \sum_{j=1,q=1}^{s} C_{jq}(\lambda),$$

де s – кількість об'єктів з досліджуваного набору.

Інформативність для пари об'єктів з набору j та q визначається за формулою:

$$C_{jq}(\lambda) = \frac{D_{jq}(\lambda)}{4r_{jq}^2(\lambda)} \log_2\left(1 + \psi_{jq}(\lambda)\right), \tag{2.6}$$

де $D_{jq}(\lambda)$ – взаємна інформація Кульбака-Лейблера між ймовірнісними розподілами спектральних сигналів об'єктів j та q, $r_{jq}(\lambda)$ – еквівалентна просторова розрізненність відносно об'єктів j та q, а $\psi_{jq}(\lambda)$ – еквівалентне відношення "сигнал-шум" (*Станкевич, 2006*).

Таким чином, покращення просторової розрізненності супутникового зображення (зменшення значення $r_{jq}(\lambda)$) при інших рівних квадратично підвищує його повну інформативність.

Висновки до другого розділу

В даному розділі були розглянуті моделі, необхідні для підвищення інформативності супутникових знімків із зазначенням необхідності перетворення радарних даних у спільний фізичний показник – діелектричну проникність земної поверхні.

В підрозділі 2.1 було наведено модель підвищення просторової розрізненності супутникового зображення, разом з моделями оцінки цілопіксельного та субпіксельного зсуву зображень, що необхідні для синтезу

кількох супутникових зображень низької розрізненності у відновлене єдине супутникове зображення підвищеної розрізненності.

В підрозділі 2.2 були наведені різні моделі перетворення радіолокаційного зворотного радарного розсіювання на діелектричну проникність земної поверхні: модель Оха, модель Дюбуа та модель інтегрального рівняння із зазначенням діапазонів їх визначеностей.

В підрозділі 2.3 було наведено застосування моделей з підрозділу 2.2 для визначення діелектричної проникності, а також наведено схему залежностей моделей зворотного розсіювання від вхідних параметрів.

В підрозділі 2.4 було розглянуто математичну модель оцінки просторової розрізненності супутникового знімка за допомогою функції передачі модуляції.

В підрозділі 2.5 була наведена модель, що встановлює зв’язок просторової розрізненності з інформативністю супутникового зображення, що дозволяє використовувати просторову розрізненність для підвищення інформативності супутникового знімка.

Таким чином, в даному розділі обрано, розглянуто та адаптовано до подальшого застосування всі необхідні математичні моделі, що дозволило отримати математичне забезпечення підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою.

Список використаних джерел

Stankevich, S., Popov, M., Shklyar, S., Sukhanov, K., Andreiev, A., Lysenko, A., Xing, K., Cao, S., Shi, Y., Xing, Z., & Boya, S. (2020a). Subpixel-shifted Satellite Images Superresolution: Software Implementation. *WSEAS Transactions on Computers*, 19(5), 31–37. https://doi.org/10.37394/23205.2020.19.5.

Stankevich, S., Popov, M., Shklyar, S., Sukhanov, K., Andreiev A., Lysenko, A., Xing, K., Cao, S., Shi Y., & Sun, B. (2020б). Estimation of mutual subpixel shift between satellite images: software implementation. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*. https://doi.org/10.36023/ujrs.2020.24.165

Stankevich, S., Shklyar, S., & Lysenko, A. (2018). Software module for estimating subpixel shift of images acquired from quadcopter. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, *17*, 10–13. https://doi.org/10.36023/ujrs.2018.17.128

Vaseghi, S. V. (2008). *Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction*. Chichester: J. Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470740156

Boreman, G. D. (2001). *Modulation Transfer Function in Optical and Electro-optical Systems*. Bellingham: SPIE Press. https://doi.org/10.1117/3.419857

Young, S. S., Driggers, R. G., & Jacobs, E. L. (2008). *Signal Processing and Performance Analysis for Imaging Systems*. Norwood: Artech House, 324 p.

Kak, A. C., & Slaney, M. (2001). *Principles of computerized tomographic imaging*. Philadelphia, SIAM, 342 p.

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

Oh, Y., Sarabandi, K., & Ulaby, F. T. (2002a). An inversion algorithm for retrieving soil moisture and surface roughness from polarimetric radar observation. https://doi.org/10.1109/igarss.1994.399504

Oh, Y., Sarabandi, K., & Ulaby, F. T. (2002б). Semi-empirical model of the ensemble-averaged differential Mueller matrix for microwave backscattering from bare

soil surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *40*(6), 1348–1355. https://doi.org/10.1109/tgrs.2002.800232

Oh, Y. (2004). Quantitative Retrieval of Soil Moisture Content and Surface Roughness from Multipolarized Radar Observations of Bare Soil Surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *42*(3), 596–601. https://doi.org/10.1109/tgrs.2003.821065

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

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

Stankevich, S. A., Piestova, I. O., & Lysenko, A. R. (2020в). 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

Choker, M., Baghdadi, N., Zribi, M., El Hajj, M., Paloscia, S., Verhoest, N.E.C., Lievens, H., Mattia, F. (2017). Evaluation of the Oh, Dubois and IEM Backscatter Models Using a Large Dataset of SAR Data and Experimental Soil Measurements. *Water*, *9*(1), 38–38. https://doi.org/10.3390/w9010038

Holst, G. C. (2011). Imaging system fundamentals. *Optical Engineering*, *50*(5), 052601. https://doi.org/10.1117/1.3570681

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., Andreiev, A. A., & Lysenko, A. R. (2020г). Multiframe remote sensed imagery superresolution. *Proceedings of the 15th International Scientific-Practical Conference on Mathematical Modeling and Simulation Systems (MODS 2020)*, 128–131.

Stankevich, S. A., Lubskyi, 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). Žhilina: IEEE, 89–94, https://doi.org/10.1109/IDT52577.2021.9497630

Кононов, В. И., & Тепляков, Н. А. (1968). *Лекции по теории систем, создающих изображения*. К.: КВИАВУ ВВС, 252.

Solomon, C., & Breckon, T. (2011). *Fundamentals of Digital Image Processing*. Chichester: J. Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470689776

Кононов, В. И. (2002). Обоснование методики определения разрешения на местности аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками. *Космічна наука і технологія*, 8(2/3), 91–102. https://doi.org/10.15407/knit2002.02.091

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.

Станкевич, С. А. (2005). Статичні аспекти визначення функції передавання модуляції аерокосмічних іконічних систем з дискретними фотоприймачами. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. Львів: Львівська Політехніка, 2, 142–147.

Станкевич, С. А. (2006). Імовірнісно-частотна оцінка еквівалентної просторової розрізненності багатоспектральних аерокосмічних знімків. *Космічна наука і технологія*, 12(2/3), 79–82. https://doi.org/10.15407/knit2006.02.079

РОЗДІЛ 3
РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ, ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ БАГАТОПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО РАДАРУ З СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ

Методика підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою, складається зі всіх необхідних алгоритмів, процедур та джерел даних, поєднаних в єдиний наскрізний логічно пов'язаний порядок обробки та перетворення вхідних супутникових радіолокаційних зображень (*Конверський (ред.), 2010*). Методика має включати такі основні складові: алгоритм попередньої підготовчої обробки супутникових радарних даних, алгоритм зведення різнополяризаційних радарних супутникових даних в єдиний фізичний показник (в даній роботі в якості такого показника виступає діелектрична проникність, через фізично обумовлений зв'язок існуючих моделей зворотного розсіювання супутникового радарного електромагнітного імпульсу з діелектричною константою земної поверхні), алгоритм підвищення просторової розрізненності кількох субпіксельно зміщених супутникових зображень та алгоритм кількісної оцінки підвищення просторової розрізненності та інформативності.

3.1 Розробка алгоритму попередньої обробки супутникових радарних даних

Радіолокаційні супутникові дані спершу потрібно обробити, щоб перетворити комплексні значення зареєстрованого радіолокаційного сигналу на фізично коректні величини зворотного розсіяння 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 (*Dass & Yadav, 2020*). Алгоритм попередньої

обробки даних радіолокаційного знімання супутникової системи Sentinel-1 наведено на рис. 3.1.

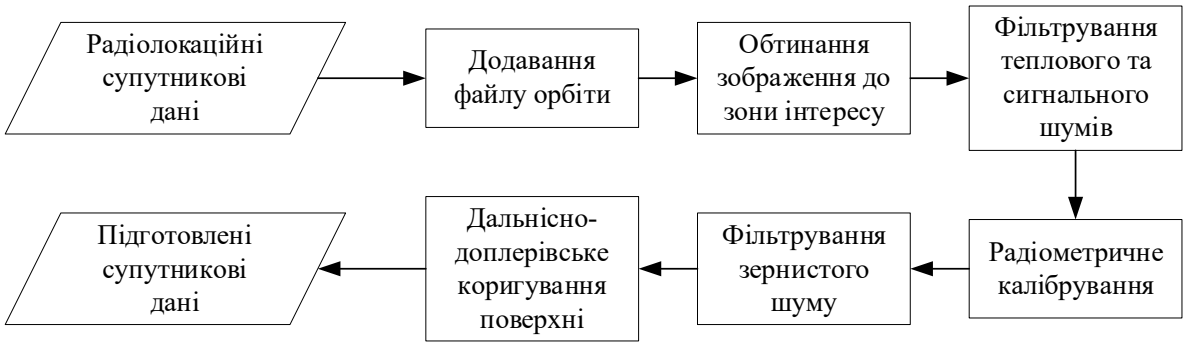


Рис. 3.1. Алгоритм попередньої обробки супутникових радарних даних

Отже, алгоритм складається з таких кроків:

Крок 1. Додати файл орбіти, що дозволяє уточнити положення супутника під час зйомки та покращує дані геокодування, а отже, і результати подальших процедур обробки даних.

Крок 2. Обітнути зображення до зони інтересу, що необхідно для того, щоб зменшити розмір вихідного зображення до розміру досліджуваної ділянки, а також для того, щоб зменшити час обробки даних.

Крок 3. Провести **фільтрування теплового та сигнального шумів**, що дозволяє пригнічити шуми радіолокаційного зображення, які виникають внаслідок різних факторів: мікроскопічний рух електронів спричинений навколишньою температурою, флуктуаціями сигналу та квантовими ефектами, через внутрішні схеми приймально-передавального тракту та інші чинники. Такі шуми можуть впливати на дані, що отримуються в процесі зйомки, додаючи до них спотворення, тому їх пригнічення покращує подальшу інтерпретацію одержуваних зображень. Тепловий шум, який спричинений фоновою температурою отримувача розташованого на борту супутника, на відміну від сигнального шуму, є незалежним від сили сигналу, відбитого від поверхні Землі. Для усунення теплового шуму наземний центр обробки даних Instrument Processing Facility (IPF) розраховує так звану конвертаційну таблицю теплового шуму Thermal Noise Look Up Table (LUT),

яка постачається разом з супутниковими даними рівня обробки 1. За допомогою цієї таблиці в подальшому можна як позбутись теплового шуму, так і повернути цей шум на знімки, де цей шум було прибрано.

Крок 4. Здійснити **радіометричне калібрування**, що перетворює цифрові дані, які записані приймальною апаратурою на супутнику в фізичні одиниці. Інакше порівняння зображень отриманих з різних сенсорів, або ж навіть з одного сенсора, але за різні дати чи режими зйомки, стане неможливим. Для радіометричного калібрування супутникові продукти рівня обробки 1 розповсюджуються з доданими до них наборами даних калібрування Calibration Annotation Data Set (CADS), а також з чотирма LUT таблицями від IPF. Це дозволяє перевести зареєстровані радіолокаційною апаратурою цифрові значення Digital Numbers (DN) в коефіцієнти зворотного розсіяння земної поверхні сигма нуль (sigma naught) σ^0, бета нуль (beta naught) β^0 – без урахування ухилу земної поверхні в точці відбиття, та гама нуль (gamma naught) γ^0 – з урахуванням об'ємного розсіяння (*Chen, 2016*). Основним фізичним показником зворотного розсіяння радіолокаційного сигналу для подальшої обробки є σ^0 (*Stankevich et al., 2019a*). Нижче наведено формулу за допомогою якої може бути здійснено калібрування супутникових даних на прикладі супутника Sentinel-1, оснащеного двополяризаційним радаром SAR-C (*Bauer-Marschallinger et al., 2021*):

$$\sigma^0 = \frac{DN^2}{A_{dn}^2 \cdot K} \cdot \frac{1}{G_{eap}^2} \cdot \left(\frac{R}{R_{ref}}\right)^3 \cdot \sin(\alpha) \ ,$$

де DN – цифрове значення сигналу, $\frac{1}{G_{eap}^2}$ – корекція спрямованості кута двоспрямованої антени, $\left(\frac{R}{R_{ref}}\right)$ – корекція втрат розповсюдження діапазону, A_{dn} – кінцеве масштабування продукту Sentinel-1 від внутрішнього інформаційного продукту SLC до кінцевого каліброваного інформаційного продукту SLC або GRD, α – локальний кут падіння електромагнітної хвилі, K – єдина калібрувальна константа для всіх кінцевих продуктів Sentinel-1.

Крок 5. Провести **фільтрування спекл шуму** (speckle noise), що дозволяє пригнічити шум, який виникає внаслідок інтерференції різночастотних хвиль

відбитих від багатьох елементарних зворотних розсіювачів і призводить до формування характерної плямистої структури радіолокаційного зображення. Пригнічити спекл шум можна за допомогою різних фільтрів (*Abramov et al., 2017*), наприклад, фільтра Лі, сігма фільтра (*Lee, 1983*), які запроваджують віконну обробку радіолокаційного зображення:

$$\text{a.}\quad \hat{x}_{i,j} = \sum_{k=i-n}^{n+i} \sum_{l=j-m}^{m+j} \delta_{k,l} z_{k,l} \Big/ \sum_{k=i-n}^{n+i} \sum_{l=j-m}^{m+j} \delta_{k,l},$$

де $\hat{x}$ – позбавлене шуму зображення, а $\hat{x}_{i,j}$ – це i,j-ий піксел даного зображення, $i = \overline{1,m}$, $j = \overline{1,n}$; $z_{i,j}$ – це i,j-ий піксел спостережуваного (реального) зображення.

$$\delta_{k,l} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } (1-2\sigma_v) z_{i,j} \le z_{k,l} \le (1+2\sigma_v) z_{i,j} \\ 0, & \text{в протилежному випадку} \end{cases},$$

де σ_v – дисперсія шуму, що впливає на спостережуване зображення z.

Крок 6. Здійснити **дальнісно-доплерівське коригування**, яке використовує дальнісно-доплерівський алгоритм корекції з урахуванням рельєфу земної поверхні і полягає у виправленні похибок, що дають геометричні зсуви чи затінення на зображеннях. Ці ефекти виникають внаслідок перепадів висот земної поверхні, що призводить до різних проміжків часу між надсиланням сигнального імпульсу та отриманням його відбитого сигналу. Скорегований за даною корекцією зворотний сигнал розсіювання σ^0_{NORLIM} може бути обчислений за наступною формулою (*Kellndorfer et al., 1998*):

$$\sigma^0_{NORLIM} = \sigma^0_{Ell} \frac{\sin\theta_{LIA}}{\sin\theta_{Ell}},$$

де θ_{LIA} – це локальний кут падіння, θ_{Ell} – кут падіння відносно еліпсоїда, що використовується IPF, σ^0_{Ell} – сигнал зворотного розсіювання, розрахований з використанням LUT таблиць наданих IPF.

В результаті застосування вищенаведеного алгоритму одержуються відфільтровані та геометрично прив’язані радіолокаційні зображення, відкалібровані в значеннях σ^0.

3.2 Розробка алгоритму зведення різнополяризаційних радарних супутникових даних в єдиний фізичний показник

На відміну від оптичних знімків радіолокаційні дані, що отримані за допомогою багатополяризаційного радару у різних режимах знімання, таких як різні поляризації випромінюваного радаром імпульсу чи різні поляризації прийнятої складової зворотного розсіюваного сигналу, за своєю природою відображають різні аспекти одних і тих самих об'єктів на земній поверхні (*Cao et al., 2008; Carotenuto et al., 2014*). А відтак, такі дані не можуть бути інтерпретованими одним і тим же чином, та не можуть бути оброблені спільно. Для подолання даної проблеми потрібне перетворення різнополяризаційних радарних даних у єдину фізичну обґрунтовану величину, що дозволить в подальшому поєднання цих даних з метою покращення їх розрізненності.

Для перетворення різнополяризаційних даних в єдиний показник використовується модель зворотного розсіювання супутникового радіолокаційного сигналу. Як можна бачити з моделей, наведених в розділі 2.2 цієї роботи, вони конвертуються на спільний фізичний показник, що задовольняє потребам вирішення проблеми неузгодженості радарних різнополяризаційних знімків – діелектричну проникність земної поверхні.

Абсолютна діелектрична проникність – це величина, що характеризує діелектричні властивості діелектричного середовища, скалярна для ізотропної речовини, яка дорівнює відношенню модуля електричного зміщення до модуля напруженості електричного поля, та тензорна для анізотропної речовини (*Мірошниченко, 2018*):

$$\varepsilon_a = \frac{|D|}{|E|},$$

де D – електричне зміщення (електрична індукція), E – напруженість електричного поля.

Відносна діелектрична проникність є безрозмірною величиною і дорівнює відношення абсолютної діелектричної проникності до абсолютної діелектричної проникності у вакуумі (діелектричної константи):

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_0},$$

де діелектрична константа $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ [Ф/м].

Алгоритм зведення різнополяризаційних радарних даних в єдиний фізичний показник описується схемою, наведеною на рис. 3.2.

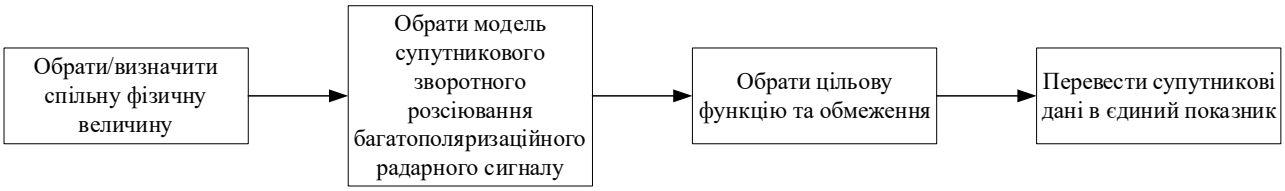


Рис. 3.2. Схема алгоритму зведення різнополяризаційних радарних супутникових даних в єдиний фізичний показник

Отже, алгоритм складається з таких кроків:

Крок 1. Обрати або визначити спільну фізичну величини, в яку буде перетворено різнополяризаційні супутникові радіолокаційні дані. В даній роботі такою величиною обрано діелектричну проникність середовища, адже вона є фізичною властивістю земної поверхні, безпосередньо пов'язана з властивостями електромагнітних радіолокаційних сигналів та залишається незмінною протягом послідовних радіолокаційних знімань з коротким часовим інтервалом.

Крок 2. Обрати модель супутникового зворотного розсіювання багатополяризаційного радарного сигналу, що залежить від наявних даних у розпорядженні дослідника, а також від потреб дослідження. Алгоритм обрання моделі зворотного радарного розсіювання буде розглянуто нижче.

Крок 3. Обрати цільову функції та її обмеження, що залежать від моделі, що обрана на кроці 2. У той час, як цільова функція залежить в основному від моделі та потреб дослідника, то обмеження цільової функції в більшій мірі диктуються обмеженнями самої моделі, обраної на кроці 2.

Крок 4. Використовуючи модель з кроку 2, цільову функцію та обмеження з кроку 3, перерахувати супутникові радіолокаційні дані на показник, обраний на кроці 1.

В результаті застосування вищенаведеного алгоритму буде одержано окремі просторові розподіли єдиного фізичного показника – діелектричної проникності земної поверхні, які обчислено за радарними зображеннями в різних поляризаціях.

3.2.1 Розробка алгоритму вибору моделі супутникового зворотного розсіювання багатополяризаційного радарного сигналу

Перетворення супутникових даних в спільний фізичний показник – діелектричну проникність, залежить від обраної моделі зворотного розсіювання електромагнітного радіолокаційного сигналу. Дані моделі були представлені в розділі 2.2. Алгоритм вибору моделі супутникового зворотного багатополяризаційного радарного розсіювання описується схемою рис. 3.3 – 3.5.

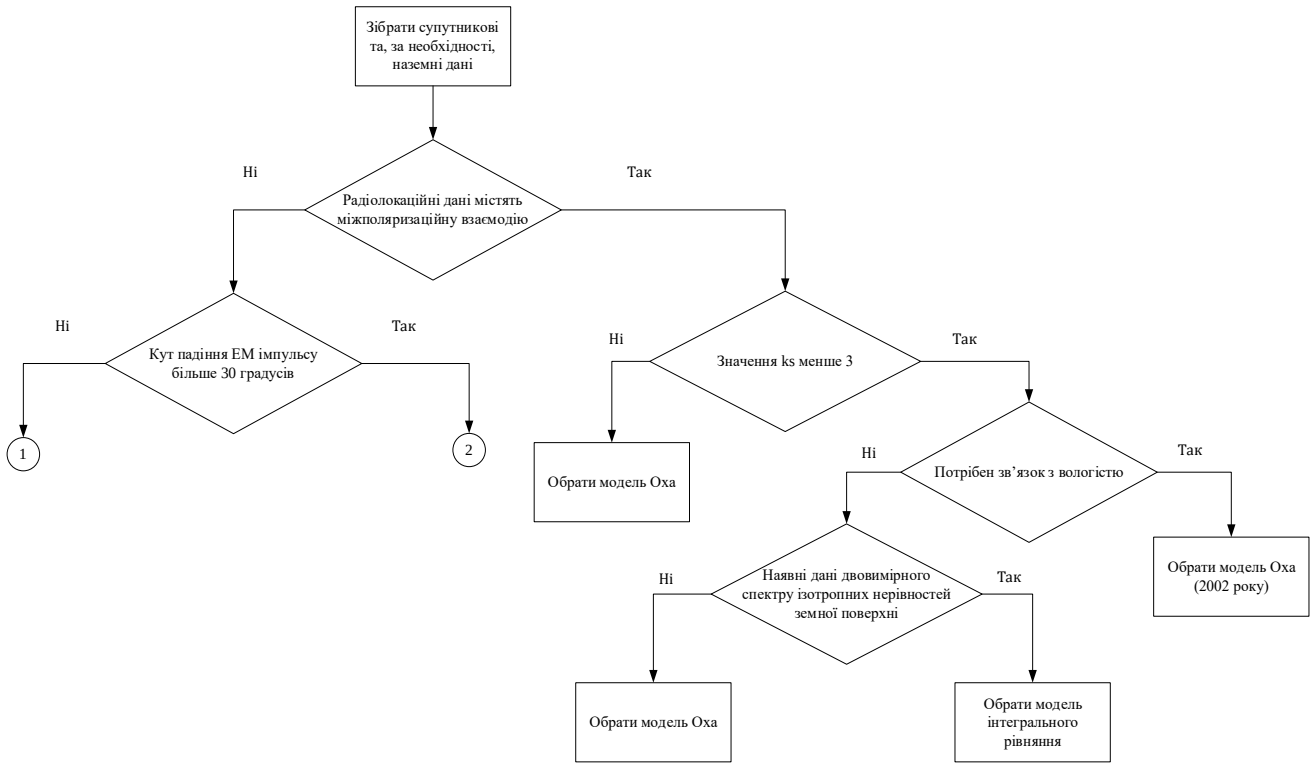


Рис. 3.3. Схема алгоритму вибору моделі зворотного розсіювання супутникового багатополяризаційного радіолокаційного сигналу

Як видно зі схеми, першим кроком є необхідний етап зібрання даних, адже їх набір визначає можливості застосування різних моделей. Другим кроком є визначення присутності міжполяризаційної взаємодії в даних, наприклад, поляризації σ_{vh}^{0}. Якщо ми маємо міжполяризаційні дані, то модель Дюбуа не може бути застосована в силу обмеження її використання лише для однотипних поляризацій падаючої та розсіяної в зворотному напрямку електромагнітної хвилі. Якщо кут падіння електромагнітної хвилі складає менше 30°, тоді модель Дюбуа також не може бути застосована, адже її діапазон визначеності включає кути падіння від 30° та вище. Якщо значення $ks \leq 3$, то може бути застосована модель інтегрального рівняння за наявності даних двовимірного спектру ізотропних нерівностей земної поверхні. Якщо таких даних нема, тоді лишається тільки модель Оха. Більш детально алгоритм вибору моделі зворотного розсіювання розкривається на рис. 3.4 – 3.5.

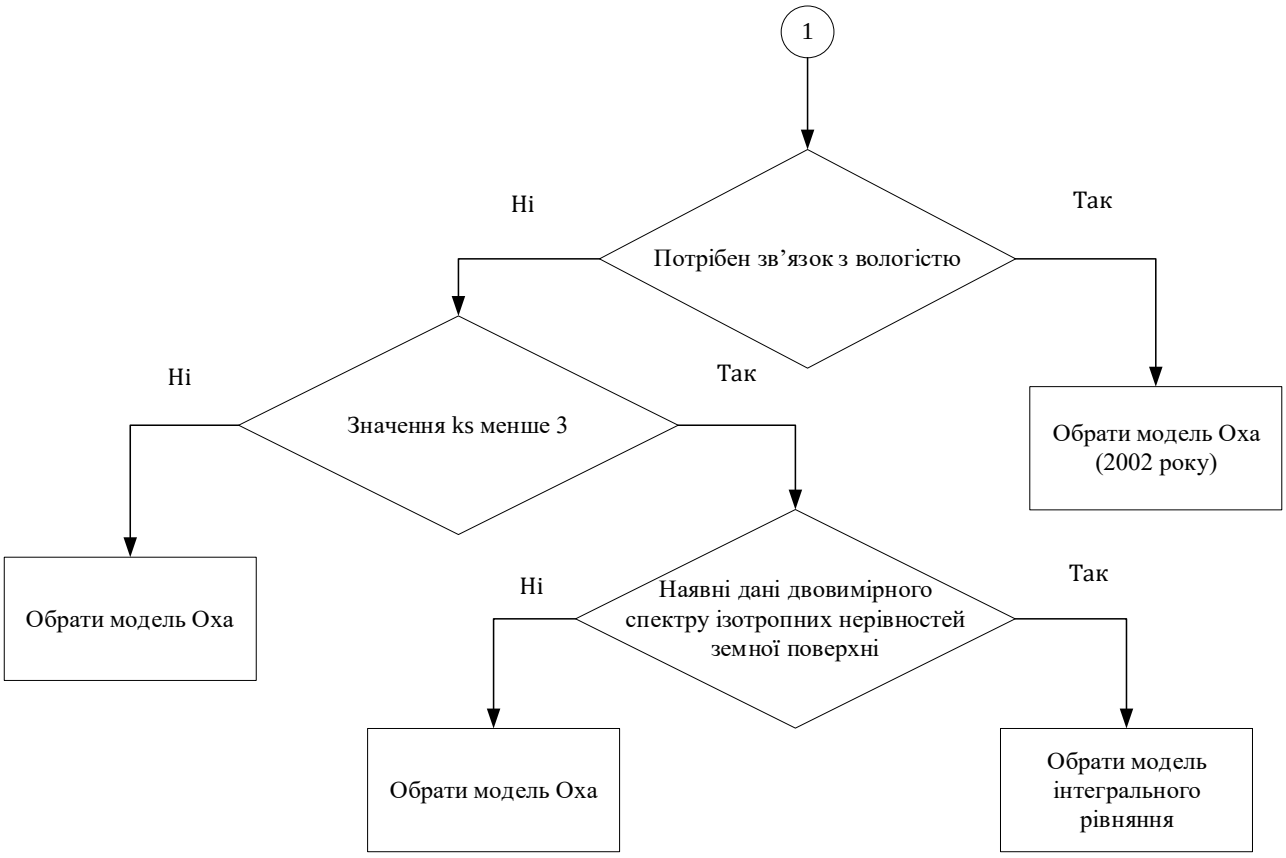


Рис. 3.4. Схема алгоритму вибору моделі зворотного розсіювання супутникового багатополяризаційного радіолокаційного сигналу, продовження гілки 1

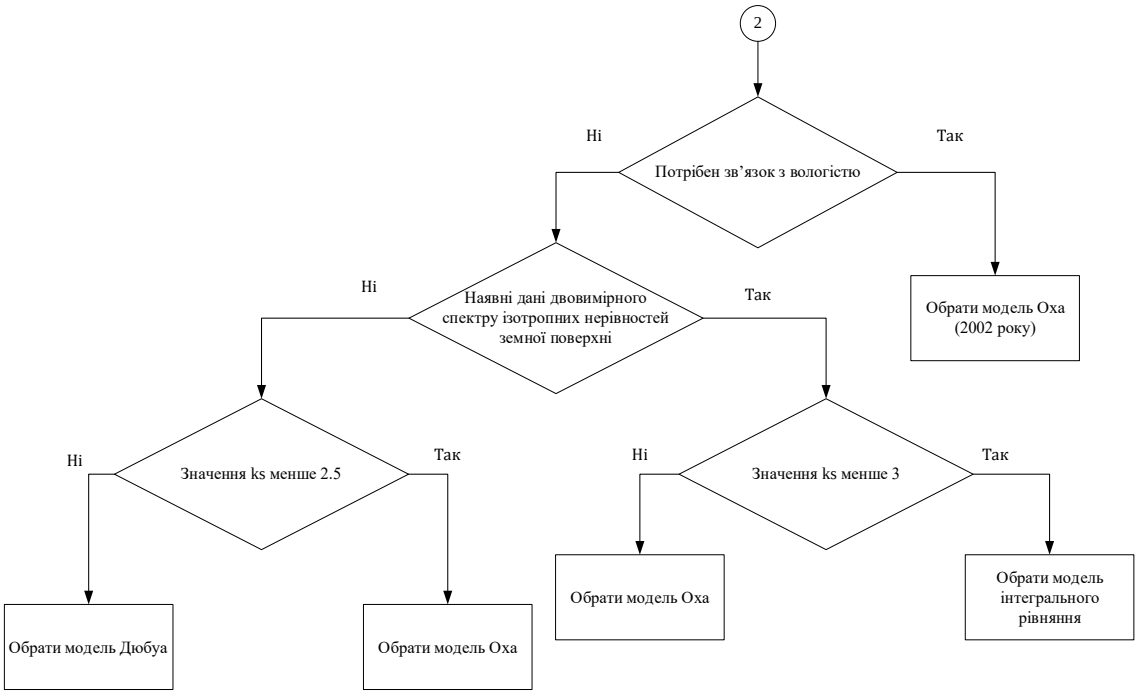


Рис. 3.5. Схема алгоритму вибору моделі зворотного розсіювання супутникового багатополяризаційного радіолокаційного сигналу, продовження гілки 2

Отже, найбільш придатною моделлю, як і зазначалось в розділі 2.3 цієї роботи, є модель Оха. Адже вона має більший інтервал визначеності ks та не залежить від наявності даних про двовимірний спектр ізотропних нерівностей земної поверхні.

3.2.2 Визначення цільової функції та її обмежень при оптимізації фізичної величини, що обрана для перетворення супутникових багатополяризаційних радарних даних в спільний показник

Цільова функція та її обмеження залежать 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 є справедливим те, що її показники для ґрунтів складають, 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*). Значення шорсткості земної поверхні не має сенсу розглядати більшим,

аніж на величину половини довжини хвилі радарного випромінювання, так як для не надто зволожених ґрунтів це є середнім значенням глибини проникності електромагнітної хвилі (*Li et al., 2018*). Для поточних моделей справедливим буде наступний алгоритм вибору цільової функції та її обмежень. Нехай $\sigma_i^{mod}(p_i, Z)$ – значення зворотного розсіювання модельоване обраною, з пункту 3.2.1, моделлю зворотного розсіювання, при обраному значенню показника p_i (в який перетворюються радарні дані) та наборі значень параметрів Z (наприклад, шорсткість s, відносна вологість m_v, кут падіння θ та інші), від яких залежить модель, а p_i – значення обраного показника в i-ій поляризації, $i = \overline{1, N}$, де N – кількість поляризацій. Тоді цільову функцію можна записати у вигляді мінімізації різниць змодельованих та реальних значень коефіцієнтів зворотного розсіювання, при обмеженні різниць міжполяризаційних значень обраного показника, в який перетворюються радарні дані. Вигляд такої функції наведено нижче:

$$\sum_{i=1}^{N} \left|\sigma_i^0 - \sigma_i^{mod}(p_i, Z)\right|^2 \to \min,$$

$$\max_{i,j} \left|p_i - p_j\right| < \epsilon,$$

$$0.001 \leq s \leq \frac{\lambda}{2},$$

де σ_i^0 – значення коефіцієнта зворотного розсіяння в i-ої поляризації, ϵ – задана похибка максимальної різниці між значеннями показника в різних поляризаціях, s – шорсткість земної поверхні, λ – довжина хвилі електромагнітного випромінювання багатополяризаційного радару.

3.3 Залежність діелектричної проникності від шорсткості та довжини кореляції земної поверхні

Значення діелектричної проникності земної поверхні може бути змодельовано за допомогою різних моделей зворотного радарного розсіювання. Для визначення наближених значень діелектричної проникності можуть бути використані такі параметри як шорсткість та довжина кореляції горизонтального профілю земної поверхні (*Stankevich et al., 2021*).

Дослідження присвячені оцінці фізичних та біофізичних параметрів земної поверхні за даними радіолокаційного знімання активно проводяться ще з появи РСА. Основний фізичний параметр, що отриманий шляхом калібрування даних РСА – це відносний коефіцієнт зворотного радарного розсіювання σ^0 (*Shimada, 2018*).

Перші спроби моделювання радарного розсіювання ґрунтуються на відновленні показника σ^0 по параметрам радарного знімання (*Goswami, Kalita, 2014*).

Сучасні дослідження підтверджують, що напівемпіричні моделі, такі як модель Оха чи Дюбуа, є придатними для вирішення подібних задач (*Fieuzal, Baup, 2016*). Тим не менш, IEM вважається найбільш доцільною фізично обумовленою моделлю при моделюванні зворотного радарного розсіювання (*Fung, 1994*).

Відомо багато методів для оцінки дійсних значень шорсткості земної поверхні за матеріалами радіолокаційного знімання, як класичних методів фізичного моделювання (*Sun et al., 2019*), так і популярних сучасних підходів з використанням фрактальної геометрії (*Ghafouri et al., 2017*) чи нейронних мереж (*Mirsoleimani et al., 2019*).

Спрощені рівняння моделі IEM для горизонтальної та вертикальної поляризацій зворотного радарного розсіювання можна записати у такому вигляді (*Stankevich et al., 2019б*):

$$\frac{\sqrt{\sigma_H^0}}{2k^2 s\cos^2\theta\sqrt{le^{-(kl\sin\theta)^2}}} = \frac{\varepsilon-1}{\left(\cos\theta+\sqrt{\varepsilon-\sin^2\theta}\right)^2}, \tag{3.1}$$

$$\frac{\sqrt{\sigma_V^0}}{2k^2 s\cos^2\theta\sqrt{le^{-(kl\sin\theta)^2}}} = (\varepsilon-1)\frac{(\varepsilon-1)\sin^2\theta+\varepsilon}{\left(\varepsilon\cos\theta+\sqrt{\varepsilon-\sin^2\theta}\right)^2}, \tag{3.2}$$

де $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число, λ – довжина хвилі РСА, θ – кут падіння імпульсу РСА, s – стандартне відхилення шорсткості земної поверхні, l – довжина кореляції горизонтального профілю земної поверхні, ε – діелектрична проникність земної поверхні.

Враховуючи, що ε є незалежною фізичною величиною, яка характеризує властивості земної поверхні, цей параметр не повинен залежати від способу її спостереження, в особливості від поляризації РСА.

Таким чином, значення діелектричної проникності виражені формулами (3.1) та (3.2) повинні бути рівними, або близькими одне до одного. Тому можна припустити, що

$$\sqrt{\frac{\sigma_V^0}{\sigma_H^0}} \cong \left(\frac{\cos\theta+\sqrt{\varepsilon-\sin^2\theta}}{\varepsilon\cos\theta+\sqrt{\varepsilon-\sin^2\theta}}\right)^2 \left((\varepsilon-1)\sin^2\theta+\varepsilon\right). \quad (3.3)$$

Отже, ε можна отримати з рівняння (3.3), як наведено на рис. 3.6. Тим не менш, на визначеному прийнятному інтервалі значень $\varepsilon = [1 \dots 15]$, відношення $\sqrt{\frac{\sigma_V^0}{\sigma_H^0}} = [1 \dots 2.5]$, коли на практиці відношення $\sqrt{\frac{\sigma_V^0}{\sigma_H^0}}$ набуває значень до 40.

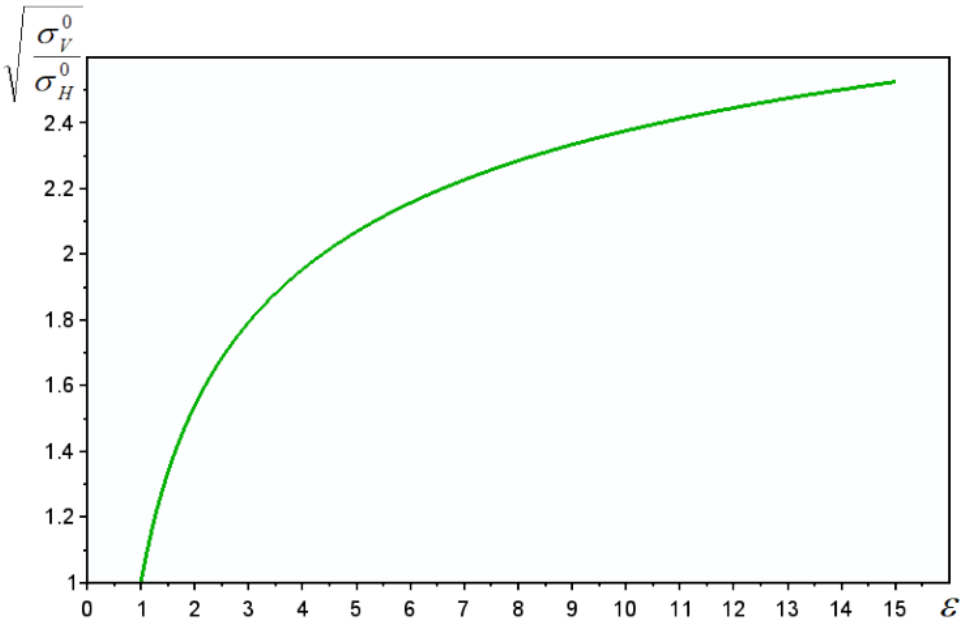


Рис. 3.6. Графічне представлення відношення значень поляризацій РСА

Така поведінка може бути викликана залежністю між спостережуваною довжиною кореляції та поляризацією радарного сигналу (*Gupta & Jangid, 2011*). Тому не є дивним, що багато сучасних дослідників (*Baghdadi et al., 2006а*; *Baghdadi et al., 2006б*; *Baghdadi et al., 2011*) змушені робити певні калібрування моделей

зворотного радарного розсіювання заради отримання практичних результатів (*Ranjbar et al., 2021*).

Тому, можна вважати за доцільне додавання додаткового множника у співвідношення (3.3), який залежатиме від довжини кореляції в різних поляризаціях.

Таким чином, співвідношення (3.3) удосконалено додаванням додаткового множника, що залежить від довжини кореляції в різних поляризаціях:

$$\sqrt{\frac{l_H e^{-(kl_H \sin\theta)^2}}{l_V e^{-(kl_V \sin\theta)^2}}} = \sqrt{\frac{l_H}{l_V} e^{(k\sin\theta)^2 (l_V^2 - l_H^2)}} \ . \tag{3.4}$$

Зазвичай, довжини кореляцій l_H та l_V виражаються через шорсткість земної поверхні s наступним чином (*Álvarez-Mozos et al., 2008*):

$$l_H = \alpha_H s^{\beta_H} = \delta_H (\sin\theta)^{\gamma} s^{\eta\theta + \xi_H} \ ,$$

$$l_V = \alpha_V s^{\beta_V} = \delta_V (\sin\theta)^{\gamma} s^{\eta\theta + \xi_V} \ ,$$

де α, β – параметри, що залежать від поляризації і можуть бути поділені на параметри, що залежать від поляризації δ, ξ та параметри, що не залежать від поляризації γ, η. В роботах (*Ezzahar et al., 2020*; *Zhang et al., 2020*) наводяться чисельні значення параметрів моделі IEM, які вимагають оцінку довжини кореляції для РСА, що працює в *C*-діапазоні.

З урахуванням довжини кореляції, співвідношення $\sqrt{\frac{\sigma_V^0}{\sigma_H^0}}$ стає досить гнучким та розповсюджується майже на весь діапазон спостережуваних даних, що продемонстровано на рис. 3.7.

Таким чином, підбираючи оптимальне значення шорсткості земної поверхні s, стає можливим досягнути відповідності змодельованого відношення значень поляризацій РСА з реальним відношенням, яке можна спостерігати на зображеннях РСА.

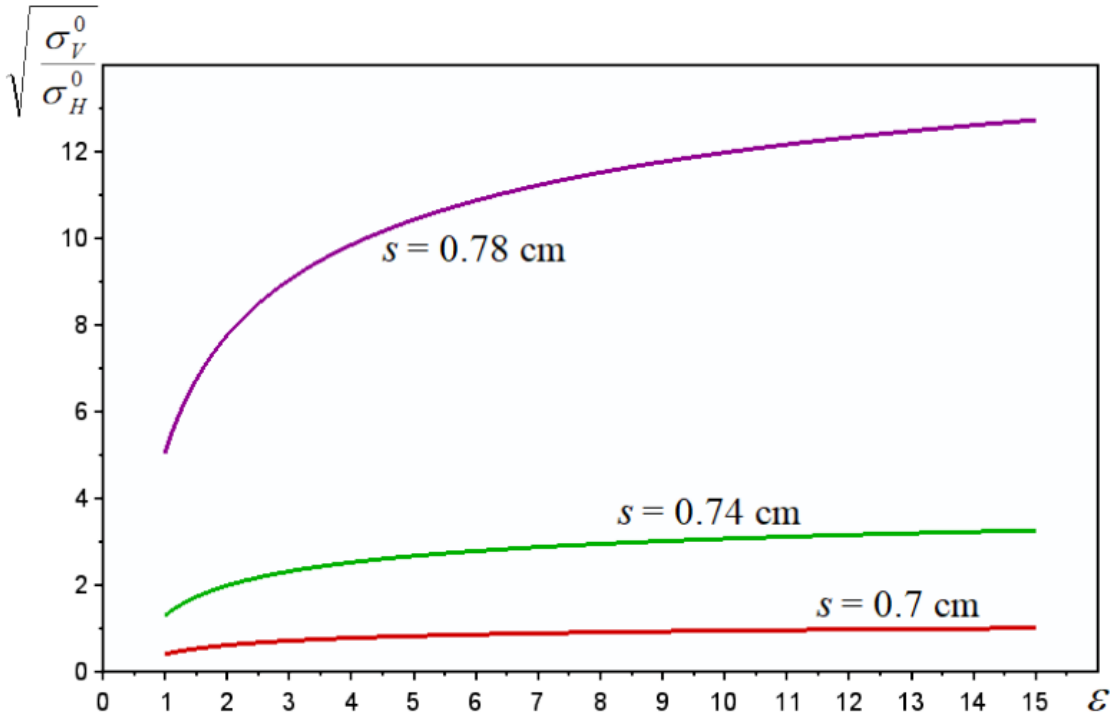


Рис. 3.7. Співвідношення значень коефіцієнтів зворотного розсіяння РСА в різних поляризаціях в залежності від значень шорсткості земної поверхні

Разом з тим, за заздалегідь встановленим значенням s, можна отримати пару значень (для кожної поляризації) діелектричних проникностей земної поверхні ε.

3.4 Розробка алгоритму підвищення просторової розрізненності кількох субпіксельно зміщених супутникових зображень

Алгоритм підвищення просторової розрізненності кількох субпіксельно зміщених супутникових зображень методом надрозрізненності базується на об’єднанні інформації з кількох (від двох до чотирьох) вхідних зображень для побудови зображення підвищеної розрізненності, яке міститиме дані, що утворені об’єднанням інформації із всіх вхідних знімків.

Загальна діаграма потоку даних алгоритму наведена на рис. 3.8.

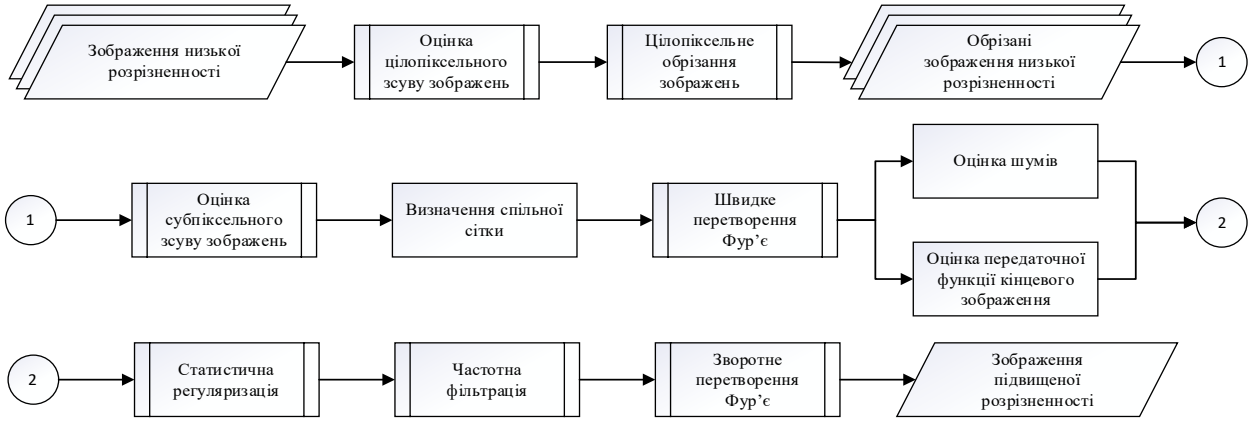
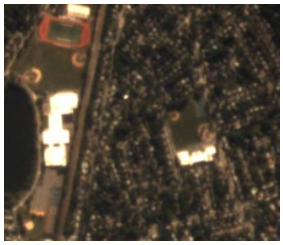
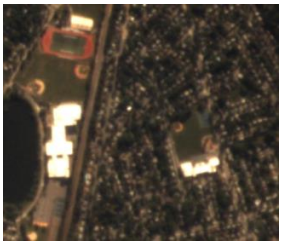


Рис. 3.8. Діаграма потоку даних алгоритму підвищення розрізненності зображень на основі об'єднання даних із декількох субпіксельно зміщених знімків низької розрізненності

Перш за все потрібно ввести означення понять цілочисельного та субпіксельного зміщень. Цілопіксельно зміщеними зображеннями є такі зображення, у яких різниці між наземними координатами відповідних пікселів на знімку становлять величину більше розміру піксела самого зображення (одного з тих, що порівнюються). Припускається, що зображення мають однакову розмірність. Приклад такого зміщення наведено на рис. 3.9.



а



б

в

г

Рис. 3.9. Приклад пари зображень із цілопіксельним зміщенням: *а*, *в* – перше супутникове зображення; *б*, *г* – друге зображення з пари з цілопіксельним зміщенням

Субпіксельно зміщеними зображеннями, аналогічно, є такі зображення, у яких різниці між наземними координатами відповідних пікселів на знімку становлять величину менше розміру піксела самого зображення. Приклад субпіксельно зміщеної пари супутникових знімків наведено на рис. 3.10. Задачею оцінки цілочисельного чи субпіксельного зміщення є пошук величини відповідного зміщення між заданою парою зображень.

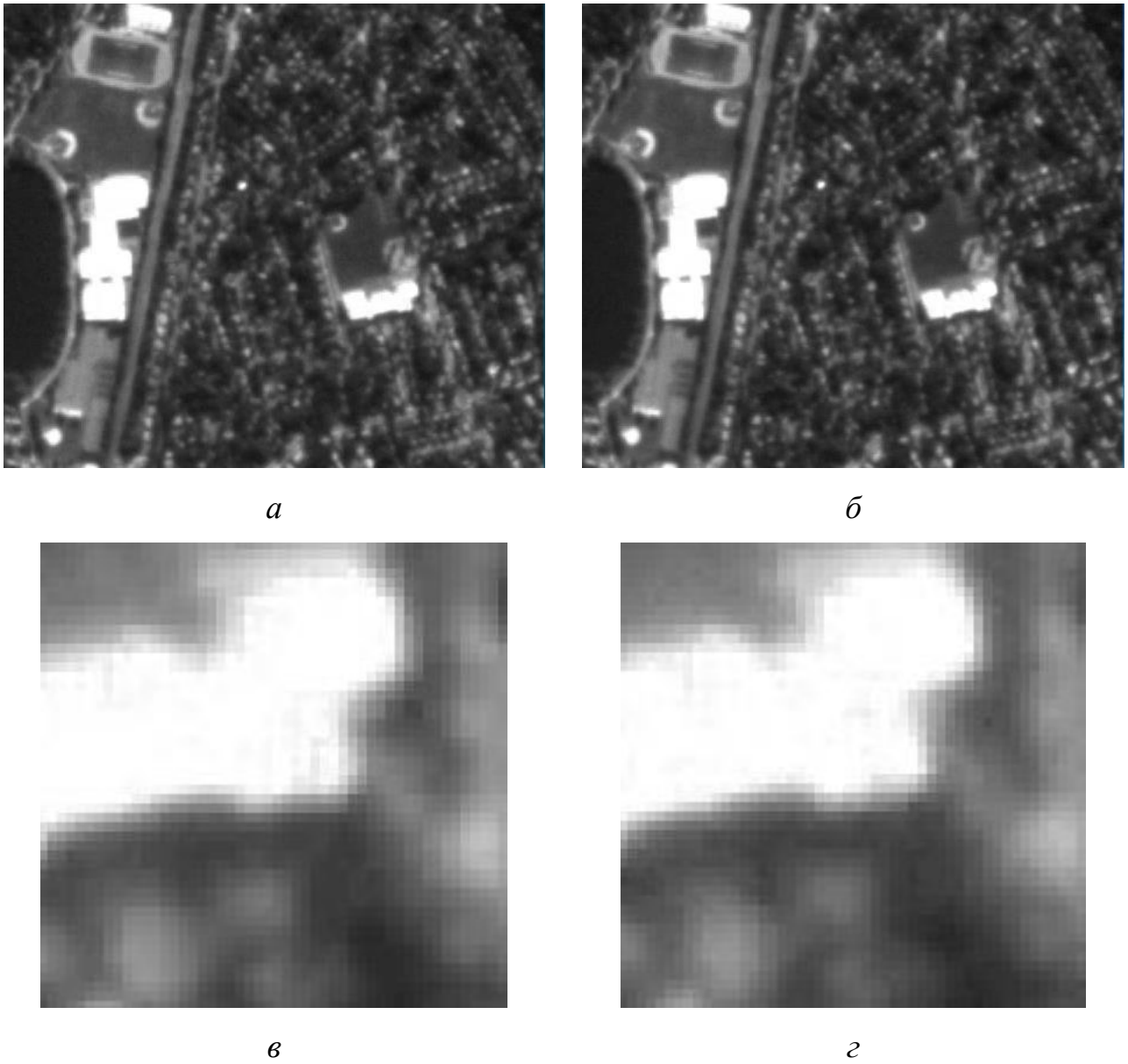


Рис. 3.10. Приклад пари зображень із субпіксельним зміщенням: *а*, *в* – перше супутникове зображення; *б*, *г* – друге зображення з пари з субпіксельним зміщенням. Та сама ділянка, що і на рис. 3.9

Повний алгоритм підвищення просторової розрізненності таким чином включає в себе наступні кроки:

Крок 1. Надати супутникові зображення низької розрізненності, які мають певну спільну ділянку, що і буде виступати сценою відновлюваного зображення підвищеної розрізненності.

Крок 2. Оцінити цілочисельний зсуву між кожною парою зображень з кроку 1.

Крок 3. Обітнути зображення до такого вигляду, коли вони містять лише спільну ділянку, а їх попарні зміщення становлять величину, що не перевищує розміру піксела.

Крок 4. Зафіксувати або оцінити значення величини субпіксельного зсуву між кожною парою вхідних зображень.

Крок 5. Визначити спільну субпіксельна сітка, яка виступатиме майбутньою піксельною сіткою відновлюваного зображення підвищеної розрізненності. Ілюстративний приклад розташування піксельної сітки серед пікселів вхідного зображення наведено на рис. 3.11.

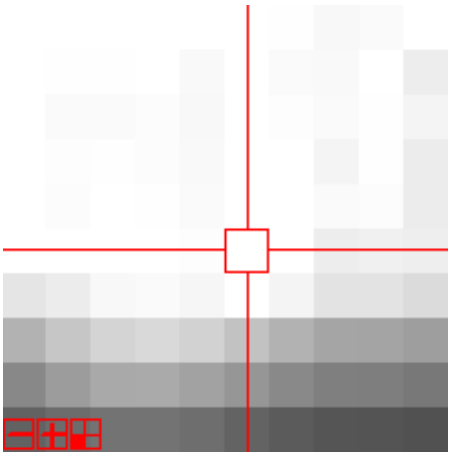


Рис. 3.11. Приклад субпіксельної сітки зображення: масштабування зображення підібрано таким чином, щоб можна було прослідкувати окремі піксели та їх межі

Крок 6. Перевести зображення низької розрізненності у частотну область за допомогою перетворення Фур’є. Двовимірне дискретне перетворення Фур’є (ДПФ)

зображення розмірами $m \times n$, позначене $\hat{Y}$, виконується за співвідношенням (*Sundararajan, 2001*):

$$\hat{Y}(\theta, \vartheta) = \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} Y(x, y) e^{-2\pi i(\theta x + \vartheta y)}.$$

Крок 7. Оцінити шуми та передаточні функції кінцевого зображення підвищеної розрізненності.

Крок 8. Виконати статистичну регуляризацію, яка, фактично, і є відновленням шуканого зображення підвищеної розрізненності (*Panagiotopoulou, 2009*; *Traonmilin et al., 2012*).

Крок 9. Застосувати, за необхідності, частотні фільтри для, наприклад, загострення меж об'єктів (їх виділення), підвищення контрастності, вирівнювання гістограми, фільтрації спекл шуму тощо (*Гонсалес, Вудс, 2005*).

Крок 10. Здійснити обернене перетворення Фур'є, що забезпечує переведення відновленого зображення підвищеної розрізненності з частотної області у просторову. Це і буде кінцевим зображенням підвищеної розрізненності.

В результаті застосування алгоритму надрозрізненності з пари вхідних зображень, субпіксельно зміщених одно відносно одного, отримується єдине зображення подвійного піксельного розміру, що вмістило в себе інформацію обох вхідних. При двократному підвищенні формальної просторової розрізненності теоретична межа покращення фактичної розрізненності складає $\sqrt{2}$ рази (*Злобин и Еремеев, 2006*).

3.4.1 Розробка алгоритму обчислення цілопіксельного зсуву зображень

Алгоритм обчислення цілопіксельного зсуву зображень використовує кореляційну модель, описану в розділі 2.1.1 цієї роботи і складається з таких кроків:

Крок 1. Пригнічити вплив низькочастотної компоненти зображення за допомогою фільтрувальної функції:

$$\hat{F}_k(\theta, \vartheta) = \hat{Y}_k(\theta, \vartheta)\omega(\theta)\omega(\vartheta) \ ,$$

де Y_k – k-те вхідне зображення, $k = \overline{1,2}$, $\hat{Y}_k$ – дискретне перетворення Фур'є, що задається виразом:

$$\hat{Y}_k(\theta, \vartheta) = \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} Y_k(x, y) e^{-2\pi i(\theta x + \vartheta y)} ,$$

а θ та ϑ набувають значень $\theta = \cdots, -\frac{2}{m}, -\frac{1}{m}, 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \cdots$ та $\vartheta = \cdots, -\frac{2}{n}, -\frac{1}{n}, 0, \frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \cdots$, при чому $|\theta| \leq \frac{1}{2}$ та $|\vartheta| \leq \frac{1}{2}$.

Фільтрувальна функція $\omega(\theta)$ обчислюється за формулою:

$$\omega(\theta) = \begin{cases} 1, |\theta| \leq \frac{1}{4} \\ 2 - 4|\theta|, \frac{1}{4} < |\theta| < \frac{1}{2} \\ 0, |\theta| \geq \frac{1}{2} \end{cases}.$$

Крок 2. Паралельно перенести зображення Y_1 на зображення Y_2 на величину $(\Delta x, \Delta y)$, тобто $Y_2(x, y) = Y_1(x + \Delta x, y + \Delta y)$, де Δx – зміщення першого зображення Y_1 по осі абсцис відносно другого базового зображення Y_2, а Δy – зміщення першого зображення по осі ординат, відповідно. Нижче наведена формула перенесення зображення у формі придатній для обробки у частотній області:

$$\hat{Y}_2(\theta, \vartheta) = \hat{Y}_1(\theta, \vartheta) e^{2\pi i(\theta \Delta x + \vartheta \Delta y)}.$$

Крок 3. Максимізувати значення функції кореляції двох зображень:

$$Q(\Delta x, \Delta y) = \sum_{\theta = \cdots, -\frac{1}{m}, 0, \frac{1}{m}, \cdots} \sum_{\vartheta = \cdots, -\frac{1}{n}, 0, \frac{1}{n}, \cdots} \hat{F}_1(\theta, \vartheta) \hat{F}_2^{(\Delta x, \Delta y)}(\theta, \vartheta) =$$

$$\sum_{k=-\lfloor m/2 \rfloor}^{\lfloor m/2 \rfloor} \sum_{l=-\lfloor n/2 \rfloor}^{\lfloor n/2 \rfloor} \hat{F}_1\left(\frac{k}{m}, \frac{l}{n}\right) \hat{F}_2\left(\frac{k}{m}, \frac{l}{n}\right) \exp\left[2\pi i \left(\frac{k\Delta x}{m} + \frac{l\Delta y}{n}\right)\right],$$

де

$$\hat{F}_2^{(\Delta x, \Delta y)}(\theta, \vartheta) = \hat{F}_1(\theta, \vartheta) e^{2\pi i(\theta \Delta x + \vartheta \Delta y)}.$$

В результаті виконання цього алгоритму отримуються значення цілопіксельного зсуву $(\Delta x, \Delta y)$.

3.4.2 Розробка алгоритму цілопіксельного обрізання зображень

Алгоритм цілопіксельного обрізання зображень складається з трьох основних кроків:

Крок 1. Оцінити зміщення зображень вздовж осей абсцис та ординат.

Крок 2. Якщо зображень більше, аніж 2, визначити еталонне зображення, в якому площа перекриття з іншими зображеннями буде найбільшою відносно кінцевого розміру зображення;

Крок 3. Обрізати зображень з кроку 2 відповідно до зміщень обчислених на кроці 1.

3.4.3 Розробка алгоритму обчислення субпіксельного зсуву зображень

Математична модель обчислення субпіксельного зсуву наведена в пункті 2.1.2 цієї роботи. Алгоритм включає в себе наступні кроки:

Крок 1. Підготувати до обчислень значень функції $Q(\Delta x, \Delta y)$. У цьому випадку обчислюються значення $\hat{F}_1(\theta, \vartheta)\hat{F}_2(\theta, \vartheta)$ при значеннях $\theta = \frac{k}{m}$, $k = -\left\lfloor\frac{m}{2}\right\rfloor, \cdots, \left\lfloor\frac{m-1}{2}\right\rfloor$, $\vartheta = \frac{l}{n}$, $l = -\left\lfloor\frac{n}{2}\right\rfloor, \cdots, \left\lfloor\frac{n-1}{2}\right\rfloor$, а також заповнити всі необхідні допоміжні масиви.

Крок 2. Знайти максимум функції $Q(\Delta x, \Delta y)$ при $\Delta x_1 = 0, \frac{1}{16}, \cdots, \frac{15}{16}$ та $\Delta y_1 = 0, \frac{1}{16}, \cdots, \frac{15}{16}$ і значення кожної пари $(\Delta x, \Delta y)$, тобто $Q(\Delta x_0 + \Delta x_1, \Delta y_0 + \Delta y_1)$ обчислити незалежно для всіх $\Delta x_0 = -\left\lfloor\frac{m}{2}\right\rfloor, 1 - \left\lfloor\frac{m}{2}\right\rfloor, \cdots, \left\lfloor\frac{m-1}{2}\right\rfloor$, $\Delta y_0 = -\left\lfloor\frac{n}{2}\right\rfloor, 1 - \left\lfloor\frac{n}{2}\right\rfloor, \cdots, \left\lfloor\frac{n-1}{2}\right\rfloor$. Якщо зміщення по будь-якій з координат перевищує розмір одного піксела, тоді зображення мають бути обрізані таким чином, щоб їх зміщення становило субпіксельну величину, після чого повторити крок 1.

Крок 3. Здійснити чисельну максимізацію функції $Q(\Delta x, \Delta y)$: точка $(\Delta x_0 + \Delta x_1, \Delta y_0 + \Delta y_1)$ обирається як стартова, де всі значення точки $\Delta x_0 + \Delta x_1$ та $\Delta y_0 + \Delta y_1$ є такими, при яких було досягнуто максимум на кроці 2.

В результаті виконання цього алгоритму визначаються оптимальні значення субпіксельного зсуву $(\Delta x, \Delta y)$.

3.5 Розробка алгоритму кількісної оцінки підвищення просторової розрізненності та інформативності

Підвищення просторової розрізненності оцінюється як відношення фактичних піксельних просторових розрізненностей вхідного та вихідного зображень з урахуванням формальної кратності розміру їх пікселів. Визначення піксельної просторової розрізненності виконується з залученням моделі, описаної у розділі 2.4 цієї роботи.

Алгоритм кількісної оцінки підвищення просторової розрізненності складається з таких кроків:

Крок 1. Обрати базове зображення низької розрізненності та зображення – результат підвищення його розрізненності.

Крок 2. обчислити просторову розрізненність базового зображення низької розрізненності r_{base}.

Крок 3. Обчислити просторову розрізненність зображення підвищеної розрізненності r_{enh}.

Крок 4. Обчислити оцінку підвищення просторової розрізненності зображення підвищеної розрізненності відносно базового зображення низької розрізненності за наступною формулою:

$$\text{Підвищення} = \frac{K_{enh} \cdot r_{base}}{r_{enh}} \cdot 100\% - 100\% \ , \qquad (4.1)$$

де множник K_{enh} враховує формальну зміну розміру піксела у результаті застосування алгоритму підвищення розрізненності. У базового зображення просторова розрізненність обчислюється при розмірі піксела в K_{enh} разів більше, аніж у піксела зображення підвищеної просторової розрізненності. Для вдвічі збільшеного зображення цей показник дорівнює $K_{enh} = 2$.

Підвищення інформативності квадратично залежить від значень просторової розрізненності зображення. Детально залежність інформативності та просторової розрізненності розглянута в розділі 2.5 цієї дисертаційної роботи.

3.6 Поєднання розроблених алгоритмів в єдину методику підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою

Методика підвищення інформативності космічних знімків об'єднує в послідовний логічний ланцюг застосування попередньо розглянутих алгоритмів з можливістю адаптації до різних задач за умови наявності відповідних моделей та необхідних додаткових даних (*Лисенко, 2023*). Схема операцій методики наведена на рис. 3.12.

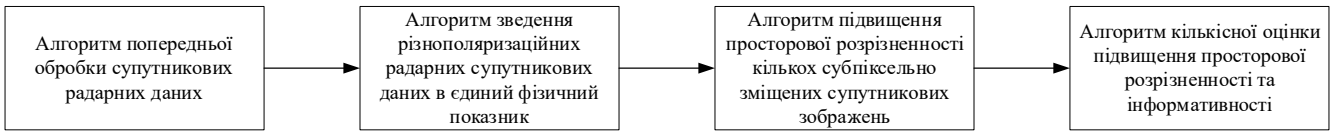


Рис. 3.12. Схема операцій методики підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою

Всі необхідні для реалізації методики моделі та алгоритми були наведені та описані раніше в розділах 2 та 3 цієї роботи:

1) алгоритм попередньої обробки супутникових радарних даних наведений в розділі 3.1;
2) алгоритм зведення різнополяризаційних радарних супутникових даних в єдиний фізичний показник наведений в розділі 3.2;
3) алгоритм підвищення просторової розрізненності кількох субпіксельно зміщених супутникових зображень наведений в розділі 3.3;
4) алгоритм кількісної оцінки підвищення просторової розрізненності та інформативності наведений в розділі 3.4.

Висновки до третього розділу

В цьому розділі була наведена методика підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою.

Для цього в підрозділі 3.1 було розглянуто алгоритм попередньої обробки супутникових радарних даних разом з його описом.

Для зведення радарних даних у спільний фізичний показник було розроблено алгоритм зведення різнополяризаційних радарних супутникових даних в єдиний фізичний показник, який наведено в підрозділі 3.2. А сам алгоритм включив у себе: алгоритм вибору моделі супутникового зворотного розсіювання (пункт 3.2.1) багатополяризаційного радарного сигналу та модель цільової функції та її обмежень при оптимізації фізичної величини, що обрана для перетворення супутникових багатополяризаційних радарних даних в спільний показник (пункт 3.2.2). Залежність діелектричної проникності від інших фізичних показників було розглянуто в підрозділі 3.3.

Для підвищення просторової розрізненності, в підрозділі 3.4, було описано алгоритм підвищення просторової розрізненності кількох субпіксельно зміщених супутникових зображень, який в свою чергу вимагає використання: алгоритму обчислення цілопіксельного зсуву зображень (пункт 3.4.1), алгоритму цілопіксельного обрізання зображень (пункт 3.4.2) та алгоритму обчислення субпіксельного зсуву зображень (пункт 3.4.3).

Для кількісної оцінки результату було розглянуто алгоритм кількісної оцінки підвищення просторової розрізненності та інформативності, який описано в підрозділі 3.5.

В кінці розділу була сформульована повна методика підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою, яка склалася із послідовних логічних процедурних кроків і поєднала у собі всі розроблені у роботі моделі, алгоритми та процедури.

Список використаних джерел

Конверський, А., ред. (2010). Основи методології та організації наукових досліджень. Київ: Центр учбової літератури, 352 с.

Dass, R., & Yadav, N. (2020) Image quality assessment parameters for despeckling filters. *Proc. Comput. Sci*., 167, 2382–2392. https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.291

Chen, K. (2016). *Principles of synthetic aperture radar imaging: a system simulation approach*. Boca Raton: CRC Press, 220 p.

Stankevich, S., Piestova, I., Shklyar, S., & Lysenko, A. (2019a). 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

Bauer-Marschallinger, B., Cao, S., Navacchi, C., Freeman, V., Reuß, F., Geudtner, D., Rommen B., Vega F. C., Snoeij P., Attema, E., Reimer, C., & Wagner, W. (2021). The normalised Sentinel-1 Global Backscatter Model, mapping Earth's land surface with *C*-band microwaves. *Scientific Data*, *8*(1). https://doi.org/10.1038/s41597-021-01059-7

Abramov, S., Rubel, O., Lukin, V., Kozhemiakin, R., Kussul, N., Shelestov, A., & Lavreniuk, M. (2017). Speckle reducing for Sentinel-1 SAR data. *2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. https://doi.org/10.1109/igarss.2017.8127463

Lee, J.-S. (1983). A simple speckle smoothing algorithm for synthetic aperture radar images. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, *SMC-13*(1), 85–89. https://doi.org/10.1109/tsmc.1983.6313036

Kellndorfer, J. M., Pierce, L. E., Dobson, M. C., & Ulaby, F. T. (1998). Toward consistent regional-to-global-scale vegetation characterization using orbital SAR systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *36*(5), 1396–1411. https://doi.org/10.1109/36.718844

Cao, Y.-G., Yan, L.-J., Zheng, Z.-Z. (2008) Extraction of information on geology hazard from multi-polarization SAR images. *The International Archives of the*

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVII, B4, 1529-1532.

Carotenuto, V., De Maio, A., Clemente, C., & Soraghan, J. J. (2014) Multi-polarization SAR change detection with invariant decision rules. *IEEE Radar Conference*. Cincinnati: IEEE, 0859-0862. https://doi.org/10.1109/RADAR.2014.6875711

Мірошниченко, А. П. (2018). *Матеріалознавство радіоелектронної апаратури*. Текст лекцій, розділ “Діелектрики”. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 99 с. https://ela.kpi.ua/handle/123456789/23459

Mohan, R. R., Binu, P., 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

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

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

Stankevich, S. A., Svideniuk, M. O., & Lysenko, A. R. (2021). Land Surface Roughness Parameter Retrieval by Inverse Simulation of Dual-Polarization Radar Backscattering. *Applied Questions of Mathematical Modeling*, *4*(2.1). https://doi.org/10.32782/kntu2618-0340/2021.4.2.1.22

Shimada, M. (2018). Imaging from Spaceborne and Airborne SARs, Calibration, and Applications. CRC Press, 392 p.

Goswami, B., & Kalita, M. (2014). Radar backscattering measurement of bare soil and vegetation covered soil using X-band and full polarization. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XL-8*, 733–736. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-8-733-2014

Fieuzal, R., & Baup, F. (2016). Improvement of Bare Soil Semi-Empirical Radar Backscattering Models (Oh and Dubois) with SAR Multi-Spectral Satellite Data (X-, C-

and L-Bands). *Advances in Remote Sensing*, *05*(04), 296–314. https://doi.org/10.4236/ars.2016.54023

Fung, A. K. (1994). *Microwave scattering and emission models and their applications*. Norwood: Artech House, 592 p.

Sun, L., Dabboor, M., Belair, S., Carrera, M. L., & Merzouki, A. (2019). Simulating *C*-Band SAR Footprint-Scale Backscatter Over Agricultural Area with a Physical Land Surface Model. *Water Resources Research*, *55*(6), 4594–4612. https://doi.org/10.1029/2019wr025163

Ghafouri, A., Amini, J., Dehmollaian, M., & Kavoosi, M. A. (2017). Measuring the surface roughness of geological rock surfaces in SAR data using fractal geometry. *Comptes Rendus Geoscience*, *349*(3), 114–125. https://doi.org/10.1016/j.crte.2017.04.003

Mirsoleimani, H. R., Sahebi, M. R., Baghdadi, N., & El Hajj, M. (2019). Bare Soil Surface Moisture Retrieval from Sentinel-1 SAR Data Based on the Calibrated IEM and Dubois Models Using Neural Networks. *Sensors*, *19*(14), 3209. https://doi.org/10.3390/s19143209

Stankevich, S. A., Piestova, I., Shklyar, S., & Lysenko, A. (2019б). Satellite Dual-Polarization Radar Imagery Superresolution Under Physical Constraints. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 439–452. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0_30

Gupta, V. K., Jangid, R. A. (2011) Microwave response of rough surfaces with auto-correlation functions, RMS heights and correlation lengths using active remote sensing. *Indian Journal of Radio & Space Physics*, 40(3), 137–146. https://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789/11933/1/IJRSP40(3)20137-146.pdf

Baghdadi, N., Holah, N., & Mehrez Zribi, M. (2006a). Soil moisture estimation using multi-incidence and multi-polarization ASAR data. *International Journal of Remote Sensing*, *27*(10), 1907–1920. https://doi.org/10.1080/01431160500239032

Baghdadi, N., Holah, N., & Zribi, M. (2006б). Calibration of the Integral Equation Model for SAR data in C-band and HH and VV polarizations. *International Journal of Remote Sensing*, *27*(4), 805–816. https://doi.org/10.1080/01431160500212278

Baghdadi, N., Chaaya J. A., & Zribi, M. (2011). Semiempirical Calibration of the Integral Equation Model for SAR Data in C-Band and Cross Polarization Using Radar Images and Field Measurements. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, *8*(1), 14–18. https://doi.org/10.1109/lgrs.2010.2050054

Ranjbar, S., Zarei, A., Hasanlou, M., Akhoondzadeh, M., Amini, J., & Amani, M. (2021). Machine learning inversion approach for soil parameters estimation over vegetated agricultural areas using a combination of water cloud model and calibrated integral equation model. *Journal of Applied Remote Sensing*, *15*(01). https://doi.org/10.1117/1.jrs.15.018503

Álvarez-Mozos, J., González-Audícana, M., Casalí, J., & Larrañaga, A. (2008). Effective versus measured correlation length for radar-based surface soil moisture retrieval. *International Journal of Remote Sensing*, *29*(17-18), 5397–5408. https://doi.org/10.1080/01431160802036367

Ezzahar, J., Ouaadi, N., Zribi, M., Elfarkh, J., Aouade, G., Khabba, S., Er-Raki, S., Chehbouni, A., & Jarlan, L. (2020). Evaluation of Backscattering Models and Support Vector Machine for the Retrieval of Bare Soil Moisture from Sentinel-1 Data. *Remote Sensing*, *12*(1), 72. https://doi.org/10.3390/rs12010072

Zhang, L., Li, H., & Xue, Z. (2020). Calibrated Integral Equation Model for Bare Soil Moisture Retrieval of Synthetic Aperture Radar: A Case Study in Linze County. *Applied Sciences*, *10*(21), 7921. https://doi.org/10.3390/app10217921

Sundararajan, D. (2001). *The Discrete Fourier Transform: Theory, Algorithms and Applications*. Singapore: World Scientific, 392. https://doi.org/10.1142/4610

Panagiotopoulou, A. (2009). Regularized super-resolution image reconstruction employing robust error norms. *Optical Engineering*, *48*(11), 117004. https://doi.org/10.1117/1.3265543

Traonmilin, Y., Ladjal S., & Almansa, A. (2012). On the amount of regularization for super-resolution reconstruction. *Proceedings of the 20th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2012)*. Bucharest: EURASIP, 380–384.

Гонсалес, Р., & Вудс, Р. (2005). *Цифровая обработка изображений*. М.: Техносфера, 1070 с.

Злобин, В.К., Еремеев, В.В. (2006) *Обработка аэрокосмических изображений*. М.: Физматлит, 288 с.

Лисенко, А. (2023). Методика підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радара із синтезованою апертурою. *Український журнал дистанційного зондування Землі, 10*(3), 10–15. https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.3.243

РОЗДІЛ 4
ТЕСТУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ МЕТОДИКИ ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ, ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ БАГАТОПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО РАДАРУ З СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ

Тестування методики проводиться виконанням її пунктів, описаних в розділі 3 цієї роботи. В якості джерела даних обрано супутникову систему Sentinel-1, оснащену двополяризаційним радаром з синтезованою апертурою SAR-C (*Schmidt et al., 2020*). Дані SAR-C повністю задовольняють вимоги розробленої методики: містять дві поляризації знімання vv та vh, знаходяться у відкритому доступі, а невелика часова затримка між послідовною реєстрацією сигналів в поляризаціях vv та vh дозволяє отримати одразу два субпіксельно зміщених зображення. Зазвичай здійснюється попереднє обтинання повнорозмірних знімків до зони інтересу. Це обтинання здійснюється по географічним координатам і дозволяє одразу усунути цілопіксельні зсуви. Тому перед початком обробки супутникових даних за розробленою методикою потрібно обрати досліджувану ділянку. Після цього здійснюється послідовне виконання кроків методики підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою, що описані в підрозділі 3.6.

4.1 Вибір досліджуваної ділянки

Досліджувана ділянка обирається залежно від задач та потреб, що стоять перед дослідником. В даному випадку необхідна ділянка, що добре узгоджується з моделями зворотного розсіювання, описаними в підрозділі 2.2 цієї роботи. Основні параметри земної поверхні, що впливають на застосування моделі, такі:

- шорсткість земної поверхні;
- радіус кореляції нерівностей земної поверхні;

- вологість ґрунту;
- нахил земних поверхонь на місцевості до напрямку падаючого випромінювання, що згенероване передавачем супутникового РСА, розташованому на борту носія;
- температура земної поверхні;
- структура верхніх шарів земного покриву, через які проходить падаюче електромагнітне випромінювання та інші.

Шорсткість земної поверхні (позначається s) – це характеристика нерівностей земної поверхні, яка визначає ступінь її відхилення від теоретично гладкої поверхні заданої форми і вимірюється, зазвичай, в сантиметрах. Тобто, по суті, це є характеристика перепадів висот на земній поверхні.

Шорсткість земної поверхні обчислюється як середньоквадратичне відхилення нерівностей (*Black & Kohser, 2008*):

$$s = \frac{1}{L}\sqrt{\int_{x=0}^{x=L} y^2 dx} \text{ (см)},$$

де $L = \sum(\Delta x_i)_p + (\Delta x_i)_n$ – загальна довжина профілю, x_i – координата вздовж просторового сегменту L, y – варіація висоти земної поверхні за вертикальною координатою, p – додатній схил, n – від'ємний схил.

Шорсткість земної поверхні впливає на множинне відбиття падаючої на земну поверхню електромагнітної хвилі, а відтак і на кількісно вимірюване значення відбитого сигналу (*Verhoest et al., 2008*; *Vulfson et al., 2012*).

Радіус кореляції земної поверхні, (позначається l) – є довжиною профілю земної поверхні, по якому проводились вимірювання шорсткості земної поверхні, тобто, для якого справджується встановлена шорсткість, що виражена кількісно. Радіус кореляції нерозривно пов'язаний з шорсткістю земної поверхні і виражає окіл, для якого значення шорсткості в середньому відповідає заявленому, отже, впливає на точність вираження значень шорсткості земної поверхні (*Rahman et al., 2007*).

Вологість земної поверхні – це відсоткове відношення кількості води верхніх кількох сантиметрів ґрунту до маси самого ґрунту, що вказує на

зволоження поверхні. Глибина вимірювань вологості може бути заданою не більше, аніж половина довжини електромагнітної хвилі, що випромінюється радаром, вплив та процес отримання даних якого досліджуються (*Álvarez-Mozos et al., 2007*). Це пов'язано з обмеженням на глибину проникання електромагнітного випромінювання у ґрунт: в середньому не більше половини довжини його хвилі (*Singh et al., 2022*). Зазвичай вологість вимірюється в різних ділянках досліджуваної території, при чому для кожної ділянки земельні проби беруться з декількох навколишніх точок, щоб можна було утворити усереднену споріднену суміш ґрунту і виміряти середню вологість ділянки. Таким чином можна зменшити похибки вимірювань та побудувати загальний, наближений профіль вологості ґрунту досліджуваної території (*Walker et al., 2004*). Вологість земної поверхні впливає на інтенсивність поляризації електромагнітного випромінювання, відбитого від земної поверхні, а також на електропровідність, і тому впливає ще на значення діелектричної проникності, яка є ключовим параметром моделювання зворотного розсіювання радіолокаційного сигналу.

Нахил земних поверхонь по відношенню до падаючої електромагнітної хвилі впливає на відбиття та розсіювання електромагнітної хвилі, а отже, також впливає на значення σ^0 супутникових радарних даних (*Zhou et al., 2011*).

Температура земної поверхні впливає на її електропровідність, що також змінює діелектричну проникність ґрунту (*Rodionova, 2019*).

Структура верхніх шарів земної поверхні впливає на результати вимірювання діелектричної проникності ґрунту та його зволоженості. Але це вже можна віднести до категорії мікроскопічних досліджень, які більш якісно описують мікропроцеси у верхніх міліметрових шарах ґрунту і дозволяють побудувати різні моделі цих процесів (*Jin et al., 2020*).

Серед вказаних параметрів найбільш вагомими є шорсткість земної поверхні, вологість земної поверхні та нахил земних поверхонь, тому що: радіус кореляції земної поверхні, по більшій мірі, є залежним від шорсткості земної поверхні і може бути виражений через цей параметр (*Cheng et al., 2002*); температура земної поверхні пов'язана з вологістю земної поверхні, але через те, що домінуючим

фактором є все ж вологість і те, що існуючі моделі опираються здебільш на вологість, а не температуру ґрунту, при визначенні її впливу на зворотне розсіювання супутникового радарного електромагнітного імпульсу, то нею можна знехтувати; структура верхніх шарів земного покриву стосується більш мікроскопічних процесів та їх впливу на значення діелектричної проникності, що є дуже важливим при дослідженнях значень діелектричної проникності в верхніх кількох міліметрах ґрунту і маловажливим при симуляції значень усередненої діелектричної проникності у верхніх кількох сантиметрах земної поверхні (*Barton, 2012*).

Отже, для Sentinel-1, що має просторову розрізненність на місцевості 10 метрів (*Geudtner et al., 2014*), ідеальними можна вважати відкриті, малозволожені, гладкі гомогенні ділянки, через мінімальний вплив таких збурень як: стрімкі зміни шорсткості земної поверхні, що супроводжуються значними похибками на супутникових знімках низької розрізненності; сильнозволожені ділянки, для зменшення розкиду значень діелектричної проникності при зведенні різнополяризаційних даних до спільної фізичної величини (діелектричної проникності); поверхні з частими схилами, що призводить до значного розсіювання електромагнітного радарного імпульсу в різних точках. Такими можуть виступати аграрні, малозволожені, відкриті ділянки (*Christiansen et al., 2019*; *Schönbrodt-Stitt et al., 2021*).

4.2 Попередня обробка супутникових радарних даних

Перед початком обробки супутникових радарних даних, їх потрібно спершу отримати, відкалібрувати та геометрично скорегувати (*Karamat et al., 2019*). Щоб мати можливість аналізувати отримані дані та чутливість моделей зворотного розсіювання радарного імпульсу, бажано мати доступ до досліджуваних ділянок і/або супроводжувати радарні дані з даними з оптичного діапазону, що мають невелику часову різницю в моментах зондування між оптикою та радаром.

Для задоволення зазначених потреб, досліджуваною ділянкою обрано невелике аграрне поле біля міста Біла Церква за дату 8 серпня 2020 року. На рис. 4.1 наведено приклад отримання радарних даних з супутника Sentinel-1 та оптичних даних з супутника Sentinel-2 з відкритого порталу SciHub Європейської програми Copernicus (*Upadhyay et al., 2022*).

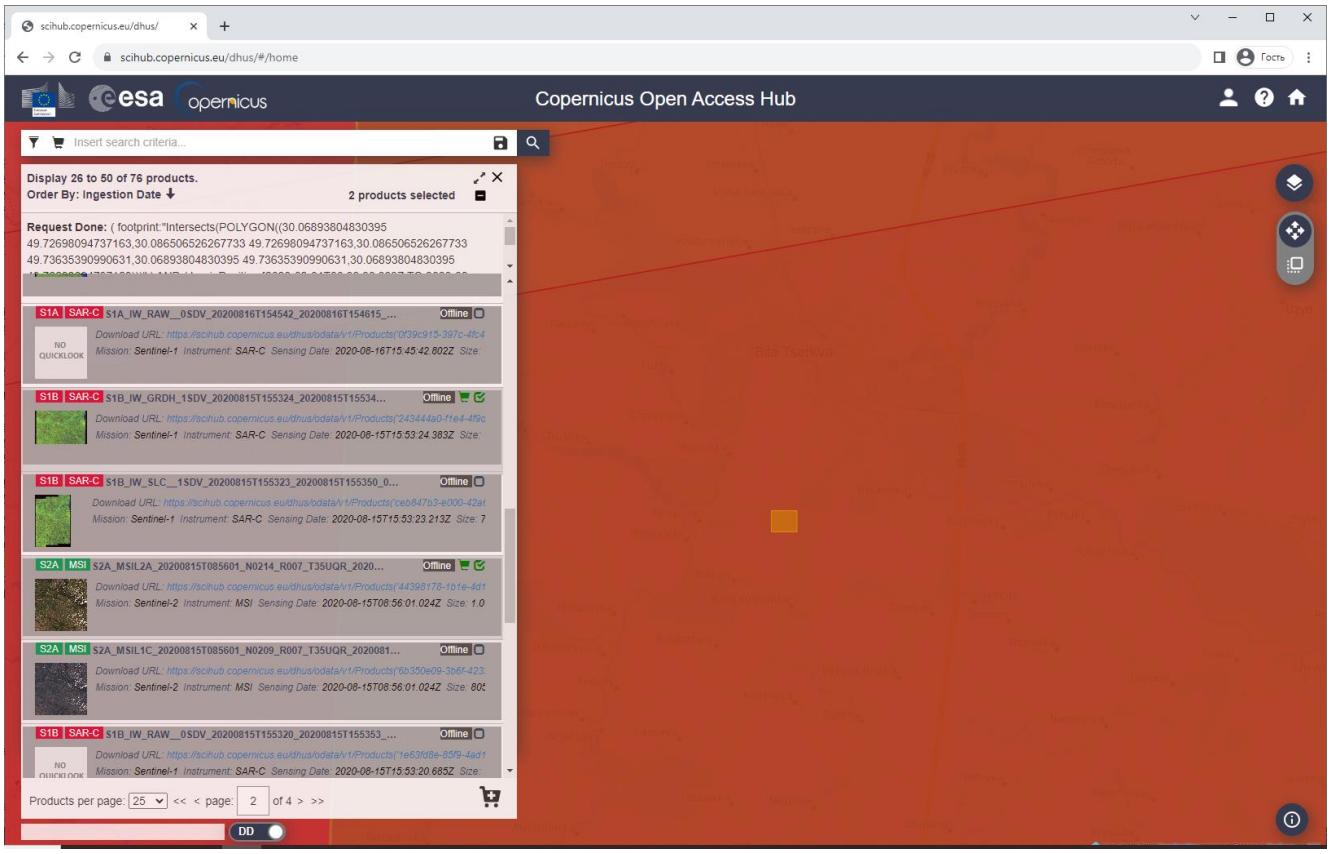


Рис. 4.1. Приклад отримання радарних даних та оптичних даних супутникової системи Sentinel з відкритого порталу SciHub Європейської програми Copernicus

Як показано на рис. 4.1, для завантаження були обрані такі знімки: S1B_IW_GRDH_1SDV_20200815T155324_20200815T155349_022936_02B88F_6C09 із супутника Sentinel-1B та S2A_MSIL2A_20200815T085601_N0214_R007_T35UQR_20200815T120903 із супутника Sentinel-2A.

Примітка: ці знімки обрані для подальшої обробки і, тому, наступні викладки з рисунками в цьому розділі стосуватимуться саме цих зображень (якщо

не вказано іншого), які позначаються як: S1B – радіолокаційне зображення, та S2A – оптичне.

Після завантаження виконується попередня обробка супутникових знімків. Алгоритм обробки супутникових радіолокаційних даних наведено в підрозділі 3.1 цієї роботи. Для оптичних знімків достатньо обітнути їх по географічним координатам, які відповідають досліджуваній ділянці для радіолокаційних даних, що дозволить отримати радіолокаційні та оптичні дані спільної зони інтересу.

Обробка радіолокаційних даних здійснюється за допомогою програмного продукту з відкритим кодом SNAP (Sentinel Applications Platform), який постачається Європейським космічним агентством ESA (European Space Agency) спеціально для обробки даних від супутників сімейства Sentinel (*Lavender, S., Lavender, A., 2015*).

4.2.1 Додавання файлу орбіти

Першим кроком є додавання файлу орбіти, що дозволяє уточнити положення супутника під час зондування.

Приклад додавання файлу орбіти в середовищі SNAP наведено на рис. 4.2.

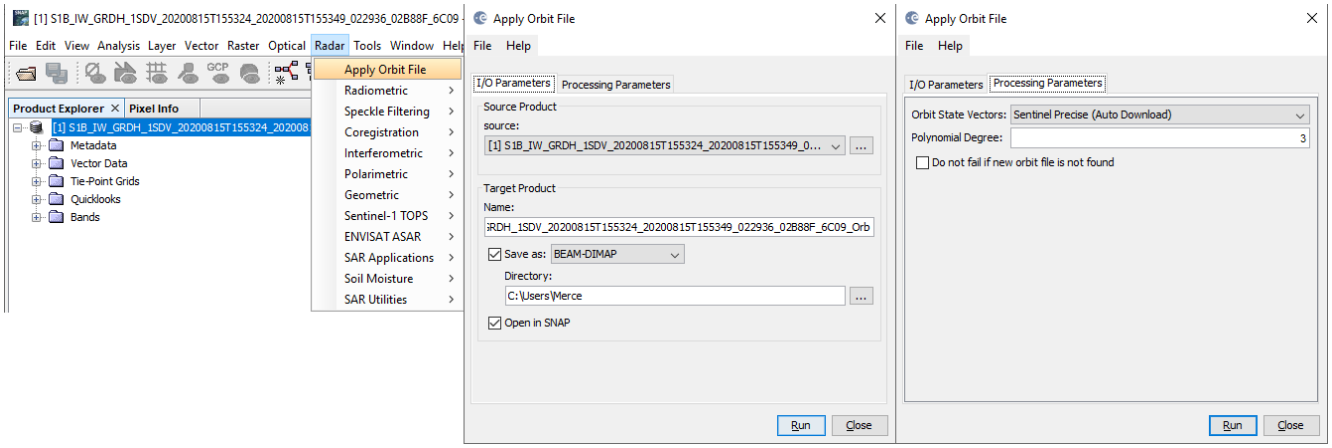


Рис. 4.2. Додавання файлу орбіти до радіолокаційного зображення в середовищі SNAP

Після додавання файлу орбіти потрібно обітнути зображення до зони інтересу.

4.2.2 Обтинання зображення до зони інтересу

Обтинання зображення до зони інтересу дозволить зменшити розмір знімка виключно до розмірів досліджуваної ділянки. Це дозволить значно зменшити обчислювальні витрати на обробку даних.

Приклад обтинання радіолокаційного зображення в середовищі SNAP наведено на рис. 4.3.

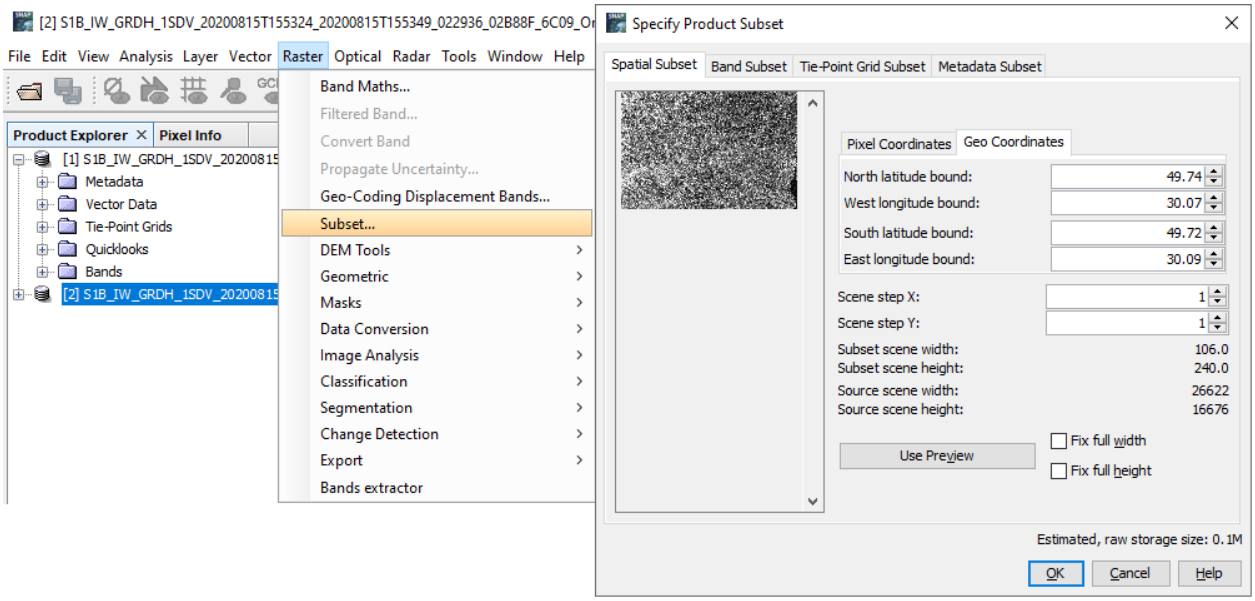


Рис. 4.3. Обтинання радіолокаційного зображення в середовищі SNAP

Після обтинання зображення до зони інтересу потрібно відфільтрувати його дані від теплових перешкод та інших шумів, що знижують якість зображення та погіршують інтерпретацію його даних.

4.2.3 Фільтрування теплового та сигнального шумів

Фільтрування теплового та сигнального шумів дозволяє пригнічити спотворення радіолокаційних даних, що викликані впливом теплових та інших шумових чинників, які погіршують якість даних, а, отже, і їх інтерпретацію.

Приклад фільтрування теплового та сигнального шумів радіолокаційного зображення в середовищі SNAP наведено на рис. 4.4.

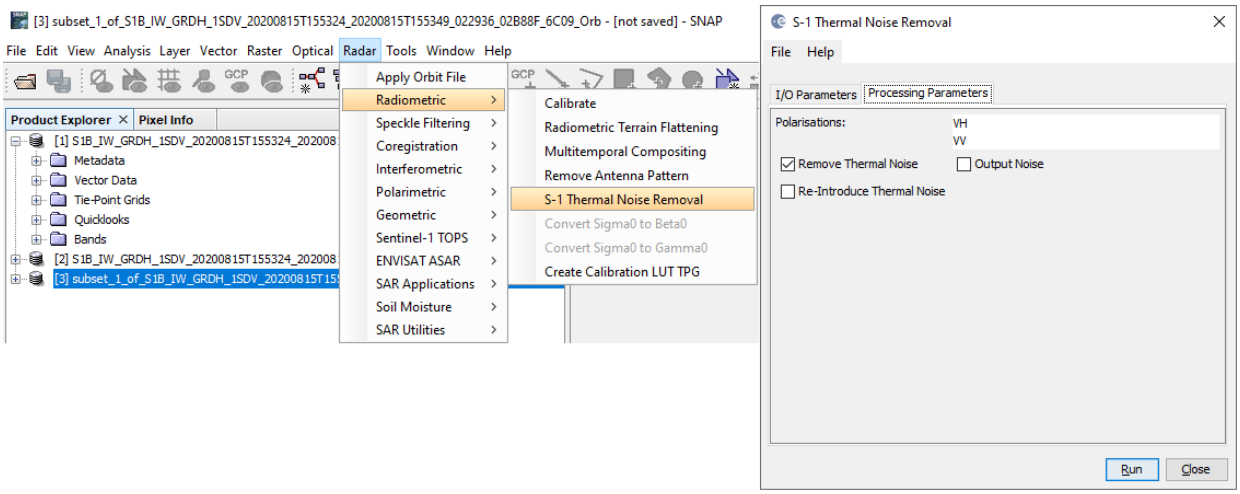


Рис. 4.4. Фільтрування теплового та сигнального шумів радіолокаційного зображення в середовищі SNAP

Після фільтрування теплового та сигнального шумів здійснюється радіометричного калібрування радіолокаційних даних.

4.2.4 Радіометричне калібрування

Радіометричне калібрування дозволить перетворити цифрові коди, записані у файлі радарного продукту Sentinel-1, у фізичні одиниці, а саме – “сигма-нуль” (sigma naught) σ^0. Величина σ^0 буде використовуватись у подальшому.

Приклад радіометричного калібрування супутникового радіолокаційного зображення в середовищі SNAP наведено на рис. 4.5.

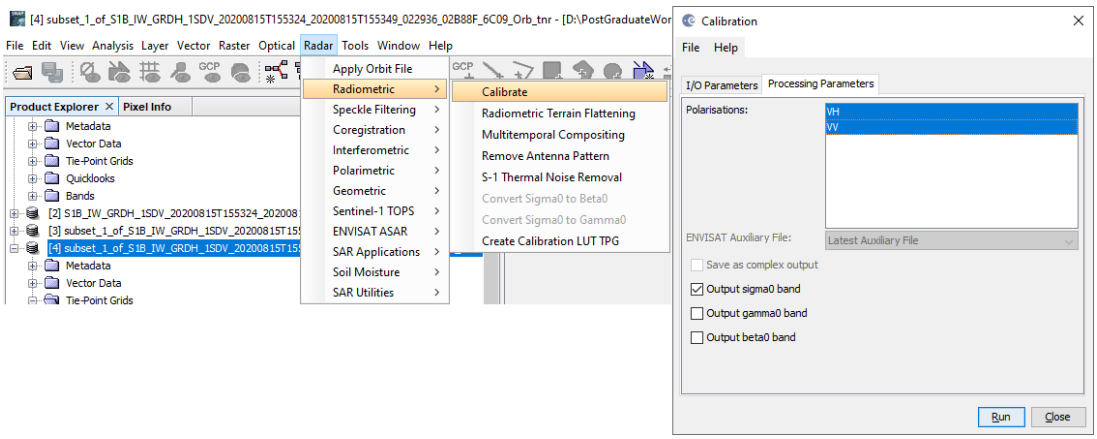


Рис. 4.5. Радіометричне калібрування супутникового радіолокаційного зображення в середовищі SNAP

Після радіометричного калібрування потрібно пригнічити спекл шум.

4.2.5 Фільтрування спекл шуму

Спекл шум викликаний накладанням множинних зворотних відбиттів випромінюваної електромагнітної хвилі і призводить до спотворення якості отриманих даних, а тому ускладнює їх інтерпретацію (*López-Martínez & Fàbregas, 2003*). Для пригнічення спекл шуму можна використати фільтр Лі, який реалізовано в програмному продукті SNAP.

Приклад фільтрування спекл шуму радіолокаційного зображення в середовищі SNAP наведено на рис. 4.6.

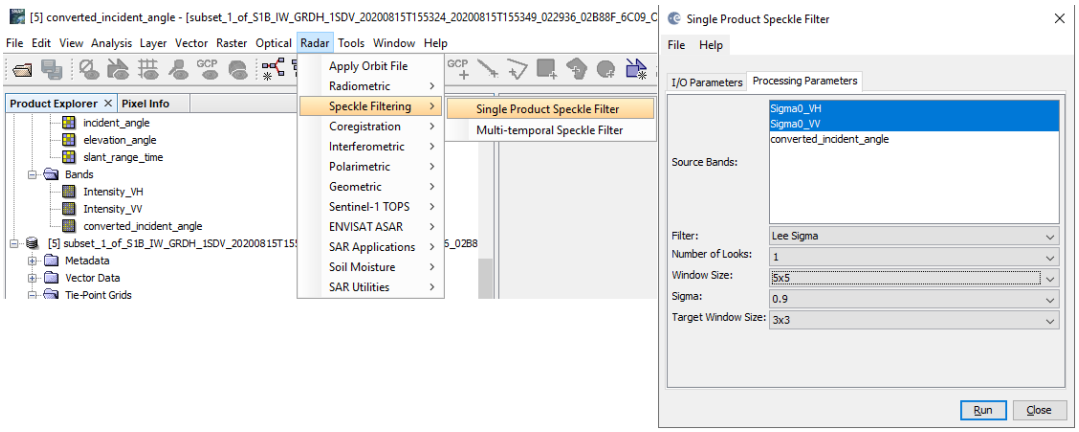


Рис. 4.6. Фільтрування спекл шуму радіолокаційного зображення в середовищі SNAP

Заключним етапом після фільтрування спекл шуму є дальнісно-доплерівська геометрична корекція.

4.2.6 Дальнісно-доплерівська геометрична корекція

Дальнісно-доплерівська геометрична корекція дозволяє зменшити похибки геометричних зсувів та затінення на зображенні, які викликані внаслідок невеликих різниць часових інтервалів між надісланими та отриманими радарними імпульсами, що виникають внаслідок перепадів висот земної поверхні.

Приклад дальнісно-доплерівської геометричної корекції в середовищі SNAP наведено на рис. 4.7.

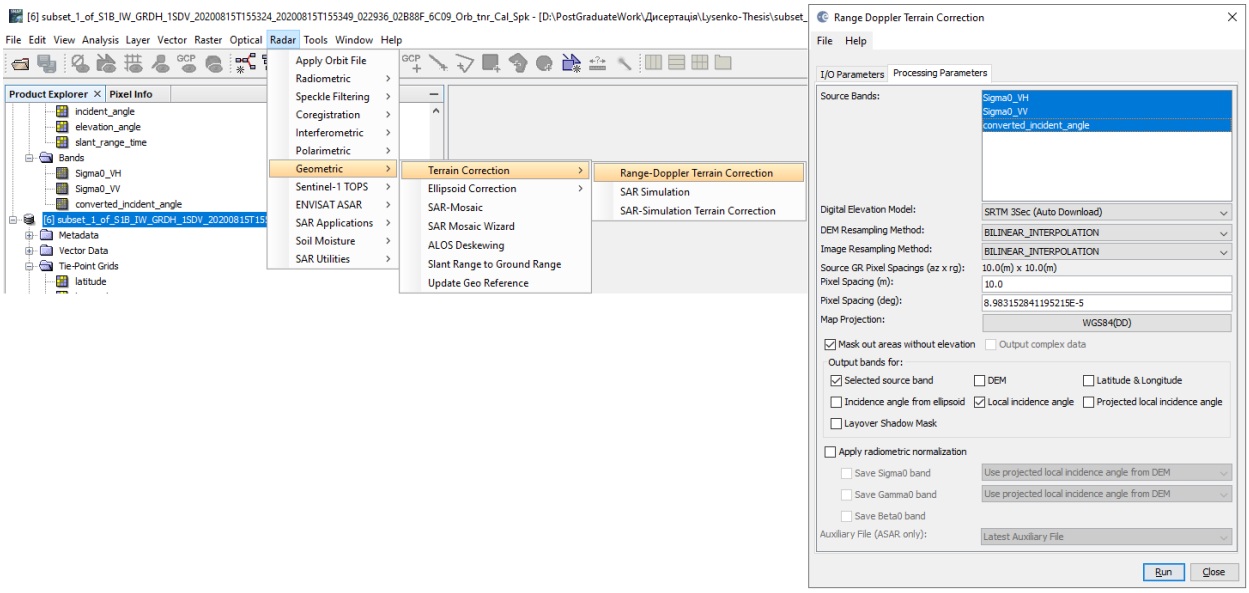


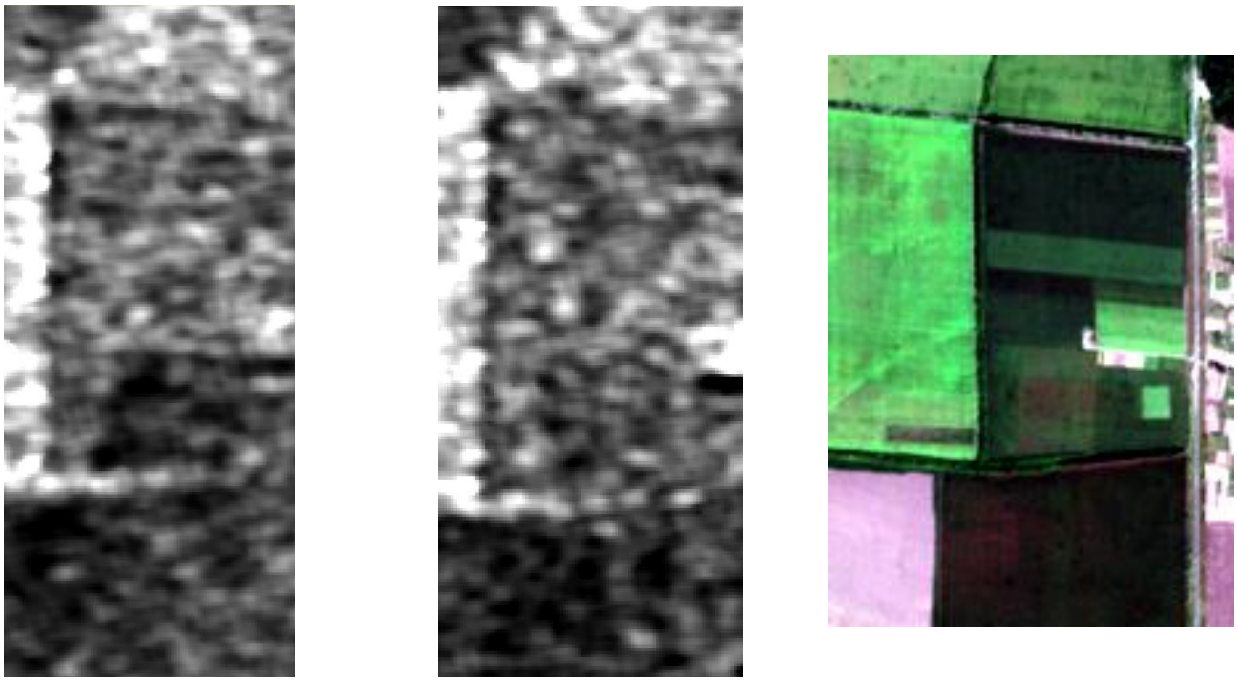
Рис. 4.7. Дальнісно-доплерівська геометрична корекція радіолокаційного зображення в середовищі SNAP

Після дальнісно-доплерівської геометричної корекції отримуємо повністю оброблені радіолокаційні дані.

Для візуального співставлення радіолокаційні дані супроводжуються також відповідним зображенням в оптичному діапазоні. Це дозволяє покращити інтерпретацію одержуваного результату та виявити, які об’єкти можуть призводити

до розбіжностей в моделюванні. Такий підхід особливо дієвий при попіксельній обробці, коли кожен піксел обробляється окремо, а тому результати можливо розрізнити. Певна геометрична невідповідність між радарним S1B та оптичним S2A зображеннями не заважає аналізу результату.

Результат попередньої обробки радіолокаційних супутникових даних S1B, а також зображення тестової ділянки у оптичному діапазоні показані на рис. 4.8. Ці знімки представлені за допомогою програми SNAP.



а *б* *в*

Рис. 4.8. Результат попередньої обробки радіолокаційних супутникових даних: *а* – σ^0 у вертикальній поляризації, *б* – σ^0 в горизонтальній поляризації, *в* – зображення в оптичному діапазоні

Одержані попередньо оброблені радіолокаційні знімки можуть бути використані у моделях зведення різнополяризаційних радарних супутникових даних в єдиний фізичний показник.

4.3 Зведення різнополяризаційних супутникових даних в єдиний фізичний показник

Перед зведенням різнополяризаційних супутникових даних в єдиний фізичний показник, спочатку потрібно визначити, який саме це буде показник та яка модель буде використана для перетворення супутникових даних в обрану фізичну величину. Щоб не втрачати загальності даної методики, алгоритм зведення різнополяризаційних радарних супутникових даних в єдиний фізичний показник, описаний в підрозділі 3.2 цієї роботи, першим кроком містить вибір фізичної величини, в яку будуть перетворені радарні дані. Але, враховуючи наявні моделі зворотного розсіяння і їх залежності від параметрів, описаних в підрозділі 2.2 цієї роботи, а також специфіку роботи РСА Sentinel-1, що вказана у вступі розділу 4, такою величиною доцільно обрати діелектричну проникність земної поверхні.

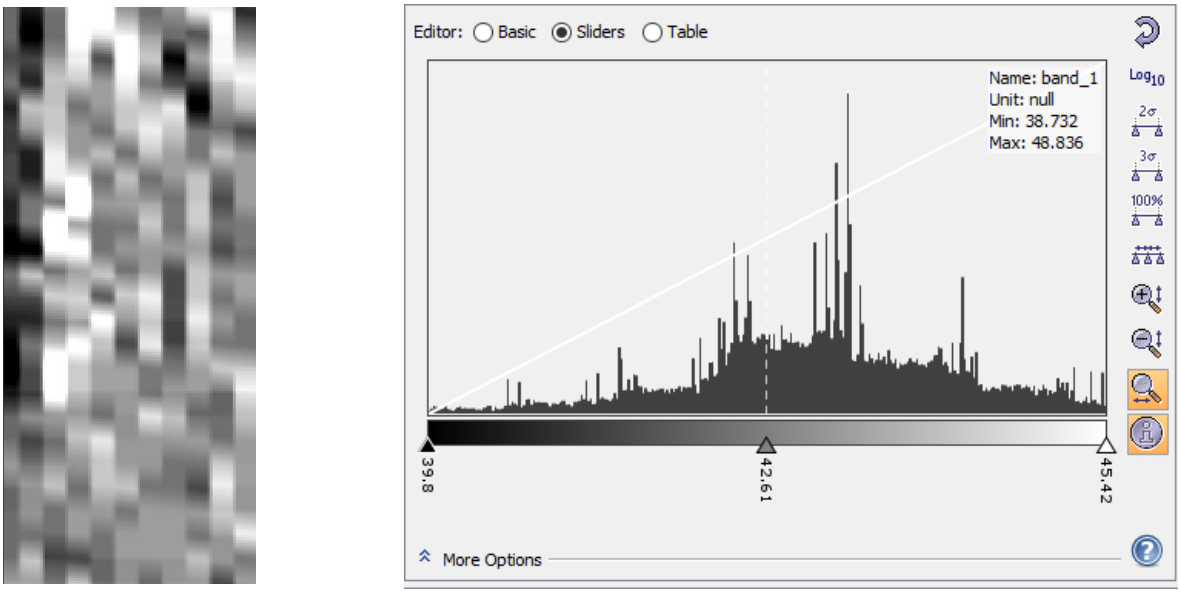
4.3.1 Вибір моделі супутникового зворотного розсіювання багатополяризаційного радарного сигналу

Єдиним фізичним показником зведення різнополяризаційних супутникових даних варто визначити діелектричну проникність земної поверхні, тому що вона:

- є домінуючим показником величини зворотного розсіювання радіолокаційного сигналу при фіксованому куті падіння електромагнітної хвилі та при фіксованій шорсткості земної поверхні;
- є спільним показником для моделей зворотного розсіювання, описаних в підрозділі 2.2 цієї роботи;
- є фізично обґрунтованою величиною, що пов’язана з електромагнітними властивостями земної поверхні;
- є сталою величиною при порівнянні даних з одного джерела, період знімання між якими має невелику часову затримку (частки секунди для міжполяризаційних послідовних зондуваннях поверхні Землі).

Отримані за допомогою РСА Sentinel-1 дані S1B з підрозділу 4.2 містять такі параметри:

1) кут падіння радіолокаційних імпульсів;
2) значення “сигма-нуль” σ_{vv}^0 зворотного розсіюваного сигналу;
3) міжполяризаційне значення отримуваного розсіюваного сигналу σ_{vh}^0;
4) значення $ks \leq 3$, так як шорсткість обмежена половиної довжини хвилі, де довжина хвилі $\lambda \approx 0{,}055465763$ м, а $k = \frac{2\pi}{\lambda} \approx 113{,}280426832$ м$^{-1}$, граничне значення $s = \frac{\lambda}{2} \approx 0{,}0277328815$ м, тоді $ks = \pi \approx 3{,}14$. А при $s = 0{,}026$ (2,6 см) $ks \approx 2{,}945291097632 < 3$;
5) не містять двовимірного спектру ізотропних нерівностей земної поверхні $W(u, v)$;
6) не містять дані про вологість, так як не було проведено вимірювань вологості ґрунту;
7) значення локального кута падіння знаходяться у межах $38{,}732° < \theta < 48{,}835°$, а його розподіл наведено на рис. 4.9.



а *б*

Рис. 4.9. Розподіли локального кута падіння попередньо оброблених супутникових радіолокаційних даних S1B: *а* – у площині радарного зображення, *б* – гістограма

Отже, відповідно до алгоритму 3.2.1 варто обрати модель Оха, так як наявні дані задовольняють її визначеності, містять міжполяризаційну складову, що унеможливлює застосування моделі Дюбуа, а відсутність спектру ізотропних нерівностей земної поверхні не дозволяє застосувати модель IEM.

4.3.2 Цільова функція та її обмеження при оптимізації діелектричної проникності

Так як обрано модель Оха, яка визначена для $0{,}13 \leq ks \leq 6{,}98$, і локального кута падіння радіолокаційних імпульсів $10° \leq \theta \leq 70°$, а супутникові радіолокаційні дані Sentinel-1 містять інформацію з двох поляризацій vv та vh, то, відповідно до моделі цільової функції та її обмежень описаних в пункті 3.2.2 цієї роботи, цільова функція для кожного піксела радарного зображення має наступний вигляд:

$$\left|\sigma_{vv}^{0} - \sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)\right|^2 + \left|\sigma_{vh}^{0} - \sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)\right|^2 \to \min$$

$$\max|\varepsilon_{vv} - \varepsilon_{vh}| < \epsilon$$

$$0.001 \leq s \leq \frac{\lambda}{2},$$

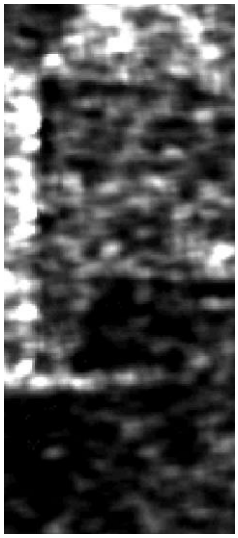
де σ_{vv}^{0} – значення “сигма-нуль” супутникових радіолокаційних даних Sentinel-1, отримані у режимі поляризації vv, а σ_{vh}^{0} – отримані у режимі поляризації vh; $\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$ – змодельоване за моделлю Оха, “сигма-нуль” значення піксела для розрахованої діелектричної проникності в заданому пікселі, ε_{vv} та фіксованого значення шорсткості s і заданому куту падіння θ, який отримується з метаданих радіолокаційного зображення; $\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$ – відповідно, змодельоване значення “сигма-нуль” при ε_{vh}.

4.3.3 Перетворення значень “сигма-нуль” в діелектричну проникність

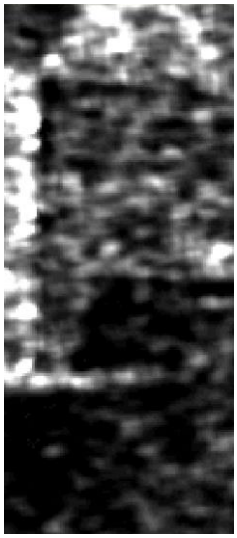
За допомогою моделі Оха та цільової функції описаної в попередньому пункті, значення “сигма-нуль” супутникових радіолокаційних даних, отриманих

РСА Sentinel-1 можуть бути перетворені на значення діелектричної проникності у, відповідно, двох поляризаціях: vv та vh.

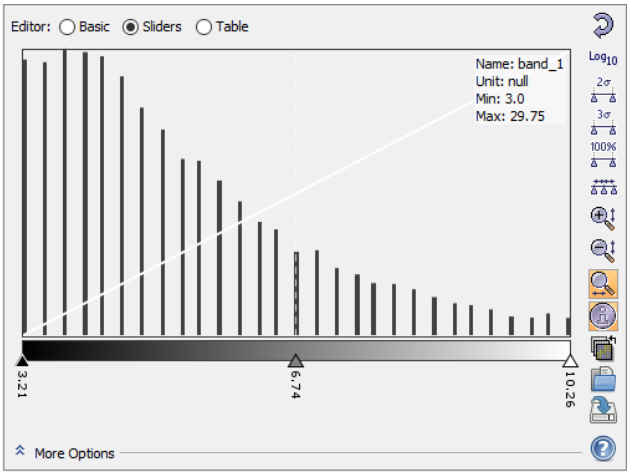
Перетворення здійснено за допомогою комп'ютерної оброки з використанням розробленого автором програмного тестувального комплексу (Додаток В) на базі 64-бітної операційної платформи та мови програмування Python (*Lutz, 2013*). Результат перерахунку супутникових даних у діелектричну проникність, а також гістограми новостворених зображень наведено на рис. 4.10.



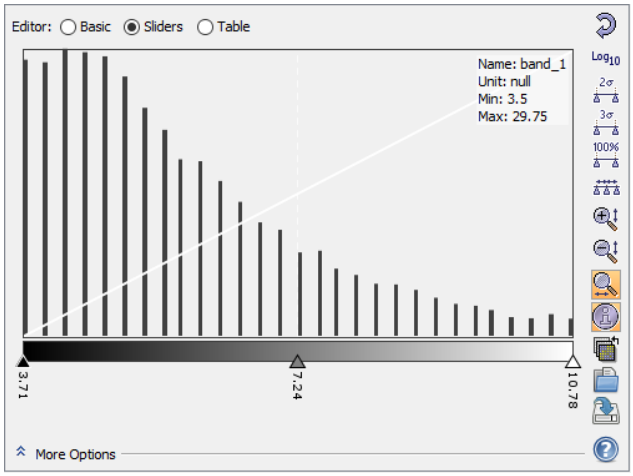
а



б



в



г

Рис. 4.10. Результат перерахунку супутникових радіолокаційних даних у діелектричну проникність земної поверхні: *а* – у вертикальній поляризації, *б* – у горизонтальній поляризації. Гістограма діелектричної проникності: *в* – у вертикальній поляризації, *г* – у горизонтальній поляризації

Як видно з рисунку, діелектрична проникність на обох знімках мало відрізняється одна від одної, що і повинно спостерігатись в справжніх природніх вимірюваннях. Невеликі похибки допустимі, адже знімки Sentinel-1 отримуються з просторовою розрізненністю на місцевості 10 метрів, а це означає, що значення коефіцієнта зворотного розсіяння в кожному пікселі є усередненим значенням ділянки площею близько 100 м^2. Отже, якщо між послідовними отриманнями даних між двома поляризаціями є часова затримка, то є і субпіксельне зміщення. Тому дані з двох поляризацій не можуть представляти константну величину діелектричної проникності ε, а повинні відрізнятись на деяку величину. Припускається, що ця величина не перевищує певне значення ϵ, наприклад, $\epsilon = 0.5$. Адже не повинно бути значних різниць в діелектричній проникності при субпіксельних зміщеннях. Також варто відмітити, що значення діелектричної проникності цілком лежать в довірчому діапазоні таких значень для гомогенних відкритих ґрунтів (*Mohamed, Paleologos, 2018*).

Нижче, на рис. 4.11, також наведене зображення розподілу шорсткості, при якій було змодельоване оптимальне значення діелектричної проникності.

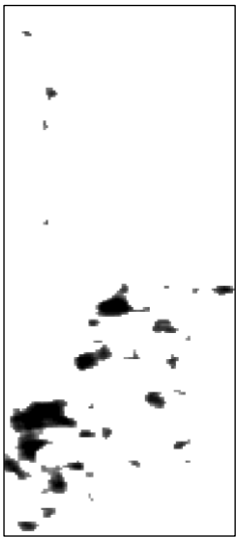


Рис. 4.11. Змодельований розподіл значень шорсткості при оптимальних значеннях діелектричної проникності

Значення шорсткості рис. 4.11 були отримані шляхом перебору можливих її значень і відбору таких, при яких досягались оптимальні значення діелектричної проникності. Це дозволяє усунути необхідність вимірювання шорсткості безпосередньо на досліджуваній ділянці, що є досить часозатратним процесом і вимагає спеціального обладнання. Варто зазначити, що наявність реальних даних шорсткості повинно позитивно вплинути на точність результату. Під оптимальними значеннями діелектричної проникності маються на увазі значення, при яких була досягнута перша умова цільової функції, а саме – мінімізація сум квадратів модулей різниць реальних та змодельованих значеннях “сигма-нуль”. На рис. 4.12 наведено зображення фактичних та змодельованих значень “сигма-нуль” для обох поляризацій: vv та vh.

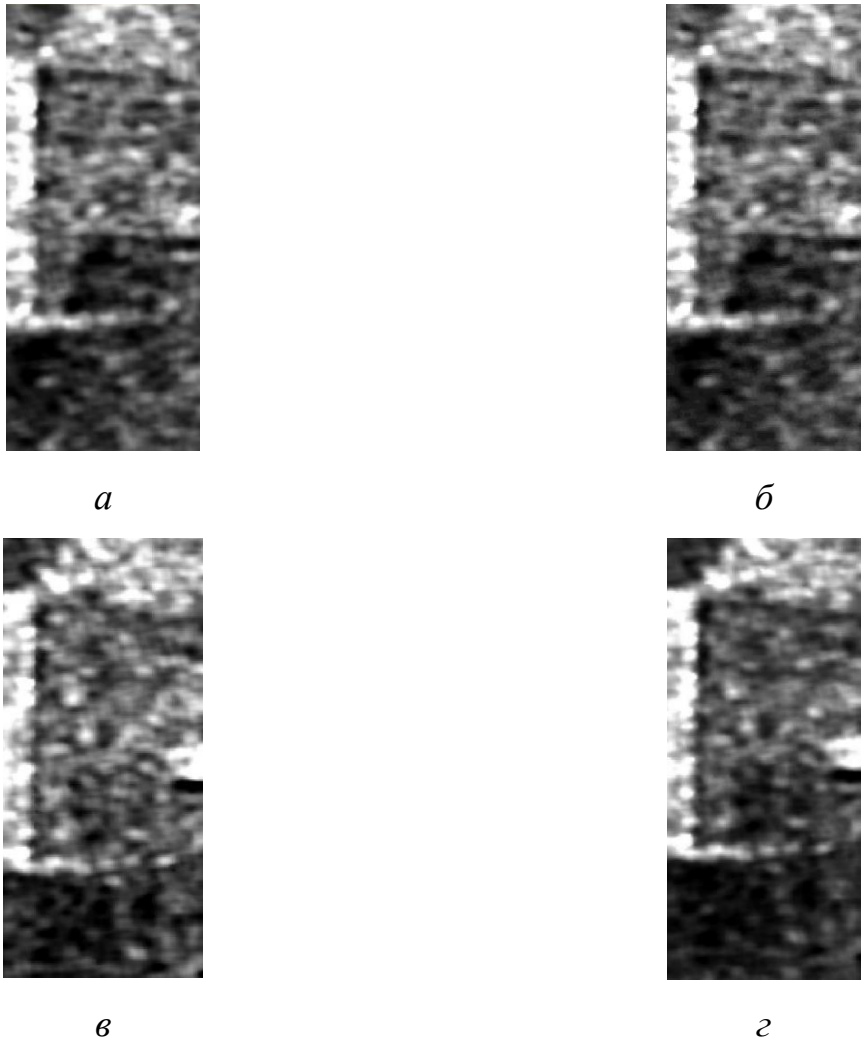
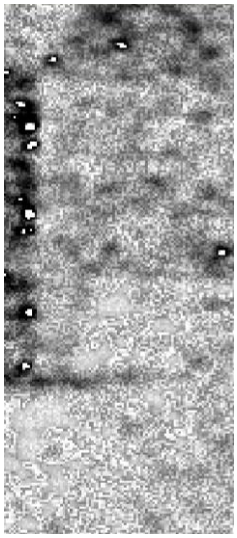
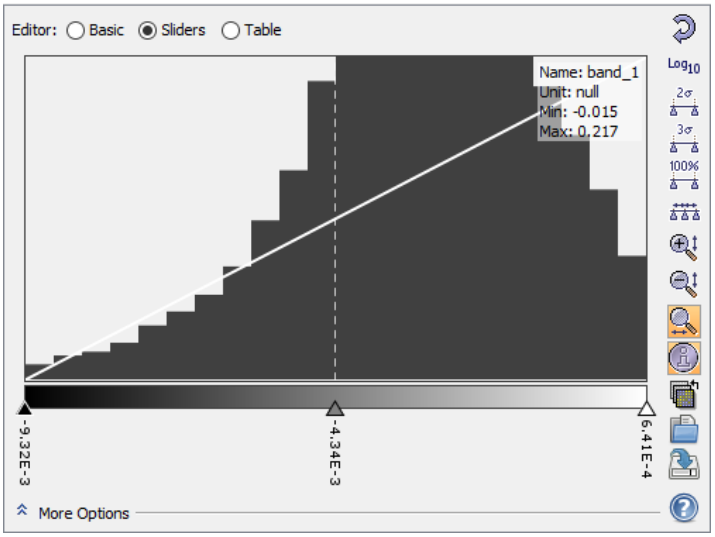


Рис. 4.12. Зображення фактичних: *а* – σ_{vv}^0, *в* – σ_{vh}^0; та змодельованих значень “сигма-нуль”: *б* – σ_{vv}^0, *г* – σ_{vh}^0

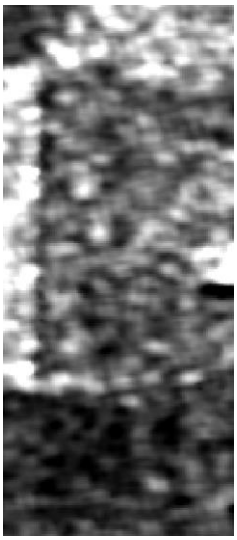
Як видно із рис. 4.12 – значення “синтетичної” діелектричної проникності (адже підібрана без фактичних вимірювань і може представляти собою комплексний показник, який враховує вплив не тільки діелектричної проникності) дозволяють провести обернене моделювання, в результаті якого отримуються фактичні зображення з невеликою похибкою. Розподіл цих зображень описується рис. 4.13.



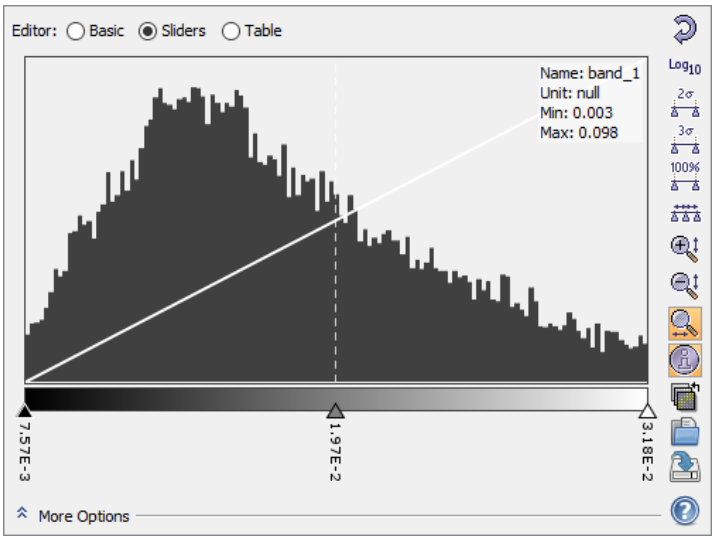
а



б



в



г

Рис. 4.13. Розподіли похибок фактичних та змодельованих значень “сигма-нуль”: *а* – просторове σ_{vv}^0, *б* – гістограма похибок σ_{vv}^0, *в* – просторове σ_{vh}^0, *г* – гістограма похибок σ_{vh}^0

Зображення рис. 4.13 були утворені як різниці між фактичними та змодельованими значеннями. У міжполяризаційних даних – σ_{vh}^{0} розходження більші, аніж у σ_{vv}^{0}. Це пов'язано зі значною втратою енергії у міжполяризаційному реєструванні радарного сигналу (*El Hajj et al., 2016*). Але, оскільки величина шумів залишається такою самою, то відношення "сигнал-шум" значно знижується, що суттєво погіршує якість зображення. Тим не менш, отримані значення похибок придатні для застосування у алгоритмі підвищення просторової розрізненності супутникових знімків.

4.4 Підвищення просторової розрізненності супутникових зображень

Підвищення просторової розрізненності було здійснено за алгоритмом, описаним в підрозділі 3.4 цієї роботи, за допомогою спеціального програмного забезпечення на мові програмування C/C++ (*Kernighan, Ritchie, 1988*) із залученням відкритих бібліотек комп'ютерного зору (*Rajab Asaad et al., 2023*).

Інтерфейс розробленого програмного забезпечення показано на рис. 4.14.

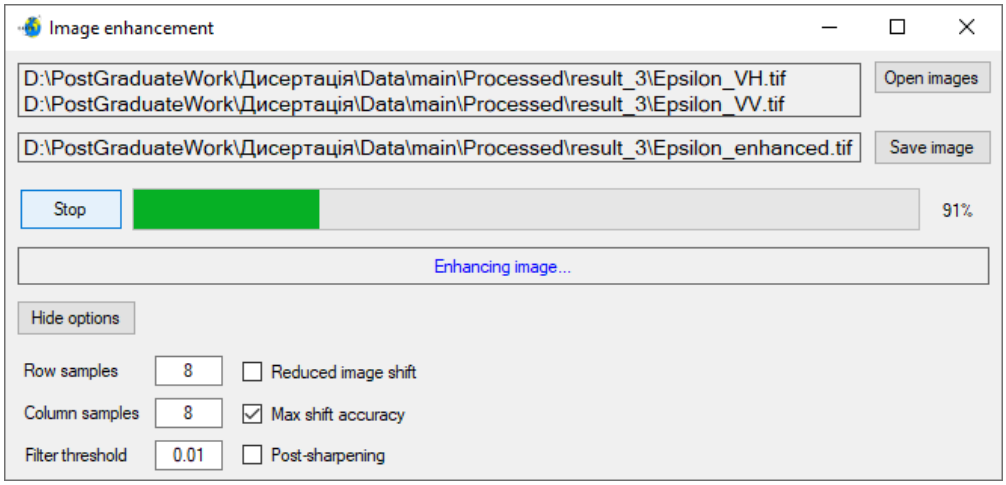


Рис. 4.14. Інтерфейс розробленого спеціалізованого програмного забезпечення підвищення просторової розрізненності супутникових знімків методом надрозрізненності з двократним збільшенням кроку піксельної сітки цільового зображення

Він дозволяє обирати вхідні дані, місце збереження результату, відображає хід відновлення зображення підвищеної просторової розрізненності, а також містить допоміжні вибіркові параметри керування процесом: підвищення точності обчислень субпіксельного зсуву, зменшення фрагменту зображення для обчислення субпіксельного зсуву з метою скорочення обчислювальних витрат, застосування різноманітних видів фільтрування в частотній області, та вибору точності апроксимації субпіксельного зсуву по кожній з осей зображення.

В результаті обробки отримується двократно збільшене по кожній з осей зображення синтетичної діелектричної проникності підвищеної розрізненності (Рис. 4.15).

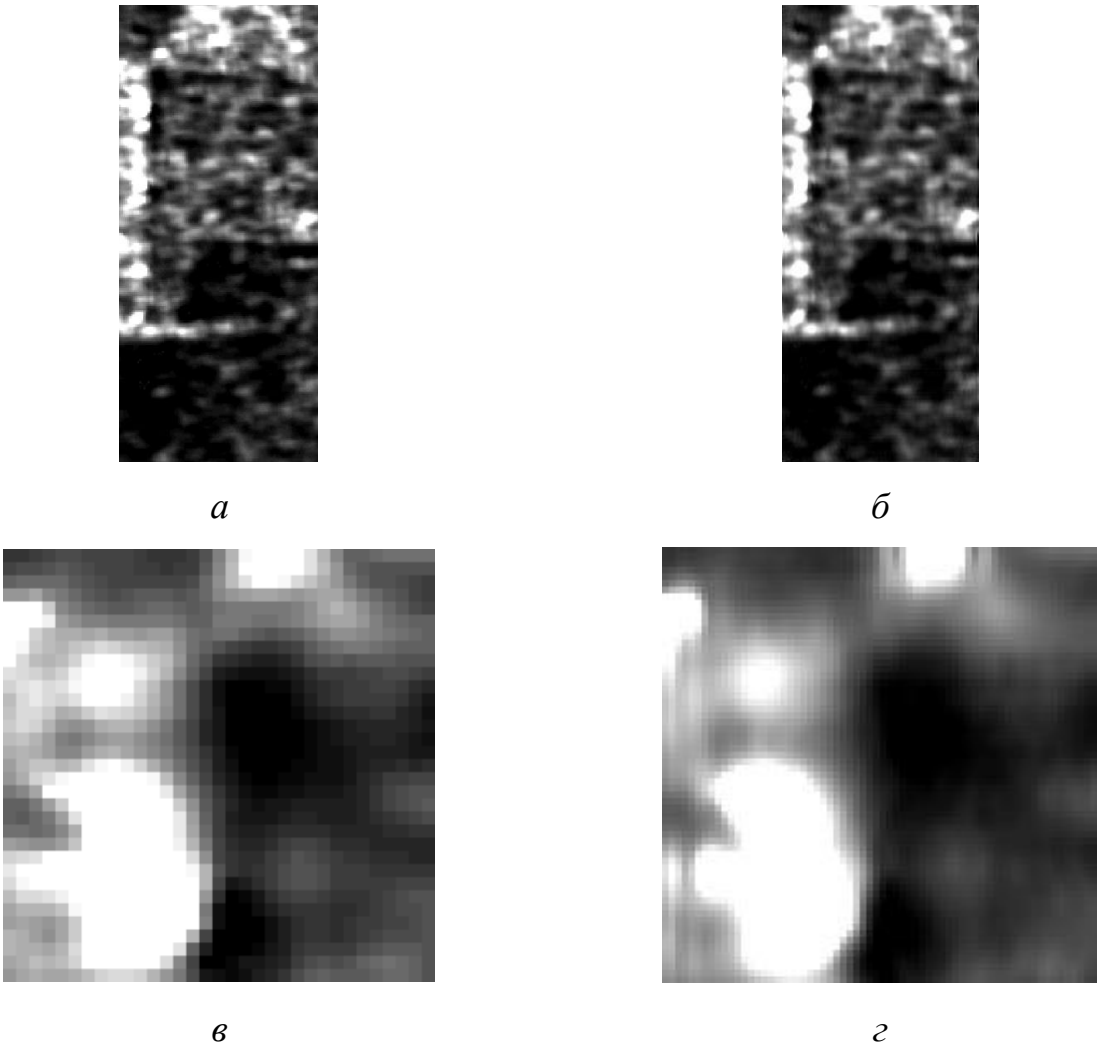
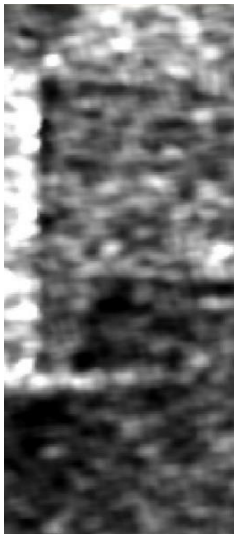
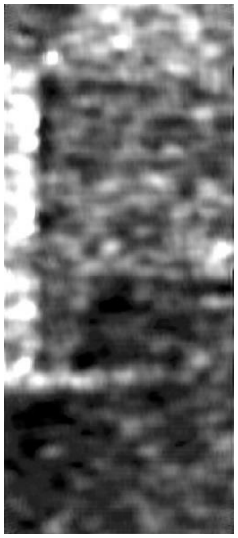


Рис. 4.15. Зображення синтетичної діелектричної проникності: *а* – низької розрізненності σ_{vv}^{0}, *б* – підвищеної розрізненності $\sigma_{enhanced}$; та їх збільшені фрагменти: *в* – низької розрізненності, *г* – підвищеної розрізненності

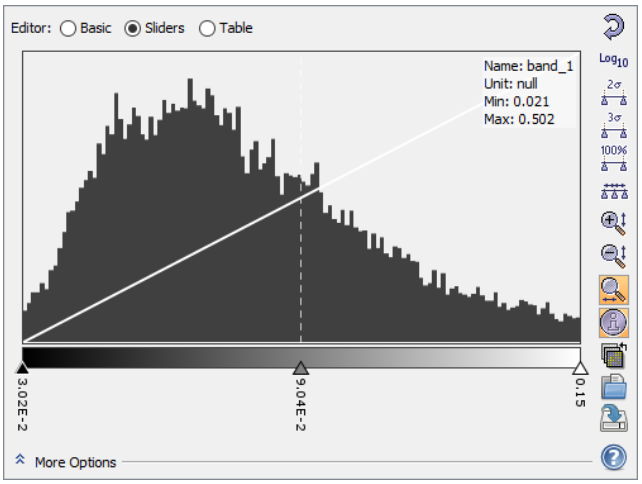
Результат оберненого моделювання величини “сигма-нуль” по одержаних значеннях синтетичної діелектричної проникності з підвищеною просторовою розрізненністю наведено на рис. 4.16.



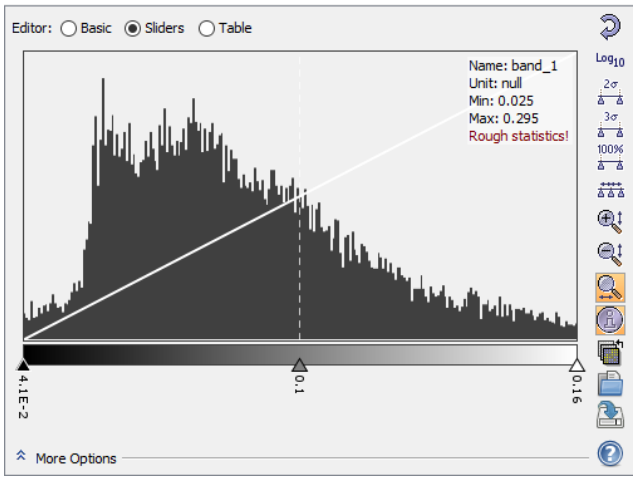
а



б



в



г

Рис. 4.16. Результат оберненого моделювання величин “сигма-нуль” по одержаних значеннях синтетичної діелектричної проникності: *а* – реальне значення σ_{vv}^{0} низької розрізненності, *б* – змодельоване значення σ_{vv}^{0} , *в* – гістограма зображення *а*, *г* – гістограма зображення *б*

Обмеженість оберненого моделювання полягає в наскрізній незмінності шорсткості для зображень високої та низької розрізненності. Для вирівнювання розрізненності шорсткості була здійснена бікубічна інтерполяція. Такій самій

обробці був підданий і розподіл кута падіння θ. На рис. 4.16 також наведені гістограми тестових радарних зображень, які отримані в програмному середовищі SNAP.

Як можна бачити з рис. 4.16, навіть при природних обмеженнях моделювання одержуються добре збіжні фактичні значення радарного зворотного розсіяння. Моделювання відфільтровує можливі статистичні викиди вхідного радіолокаційного зображення при збереженні середнього значення та дисперсії.

4.5 Оцінка підвищення просторової розрізненності

Оцінка підвищення просторової розрізненності була здійснена за алгоритмом, описаним в підрозділі 3.5 цієї роботи, з залученням програмного скрипта, реалізованого у відкритому обчислювальному середовищі SciLab (*Nagar, Nardone, 2017*). Скрипт (рис. 4.17) витягує двоспрямовані перехідні характеристики з цифрового зображення, апроксимує відповідні ФПМ і за ними обчислює фактичну піксельну розрізненність.

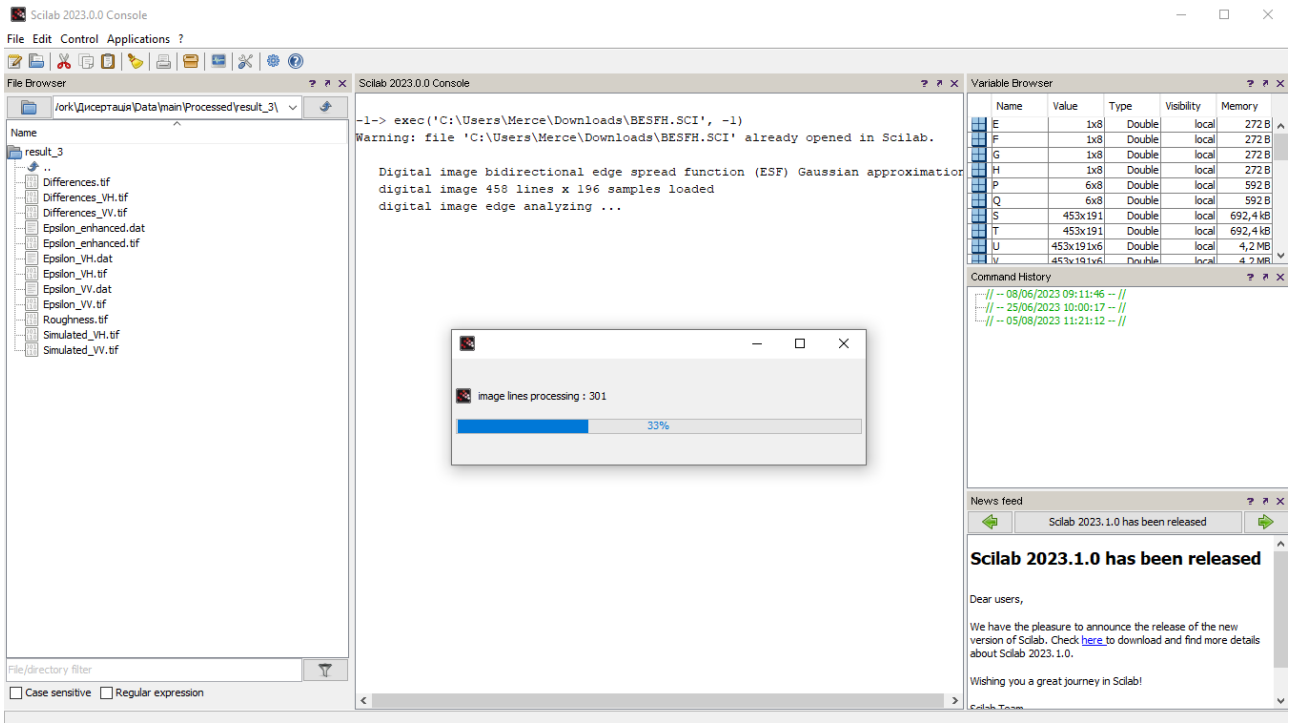


Рис. 4.17 – Скрипт оцінювання просторової розрізненності зображення в середовищі SciLab

Результат обчислень за допомогою скрипта оцінювання просторової розрізненності зображення наведено на рис. 4.18.

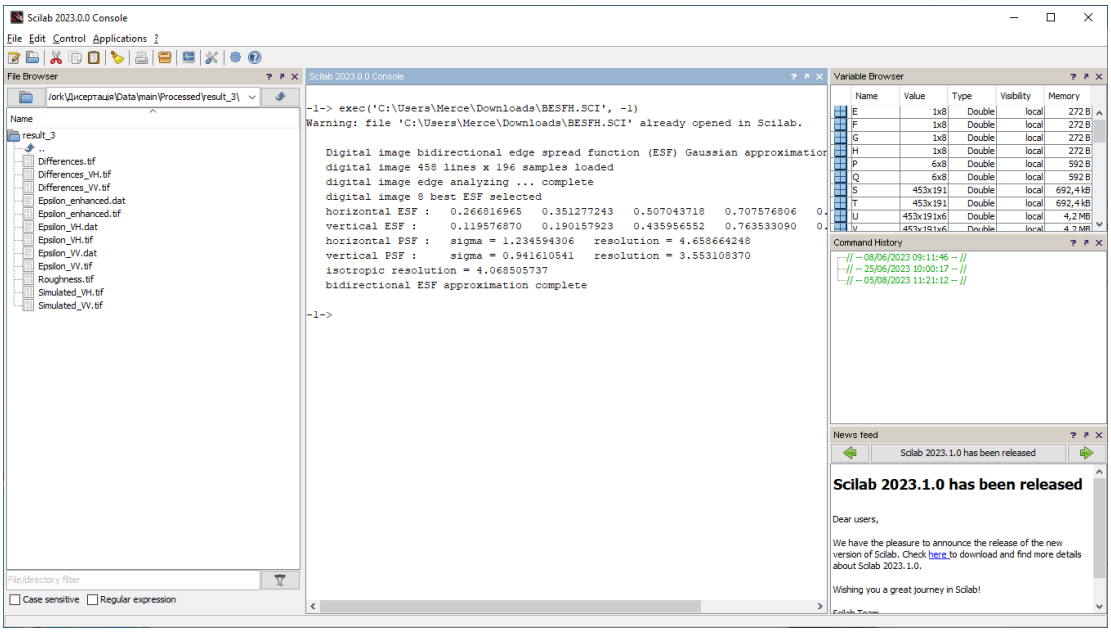


Рис. 4.18 – Результат обчислень скрипта оцінювання просторової розрізненності зображення в середовищі SciLab

Визначені перехідні характеристики зображення підвищеної розрізненності показано на рис. 4.19.

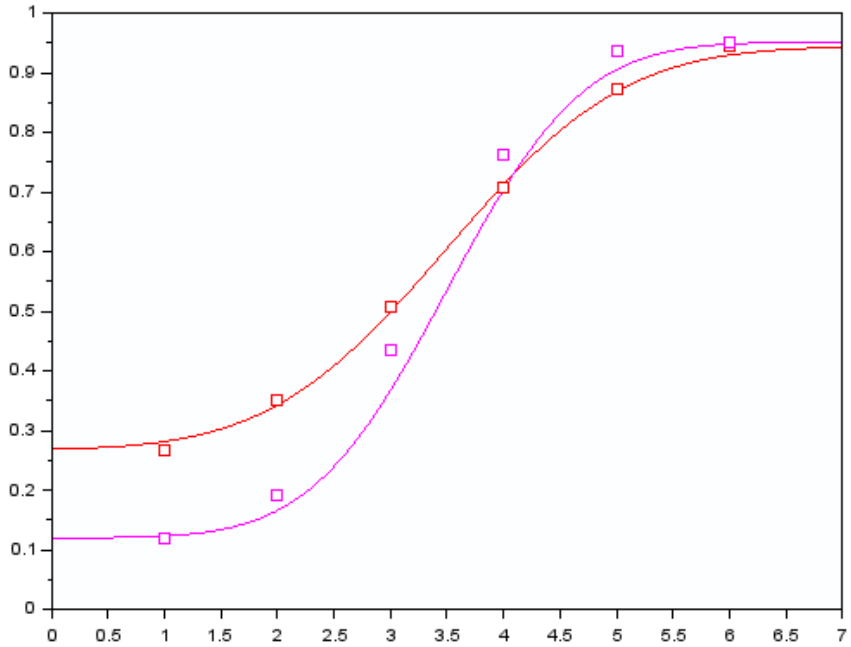


Рис. 4.19. Перехідні характеристики зображення підвищеної розрізненності

Результати оцінки просторової розрізненності зображень діелектричної проникності – вхідного низької розрізненності та результуючого – підвищеної розрізненності містяться в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Фактичні значення піксельної просторової розрізненності зображень

Зображення	Просторова розрізненність у горизонтальному напрямку	Просторова розрізненність у вертикальному напрямку	Ізотропна (загальна) просторова розрізненність
ε_{vv} з низькою просторовою розрізненністю	2,214	3,658	2,846
ε_{vh} з низькою просторовою розрізненністю	2,181	3,649	2,821
ε з підвищеною просторовою розрізненністю	4,658	3,553	4,068

Кількісна оцінка підвищення просторової розрізненності, описана в підрозділі 3.5 цієї роботи, дорівнює:

$$\text{Підвищення} = \frac{2 \cdot \frac{2.846+2.821}{2}}{4.068} \cdot 100\% - 100\% \approx 39{,}3\ \%,$$

Отже, просторова розрізненність була підвищена на 39,3 %.

4.6 Оцінка підвищення інформативності

Оцінка підвищення інформативності проведена з урахуванням викладень, підрозділу 2.5 цієї дисертаційної роботи за (2.6).

Якщо інші параметри інформативності – взаємну інформація Кульбака-Лейблера між ймовірнісними розподілами спектральних сигналів об’єктів та відношення “сигнал-шум” вважати сталими, а просторова розрізненність

змінюється як в табл. 4.1, то для зображення діелектричної проникності низької просторової розрізненності інформативність становить:

$$C^{base} = \frac{const}{4 \cdot \left(\frac{2,846+2,821}{2}\right)^2} \approx 0,031 \cdot const \ ,$$

а для зображення підвищеної просторової розрізненності

$$C^{enhanced} = \frac{const}{4 \cdot \left(\frac{4,068}{2}\right)^2} \approx 0,06 \cdot const \ .$$

Таким чином, підвищення інформативності становить $\frac{C^{enhanced}}{C^{base}} \cdot 100\ \% - 100\ \% \approx 94,06\ \%$.

Для усунення фактору випадковості і одержання статистично репрезентативних результатів тестування методики було поширено на більш широку вибірку двополяризаційних радарних зображень (Додаток А.1), які були оброблені відповідно до методики та оцінені (Додаток Б). За результатами тестування середній показник підвищення інформативності склав 85,40 %.

4.7 Обмеженість моделі Оха в моделюванні зворотного розсіювання радіолокаційного сигналу від поверхонь з сильним коефіцієнтом зворотного відбиття

Враховуючи деякі негативні результати підвищення інформативності (Додаток А.2, Додаток Б.10, Додаток Б.28), а також слабке підвищення інформативності окремих наборів даних (Додатки Б.2, Б3, Б.9, Б.11, Б.20, Б.21, Б.23, Б.24, Б.25, Б.26, Б.29) було проведено статистичний аналіз зазначених наборів даних (Додаток А.3). В ході аналізу було помічено, що всі проблемні набори мають спільну характеристику: максимальне значення зворотного розсіюваного сигналу “сигма-нуль” у вертикальній поляризації перевищує значення в 10 одиниць.

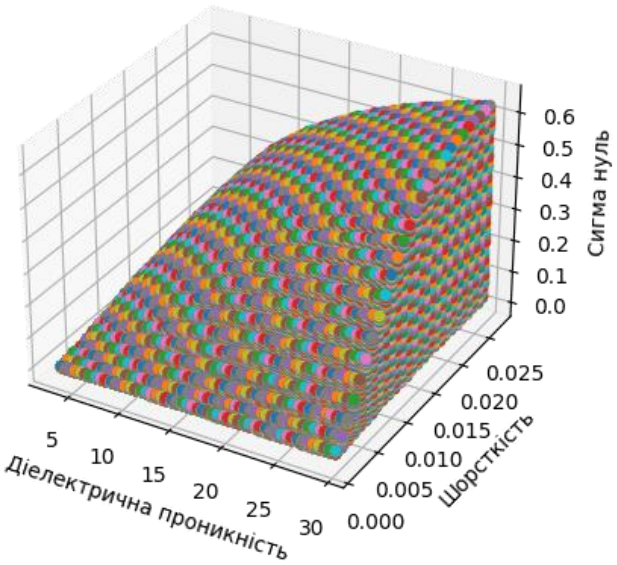


Рис. 4.20. Обмеженість моделі Оха при симуляціях значень σ_{vv}^{0} за умов $\varepsilon < 30$, $s < \frac{\lambda}{2}$, $10° \leq \theta \leq 70°$

Зважаючи на неспроможність моделі Оха симулювати, при заданих обмеженнях ($\varepsilon < 30$, $s < \frac{\lambda}{2}$) значення коефіцієнта зворотного розсіювання для поляризації vv більше, аніж 0,6 (див. рис. 4.20), можна зробити висновок, що значення σ_{vv}^{0}, що виходять за обмеження моделі Оха, забруднюють результати оберненої симуляції. Теоретично обмеження становитиме 0,6, але, беручи до уваги цільовий критерій мінімізації різниць змодельованих та реальних значень “сигма-нуль” в обох поляризаціях (vv та vh), насичення на практиці може відбуватись раніше.

Об’єкти, що викликають значення $\sigma^{0} > 10$ як правило, є штучними, вони мають надвисокий коефіцієнт зворотного розсіяння завдяки металевим поверхням, кутковим відбивачам, різким переходам між плоскими гранями та інше і, найчастіше зустрічаються у містах та промислових територіях. Тому використання зазначеної моделі не рекомендується в місцях великого накопичення об’єктів з високими значеннями коефіцієнта зворотного радарного розсіяння.

4.8 Ітеративність розробленої методики

Очевидно, що запропонована методика може застосовуватися до радарних даних ітеративно, використовуючи обернену симуляцію коефіцієнта зворотного розсіяння як вхідну для наступної ітерації. Окремо заслуговує уваги перевірка на сходження результату моделювання. Теоретично сходження чи розходження є можливими, адже під час оберненого моделювання отримані результати не відповідають оригіналу абсолютно. Також істотний вплив несе поведінка цільової функції мінімізації міжполяризаційного розходження результатів.

Для перевірки ітераційного підвищення інформативності було використано змодельовані дані (рис. 4.12: б, г) як вхідні. Результат наступної ітерації показано на рис. 4.21.

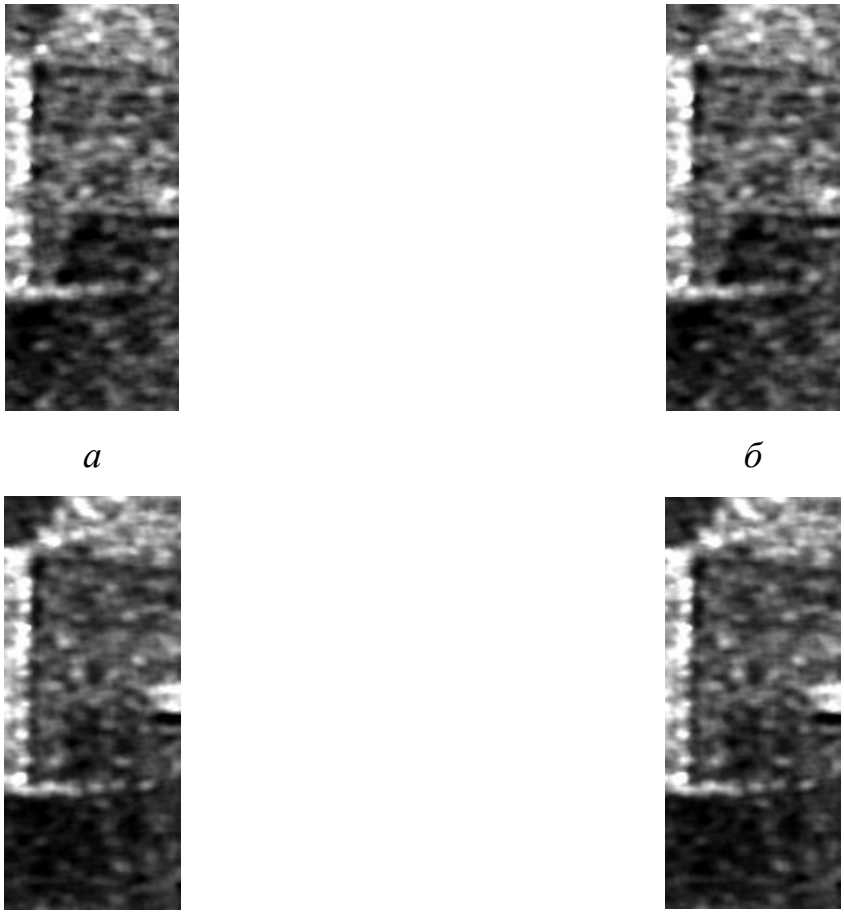


Рис. 4.21. Розподіли коефіцієнта зворотного радарного розсіяння на першій ітерації: *а* – σ_{vv}^0, *в* – σ_{vh}^0; на другій ітерації: *б* – σ_{vv}^0, *г* – σ_{vh}^0

Візуальних змін зображень рис. 4.21 не спостерігається. Розподіли синтетичної діелектричної проникності підвищеної просторової розрізненності на першій та другій ітераціях наведено на рис. 4.22.

а *б*

Рис. 4.22. Розподіли синтетичної діелектричної проникності підвищеної просторової розрізненності: *а* – на першій ітерації, *б* – на другій ітерації

Статистика та результати оцінки підвищення інформативності зображень рис. 4.22 зведені до табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Статистичні дані зображень синтетичної діелектричної проникності підвищеної розрізненності

№ ітерації	мін.	макс.	середн.	с. к. в.	Ізотропна розрізненність	Підвищення інформативності
1	3,591	28,816	5,849	2,646	4,106	103,05 %
2	4,088	28,569	6,236	2,617	4,179	94,75 %
3	4,088	28,569	6,236	2,617	4,179	94,75 %

Відповідно до наведених даних, ітераційний процес підвищення інформативності є швидкозбіжним. Сталі результати моделювання досягаються, як правило, вже на третій ітерації.

4.9 Рекомендації по впровадженню розробленої методики

Розроблена методика дозволяє підвищувати інформативність супутникових даних, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою. В умовах обмеженості моделі зворотного розсіювання радарного сигналу, рекомендується застосовувати методику для задач екологічного моніторингу, відновленню фізичних параметрів земної поверхні (за наявності необхідних моделей зворотного розсіювання), поляриметрії, дослідження стану геодинамічних процесів (*Ляска та ін., 2017*) тощо.

Для впровадження розробленої методики у вигляді хмарного геопросторового сервісу, або окремого модуля конвеєра обробки радарних даних, рекомендується забезпечити виконання наступних умов:

1) доступ до сховища супутникових даних обсягом не менше 100 ТБ (в залежності від потреб та масштабу задач);
2) безперебійне широкосмугове інтернет з'єднання зі швидкістю до 10 Гбіт/с, задля завантаження великих обсягів даних між сховищем даних та постачальником супутникових радіолокаційних зображень;
3) передача даних зі швидкістю до 10 Гбіт/с між сховищем і сервером обробки;
4) безперебійний доступ до джерела супутникових даних (наприклад, до Copernicus SciHub);
5) багатопроцесорний сервер, здатний підтримувати не менш ніж 64 віртуальних потоки при частоті 3,0 ГГц та вище, та обладнаний достатнім об'ємом оперативної пам'яті, наприклад 2 ТБ, для можливості паралельної обробки великих обсягів даних; в такому разі стає можливим забезпечити одночасну обробку значної кількості зображень в асинхронному режимі;
6) програмне забезпечення, здатне оперувати в асинхронному режимі з різними моделями зворотного розсіювання радарного сигналу для можливості динамічного вибору необхідної моделі та її параметрів;

7) програмне забезпечення вибору оптимальної моделі зворотного розсіювання радарного сигналу для різноманітних тематичних задач;
8) веб-застосунок з таким мінімальним функціоналом: замовлення знімків; вибір моделі зворотного розсіювання радарного сигналу та її параметрів; вибір цільових фізичних параметрів земної поверхні, потрібних споживачу; палітра типових задач, для яких здійснюється обробка зображення; вказання ділянки знімка, яку необхідно обробити; завантаження результатів обробки (передбачається зберігання результатів на стороні серверу у сховищі даних для забезпечення можливості одночасного доступу до оброблених даних багатьма користувачами);
9) багатопроцесорна або багатоядерна 64-бітна графічна робоча станція з боку споживача зі швидкістю інтернет з'єднання 10 Гбіт/с та об'ємом вільної пам'яті, що перевищує замовлений обсяг даних;
10) забезпечення всіх необхідних умов експлуатації розподіленої системи з описаними вище характеристиками.

Ілюстративна схема рекомендованої розподіленої системи з впровадженою методикою наведена на рис. 4.23.

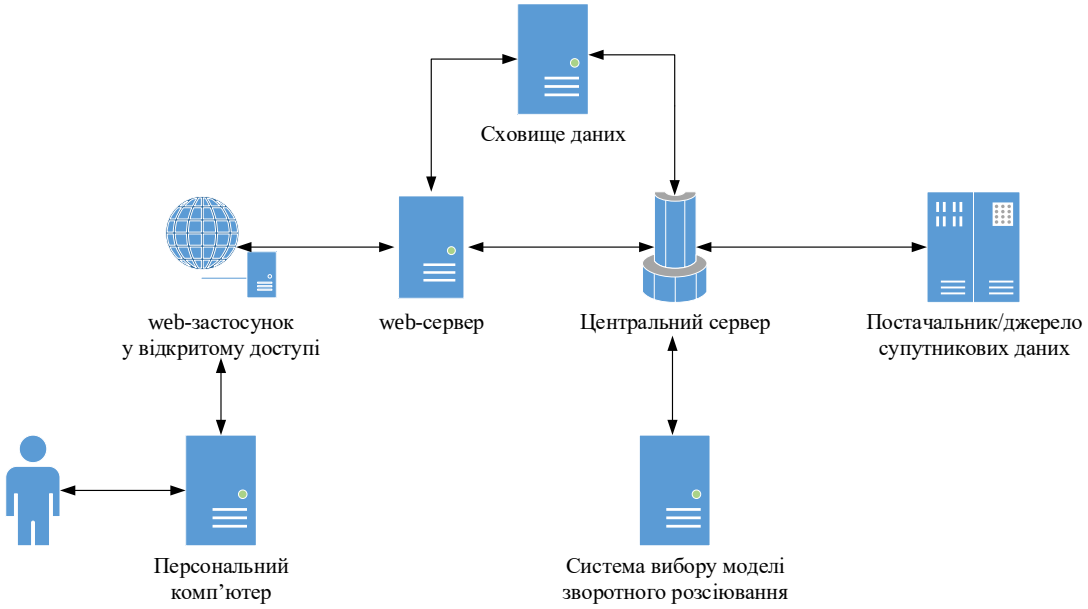


Рис. 4.23. Функціональна схема рекомендованої розподіленої системи з впровадженою методикою підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою

Розроблена методика є досить універсальною, завдяки чому можна використовувати її у різних задачах за умов наявності необхідних моделей зворотного розсіювання радарного сигналу та зв'язку цих моделей з фізичними параметрами, які повинні бути оцінені.

Практичне застосування методики необхідно здійснювати на радарних супутникових даних, отриманих з одного і того ж сенсору. Рекомендується також використовувати різнополяризаційні дані з одного і того самого продукту, що відповідає зніманню в один і той самий день з затримкою менше однієї секунди. Не рекомендується використовувати методику на зображеннях з рухомими об'єктами, адже субпіксельна оцінка таких зображень, а отже, і результат зображення з підвищеною просторовою розрізненністю, можуть бути значно спотвореними.

Подальші дослідження варто спрямувати на розробку нових та удосконалення існуючих моделей зворотного радарного розсіювання для доповнення методики більш точним і надійним інструментарієм. На сьогодні залишилася нерозв'язаною задача відтворення зображень підвищеної розрізненності малорозмірних штучних об'єктів, яка є важливою для оборонних та спеціальних застосувань радарного знімання. Також варто адаптувати розроблену методику до застосування сучасних радарних даних надвисокої розрізненності, таких як TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed та Capella (*Stringham et al., 2019; Battagliere et al., 2021*).

Висновки до четвертого розділу

Отже, в ході тестування розробленої методики підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою було:

1) обрано досліджувану ділянку та обґрунтовано її вибір;
2) попередньо оброблено тестові супутникові радіолокаційні знімки;

3) переведено різнополяризаційні супутникові радіолокаційні дані в єдиний фізичний показник – діелектричну проникність земної поверхні;
4) підвищено просторову розрізненність розподілів зазначеного показника;
5) одержано кількісні оцінки підвищення просторової розрізненності тестових радарних даних;
6) обчислено кількісні оцінки підвищення інформативності тестових радарних даних;
7) зроблено статистичний аналіз отриманих результатів та розраховано усереднене значення підвищення інформативності за допомогою розробленої методики;
8) виявлено і проаналізовано обмеження використаної моделі зворотного радарного розсіяння і надані рекомендації по запобіганню отримання некоректних результатів методикою;
9) надано рекомендації по впровадженню розробленої методики в практику розподіленої обробки радарних даних у вигляді хмарного web-сервісу.

Результати тестування розробленої методики свідчать про достатнє підвищення інформативності багатополяризаційних радарних космічних знімків за її допомогою, за умов її застосування до ділянок місцевості з незначною кількістю інтенсивних радарних відбивачів.

Для забезпечення коректної роботи методики необхідно переконатись, що витримуються обмеження використовуваної моделі зворотного радарного розсіювання. Є доцільною розробка нових таких моделей, що адаптовані для різноманітних умов радарного знімання, базуючись на результатах, отриманих в даній дисертаційній роботі.

За результатами тестування розробленої методики на багатьох реальних радарних зображеннях продемонстровано усереднене підвищення інформативності на 85,4 %.

Список використаних джерел

Schmidt, K., Schwerdt, M., Miranda, N., & Reimann, J. (2020). Radiometric Comparison within the Sentinel-1 SAR Constellation over a Wide Backscatter Range. *Remote Sensing*, *12*(5), 854. https://doi.org/10.3390/rs12050854

Black, J. T., & Kohser, R. A. (2008). *DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing*. Hoboken: John Wiley, 2360 p.

Verhoest, N., Lievens, H., Wagner, W., Álvarez-Mozos, J., Moran, M., & Mattia, F. (2008). On the Soil Roughness Parameterization Problem in Soil Moisture Retrieval of Bare Surfaces from Synthetic Aperture Radar. *Sensors*, *8*(7), 4213–4248. https://doi.org/10.3390/s8074213

Vulfson, L., Genis, A., Blumberg, D. G., Sprintsin, M., Kotlyar, A., Freilikher, V., & Ben-Asher, J. (2012). Retrieval of surface roughness parameters of bare soil from the radar satellite data. *Journal of Arid Environments*, *87*, 77–84. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.07.006

Rahman, M. M., Moran, M. S., Thoma, D. P., Bryant, R., Sano, E. E., Holifield Collins, C. D., Skirvin, S., Kershner, C., & Orr, B. J. (2007) A derivation of roughness correlation length for parameterizing radar backscatter models. *International Journal of Remote Sensing*, 28(18), 3995–4012. https://doi.org/10.1080/01431160601075533

Jesús Álvarez-Mozos, María González-Audícana, & Casalí, J. (2007). *Evaluation of empirical and semi-empirical backscattering models for surface soil moisture estimation*. *33*(3), 176–188. https://doi.org/10.5589/m07-024

Singh, A., Niranjannaik, M., Kumar, S., & Gaurav, K. (2022). Comparison of Different Dielectric Models to Estimate Penetration Depth of L- and S-Band SAR Signals into the Ground Surface. *Geographies*, *2*(4), 734–742. https://doi.org/10.3390/geographies2040045

Walker, J. P., Willgoose, G. R., & Kalma, J. D. (2004). In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques. *Journal of Hydrology*, *293*(1-4), 85–99. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.01.008

Zhou, Z.-S., Lehmann, E., Wu, X., Caccetta, P., McNeill, S., Mitchell, A., Milne, A., Tapley, I., & Lowell, K. (2011). Terrain slope correction and precise registration of SAR data for forest mapping and monitoring. *Proceedings of the 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment* (ISRSE 2011). Sydney: ISPRS. https://www.isprs.org/proceedings/2011/isrse-34/211104015Final00304.pdf

Rodionova, N. V. (2019). Correlation of the Sentinel 1 Radar Data with Ground-Based Measurements of the Soil Temperature and Moisture. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*. https://doi.org/10.1134/s0001433819090421

Jin, X., Yang, W., Gao, X., & Li, Z. (2020). Analysis and Modeling of the Complex Dielectric Constant of Bound Water with Application in Soil Microwave Remote Sensing. *Remote Sensing*, *12*(21), 3544. https://doi.org/10.3390/rs12213544

Cheng, C., Liu, C., Zhang, N., Jia, T., Li, R., & Xu, Z. (2002). Absolute measurement of roughness and lateral-correlation length of random surfaces by use of the simplified model of image-speckle contrast. *Applied Optics*, *41*(20), 4148–4148. https://doi.org/10.1364/ao.41.004148

Barton, D. K. (2012) *Radar Equations for Modern Radar*. London: Artech House, 452 p.

Geudtner, D., Torres, R., Snoeij, P., Davidson, M., & Rommen, B. (2014). Sentinel-1 System capabilities and applications. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (IGAARS 2014). Quebec: IEEE, 1457–1460. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946711

Christiansen, M. P., Teimouri, N., Laursen, M. S., Mikkelsen, B. F., Jørgensen, R. N., & Sørensen, C. A. G. (2019). Preprocessed Sentinel-1 Data via a Web Service Focused on Agricultural Field Monitoring. *IEEE Access*, *7*, 65139–65149. https://doi.org/10.1109/access.2019.2917063

Schönbrodt-Stitt, S., Ahmadian, N., Kurtenbach, M., Conrad, C., Romano, N., Heye Bogena, Vereecken, H., & Nasta, P. (2021). Statistical Exploration of Sentinel-1 Data, Terrain Parameters, and in-situ Data for Estimating the Near-Surface Soil Moisture in a Mediterranean Agroecosystem. *Frontiers in Water*, *3*. https://doi.org/10.3389/frwa.2021.655837

Karamat, A., Nawaz, M., Mirza, A. I., Jamil, M. R., Asghar, A., Ayyaz, M., & Akram, F. (2019). Step-by-Step Processing of Sentinel-1 data for Estimation of Rice Area. *International Journal of Agriculture & Sustainable Development*. https://doi.org/10.33411/ijasd/2019010204

Upadhyay, P., Mikolaj Czerkawski, Davison, C., Cardona, J., Macdonald, M., Andonovic, I., Michie, C., Atkinson, R., Nikela Papadopoulou, & Nikas, K. (2022). A Flexible Multi-Temporal and Multi-Modal Framework for Sentinel-1 and Sentinel-2 Analysis Ready Data. *Remote Sensing*, *14*(5), 1120–1120. https://doi.org/10.3390/rs14051120

Lavender, S., & Lavender, A. P. (2015). *Practical Handbook of Remote Sensing*. Boca Raton: CRC Press, 244 p. https://doi.org/10.1201/b19044

López-Martínez, C., & Fàbregas, X. (2003) Polarimetric SAR Speckle Noise Model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(10), 2232–2242. https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.815240

Lutz, M. (2013). *Learning Python*. Sebastopol: O'Reilly Media, 1644 p.

Mohamed, A.-M. O., & Paleologos, E. K. (2018). Dielectric Permittivity and Moisture Content. *Fundamentals of Geoenvironmental Engineering*, 581–637. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804830-6.00016-8

El Hajj, M., Baghdadi, N., Zribi, M., & Angelliaume, S. (2016). Analysis of Sentinel-1 Radiometric Stability and Quality for Land Surface Applications. *Remote Sensing*, *8*(5), 406. https://doi.org/10.3390/rs8050406

Kernighan, B. W., & Ritchie, D. M. (1988). *The C programming language / ANSI C Version*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 288 p.

Rajab Asaad, R., Ismael Ali, R., Arif Ali, Z., & Ahmad Shaaban, A. (2023). Image Processing with Python Libraries. *Academic Journal of Nawroz University*, 12(2), 410–416. https://doi.org/10.25007/ajnu.v12n2a1754

Nagar, S., & Nardone, M. (2017). *Introduction to Scilab: for engineers and scientists*. New York: Apress, 220 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3192-0

Ляска, І. І., Пакшин, М. Ю., Стасюк, В. М. (2017). Дослідження стану геодинамічних процесів в Україні методами та засобами радіолокаційної зйомки. *Аерокосмічні технології*, 1(1), 15-22.

Stringham, C., Farquharson, G., Davide Castelletti, Quist, E. B., Riggi, L., Eddy, D., & Soenen, S. (2019). The Capella X-band SAR Constellation for Rapid Imaging. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (IGARSS 2019). Yokohama: IEEE, 9248–9251. https://doi.org/10.1109/igarss.2019.8900410

Battagliere, M.L., Cigna, F., Montuori, A., Tapete, D., & Coletta, A. (2021). Satellite X-band SAR data exploitation trends in the framework of ASI's COSMO-SkyMed Open Call initiative. *Procedia Computer Science*, 181, 1041–1048. https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.299

ВИСНОВКИ

Дисертаційну роботу присвячено розробленню методики підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою (РСА). Основний зміст розробленої методики полягає в отриманні радарних зображень із надрозрізненністю, сформованих в різних поляризаціях РСА. Для забезпечення коректності підвищення просторової розрізненності калібровані зображення коефіцієнтів радарного зворотного розсіяння перетворюються на єдину фізичну величину – діелектричну проникність земної поверхні.

Для проведення досліджень та тестувань розробленої методики використовувались радарні супутникові продукти GRDH сузір'я Європейських супутників Sentinel-1, оснащених двополяризаційним РСА. Ці дані мають просторову розрізненність на місцевості ~10 м і містять поляризаційну інформацію vv та vh, (v – вертикальна поляризація, h – горизонтальна).

Було проаналізовано відомі методи підвищення інформативності космічних знімків та встановлено кількісний взаємозв'язок інформативності з просторовою розрізненністю супутникових зображень.

Розроблено модель та алгоритм підвищення просторової розрізненності супутникових зображень, на основі поєднання інформації з кількох субпіксельно-зміщених зображень низької просторової розрізненності у єдине відновлене супутникове зображення з підвищеною просторовою розрізненністю. Як допоміжні, розроблено моделі та алгоритми цілопіксельного суміщення та обтинання пари зображень, а також оцінки їх субпіксельного зсуву. Реалізовано типовий алгоритм попередньої обробки радіолокаційних даних.

З метою зведення різнополяризаційних радарних даних в єдину фізичну величину було удосконалено відомі моделі зворотного радарного розсіювання – Оха, Дюбуа та IEM. Розроблено алгоритм вибору моделі зворотного розсіювання та алгоритм перетворення двополяризаційних радарних даних Sentinel-1 в

діелектричну проникність земної поверхні на основі удосконаленої моделі Оха з оцінкою та урахуванням шорсткості земної поверхні.

Розроблено алгоритм кількісної оцінки підвищення просторової розрізненності та інформативності цифрових зображень на основі Гаусівської апроксимації двоспрямованої функції передачі модуляції (ФПМ).

Розроблені моделі та алгоритми поєднані в єдину методику підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радару з синтезованою апертурою.

Розроблену методику було протестовано на наборі із 31 пари реальних двополяризаційних супутникових зображень Sentinel-1. Запропонована методика підвищення інформативності є ітеративною та швидкозбіжною – після другої-третьої ітерації. За результатами тестування усереднене підвищення просторової розрізненності космічних знімків склало 32,84 %, а відповідно інформативності – 85,4 %.

Запропонована методика є універсальною, що дозволяє використовувати її для широкого спектру задач дистанційного зондування Землі – екологічного моніторингу, відновленню фізичних параметрів земної поверхні, дослідження геодинамічних процесів тощо за умов наявності необхідних моделей зворотного радарного розсіювання.

Подальші дослідження варто спрямувати на розробку нових та удосконалення існуючих моделей зворотного радарного розсіювання, на адаптацію розробленої методики до застосування сучасних радарних даних надвисокої розрізненності, таких як TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed та Capella.

ДОДАТКИ

Додаток А

Опис тестового набору даних та статистичні показники результатів його обробки

Таблиця А.1

Кодові найменування супутникових продуктів та координати тестових ділянок використаних зображень, отриманих за допомогою двополяризаційного радару з синтезованою апертурою супутникової системи Sentinel-1

№ знімку	Кодові найменування супутникового продукту	Координати полігону тестової ділянки (довгота, широта), °
1	S1B_IW_GRDH_1SDV_20200815T155324_20200815T155349_022936_02B88F_6C09	POLYGON((30.131 49.759,30.136 49.759,30.136 49.761,30.131 49.761,30.131 49.759))
2	S1A_IW_GRDH_1SDV_20230725T155405_20230725T155430_049582_05F647_F242	POLYGON((30.083 49.780,30.096 49.780,30.096 49.789,30.083 49.789,30.083 49.78))
3	S1B_IW_GRDH_1SDV_20200729T154520_20200729T154545_022688_02B102_7A81	POLYGON((30.483 50.378,30.490 50.378,30.490 50.382,30.483 50.382,30.483 50.378))
4	S1A_IW_GRDH_1SDV_20200728T155348_20200728T155413_033657_03E698_B348	POLYGON((28.415 49.225,28.426 49.225,28.426 49.233,28.415 49.233,28.415 49.225))
5	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190831T152101_20190831T152126_028815_0343B4_6530	POLYGON((36.163 49.879,36.179 49.879,36.179 49.888,36.163 49.888,36.163 49.879))
6	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190530T154445_20190530T154510_027459_031913_134A	POLYGON((31.897 46.888,31.932 46.888,31.932 46.905,31.897 46.905,31.897 46.888))
7	S1A_IW_GRDH_1SDV_20200828T154547_20200828T154612_034109_03F5F4_CEF5	POLYGON((29.806 49.736,29.827 49.736,29.827 49.743,29.806 49.743,29.806 49.736))
8	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190627T040445_20190627T040510_027860_032534_F2F5	POLYGON((30.517 46.559,30.535 46.559,30.535 46.569,30.517 46.569,30.517 46.559))
9	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190618T042832_20190618T042857_027729_03213D_711D	POLYGON((24.126 49.748,24.146 49.748,24.146 49.756,24.126 49.756,24.126 49.748))
10	S1B_IW_GRDH_1SDV_20200829T042801_20200829T042826_023133_02BEC4_BEC0	POLYGON((25.538 49.543,25.554 49.543,25.554 49.551,25.538 49.551,25.538 49.543))
11	S1A_IW_GRDH_1SDV_20200831T161028_20200831T161053_034153_03F793_D074	POLYGON((26.237 50.612,26.259 50.612,26.259 50.624,26.237 50.624,26.237 50.612))

№ знімку	Кодові найменування супутникового продукту	Координати полігону тестової ділянки (довгота, широта), °
12	S1B_IW_GRDH_1SDV_20190730T153723_20190730T153748_017365_020A74_C9BA	POLYGON((31.284 51.485,31.312 51.485,31.312 51.500,31.284 51.500,31.284 51.485))
13	S1A_IW_GRDH_1SDV_20200711T154544_20200711T154609_033409_03DEFD_2FD4	POLYGON((30.784 49.830,30.806 49.830,30.806 49.841,30.784 49.841,30.784 49.830))
14	S1A_IW_GRDH_1SDV_20200728T155413_20200728T155438_033657_03E698_7C3D	POLYGON((28.986 50.032,29.007 50.032,29.007 50.042,28.986 50.042,28.986 50.032))
15	S1A_IW_GRDH_1SDV_20200830T042022_20200830T042047_034131_03F6C6_65AE	POLYGON((26.862 49.388,26.873 49.388,26.873 49.396,26.862 49.396,26.862 49.388))
16	S1A_IW_GRDH_1SDV_20200821T155350_20200821T155415_034007_03F264_BAD5	POLYGON((28.088 49.019,28.096 49.0196,28.096 49.024,28.088 49.024,28.088 49.019))
17	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190625T042011_20190625T042036_027831_032454_3886	POLYGON((28.804 49.701,28.813 49.701,28.813 49.705,28.804 49.705,28.804 49.701))
18	S1B_IW_GRDH_1SDV_20190622T155314_20190622T155339_016811_01FA2F_4B2A	POLYGON((30.096 49.826,30.100 49.826,30.100 49.829,30.096 49.829,30.096 49.826))
19	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190726T041204_20190726T041229_028283_0331F4_EB6B	POLYGON((29.961 50.173,29.969 50.173,29.969 50.178,29.961 50.178,29.961 50.173))
20	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190729T154538_20190729T154603_028334_033394_A78B	POLYGON((30.920 49.630,30.942 49.630,30.942 49.641,30.920 49.641,30.920 49.630))
21	S1B_IW_GRDH_1SDV_20190828T154450_20190828T154515_017788_02179A_1258	POLYGON((30.363 49.482,30.373 49.482,30.373 49.489,30.363 49.489,30.363 49.482))
22	S1B_IW_GRDH_1SDV_20190828T154450_20190828T154515_017788_02179A_1258	POLYGON((29.645 49.728,29.668 49.728,29.668 49.736,29.645 49.736,29.645 49.728))
23	S1A_IW_GRDH_1SDV_20200626T041209_20200626T041234_033183_03D816_7063	POLYGON((30.108 50.010,30.120 50.010,30.120 50.015,30.108 50.0155,30.108 50.010))
24	S1A_IW_GRDH_1SDV_20200626T041209_20200626T041234_033183_03D816_7063	POLYGON((30.314 50.169,30.327 50.169,30.327 50.174,30.314 50.174,30.314 50.169))
25	S1B_IW_GRDH_1SDV_20200729T154520_20200729T154545_022688_02B102_7A81	POLYGON((30.772 50.510,30.797 50.510,30.797 50.519,30.772 50.519,30.772 50.510))
26	S1A_IW_GRDH_1SDV_20200728T155348_20200728T155413_033657_03E698_B348	POLYGON((28.667 49.106,28.683 49.106,28.683 49.115,28.667 49.115,28.667 49.106))
27	S1A_IW_GRDH_1SDV_20200828T154457_20200828T154522_034109_03F5F4_9B75	POLYGON((30.435 46.403,30.443 46.403,30.443 46.408,30.435 46.408,30.435 46.403))
28	S1B_IW_GRDH_1SDV_20200824T152851_20200824T152916_023067_02BCC0_8107	POLYGON((35.936 49.991,35.949 49.991,35.949 49.997,35.936 49.997,35.936 49.991))

№ знімку	Кодові найменування супутникового продукту	Координати полігону тестової ділянки (довгота, широта), °
29	S1B_IW_GRDH_1SDV_20200831T041125_20200831T041159_023162_02BFAB_8D5B	POLYGON((30.325 50.399,30.466 50.399,30.466 50.466,30.325 50.466,30.325 50.399))
30	S1B_IW_GRDH_1SDV_20200824T041934_20200824T042002_023060_02BC91_02AC	POLYGON((28.505 50.211,28.659 50.211,28.659 50.285,28.505 50.285,28.505 50.211))
31	S1A_IW_GRDH_1SDV_20200830T042022_20200830T042047_034131_03F6C6_65AE	POLYGON((28.028 50.254,28.267 50.254,28.267 50.378,28.028 50.378,28.028 50.254))

Таблиця А.2

Результати підвищення інформативності тестових супутникових радіолокаційних зображень за допомогою розробленої методики

ε_{vv}, ε_{vh} – зображення діелектричної проникності низької просторової розрізненності отримані з поляризацій vv та vh відповідно; $\varepsilon_{enhanced}$ – зображення діелектричної проникності підвищеної розрізненності; ε_{mean}^{low} – зображення середнього значення діелектричної проникності низької розрізненності.

№ знімку	Просторова розрізненність, пікселів			Нестала частка інформативності		Підвищення інформативності, %	Підвищення розрізненності, %
	ε_{vv}	ε_{vh}	$\varepsilon_{enhanced}$	ε_{mean}^{low}	$\varepsilon_{enhanced}$		
1	2.846	2.821	4.068	0.031	0.060	94.06%	39.30%
2	2.193	2.139	3.307	0.053	0.091	71.59%	30.99%
3	1.871	1.881	3.334	0.071	0.089	26.64%	12.53%
4	2.173	2.168	3.948	0.053	0.064	20.89%	9.95%
5	3.426	3.345	4.537	0.021	0.048	122.72%	49.23%
6	2.304	2.309	3.793	0.046	0.069	47.91%	21.61%
7	3.819	3.814	4.629	0.017	0.046	171.90%	64.89%
8	3.111	3.151	4.087	0.025	0.059	134.75%	53.21%
9	2.302	2.328	3.708	0.046	0.072	55.91%	24.86%
10	1.992	2.005	3.862	0.062	0.067	7.11%	3.49%
11	1.712	1.706	3.562	0.085	0.078	-7.92%	-4.04%
12	1.879	1.853	3.597	0.071	0.077	7.64%	3.75%
13	2.314	2.302	3.808	0.046	0.068	46.93%	21.21%

№ знімку	Просторова розрізненність, пікселів			Нестала частка інформативності		Підвищення інформативності, %	Підвищення розрізненності, %
	ε_{vv}	ε_{vh}	$\varepsilon_{enhanced}$	ε_{mean}^{low}	$\varepsilon_{enhanced}$		
14	3.667	3.694	3.908	0.018	0.065	254.78%	88.35%
15	3.576	3.565	4.754	0.019	0.044	125.63%	50.21%
16	4.587	4.569	4.816	0.012	0.043	261.44%	90.11%
17	3.644	3.614	4.771	0.018	0.043	131.42%	52.12%
18	4.661	4.579	4.268	0.011	0.054	368.7%	116.49%
19	3.578	3.610	4.497	0.019	0.049	155.48%	59.83%
20	2.727	3.117	4.002	0.029	0.062	113.23%	46.02%
21	2.018	2.011	3.911	0.061	0.065	6.12%	3.01%
22	1.941	1.927	3.550	0.066	0.079	18.71%	8.95%
23	2.644	2.649	3.869	0.035	0.066	87.15%	36.8%
24	2.167	2.313	3.808	0.049	0.068	38.40%	17.64%
25	1.977	2.160	3.637	0.058	0.075	29.39%	13.74%
26	2.203	2.227	3.996	0.050	0.062	22.90%	10.86%
27	2.149	2.157	4.141	0.053	0.058	8.12%	3.98%
28	3.544	3.506	4.368	0.020	0.052	160.50%	61.40%
29	1.716	1.727	3.625	0.084	0.076	-9.78%	-5.02%
30	1.932	2.030	3.889	0.063	0.066	3.78%	1.87%
31	2.997	3.021	4.596	0.027	0.047	71.45%	30.93%
Усереднене						85.40%	32.84%

Таблиця А.3

Статистика зображень низької просторової розрізненності: вхідних σ_{vv}^{0} та σ_{vh}^{0}, а також змодельованих $\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$ та $\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$ з поляризацій vv та vh, відповідно

мін – мінімальне значення, макс – максимальне значення, м.о. – мат очікування, с.к.в. – середнє квадратичне відхилення

№ знімку	σ_{vv}^{0}				σ_{vh}^{0}				$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$				$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$			
	мін	***макс***	***м.о.***	***с.к.в.***	***мін***	***макс***	***м.о.***	***с.к.в.***	***мін***	***макс***	***м.о.***	***с.к.в.***	***мін***	***макс***	***м.о.***	***с.к.в.***
1	0.020	0.502	0.081	0.035	0.003	0.109	0.019	0.007	0.020	0.309	0.084	0.035	0.000	0.012	0.001	0.001
2	0.015	6.890	0.158	0.315	0.001	2.194	0.038	0.065	0.015	0.319	0.121	0.065	0.000	0.329	0.004	0.009
3	0.031	10.02	0.283	0.541	0.005	4.759	0.092	0.253	0.031	0.352	0.189	0.091	0.000	0.715	0.012	0.038
4	0.026	35.80	0.271	0.985	0.000	1.865	0.039	0.057	0.026	0.400	0.183	0.081	0.000	0.280	0.004	0.008
5	0.032	0.468	0.115	0.039	0.006	0.137	0.028	0.009	0.031	0.447	0.115	0.039	0.000	0.015	0.002	0.001
6	0.018	4.801	0.098	0.113	0.000	0.311	0.021	0.026	0.018	0.360	0.092	0.068	0.000	0.046	0.002	0.003
7	0.035	0.696	0.163	0.066	0.000	0.145	0.035	0.012	0.034	0.430	0.163	0.063	0.000	0.016	0.003	0.001
8	0.015	0.597	0.058	0.037	0.000	0.072	0.010	0.007	0.015	0.298	0.058	0.035	0.000	0.007	0.000	0.000
9	0.016	7.620	0.149	0.232	0.002	4.353	0.043	0.094	0.016	0.267	0.123	0.053	0.000	0.654	0.005	0.014
10	0.015	10.21	0.160	0.357	0.002	5.015	0.041	0.130	0.015	0.326	0.122	0.066	0.000	0.753	0.004	0.019
11	0.004	13.04	0.257	0.392	0.001	5.150	0.071	0.164	0.004	0.300	0.171	0.064	0.000	0.774	0.009	0.024
12	0.005	54.52	0.298	0.958	0.001	5.366	0.068	0.144	0.006	0.441	0.206	0.106	0.000	0.806	0.008	0.021
13	0.019	8.072	0.097	0.116	0.000	0.378	0.022	0.011	0.019	0.371	0.094	0.043	0.000	0.056	0.001	0.001
14	0.003	0.483	0.088	0.049	0.000	0.107	0.016	0.011	0.003	0.326	0.088	0.048	0.000	0.010	0.001	0.001
15	0.014	0.393	0.049	0.026	0.000	0.082	0.008	0.008	0.014	0.290	0.050	0.026	0.000	0.011	0.000	0.000
16	0.024	0.750	0.082	0.036	0.001	0.110	0.014	0.009	0.024	0.373	0.082	0.033	0.000	0.014	0.001	0.001
17	0.051	0.428	0.100	0.034	0.010	0.137	0.036	0.011	0.051	0.375	0.101	0.033	0.000	0.013	0.003	0.001

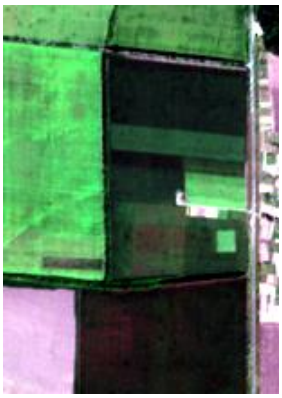
№ знімку	σ_{vv}^{0}				σ_{vh}^{0}				$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$				$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$			
	мін	***макс***	***м.о.***	***с.к.в.***	***мін***	***макс***	***м.о.***	***с.к.в.***	***мін***	***макс***	***м.о.***	***с.к.в.***	***мін***	***макс***	***м.о.***	***с.к.в.***
18	0.038	0.328	0.152	0.080	0.004	0.093	0.025	0.010	0.037	0.266	0.150	0.077	0.000	0.014	0.003	0.001
19	0.030	0.443	0.127	0.085	0.005	0.121	0.024	0.011	0.029	0.325	0.126	0.081	0.000	0.014	0.002	0.001
20	0.009	0.486	0.074	0.037	0.000	0.079	0.012	0.009	0.009	0.361	0.074	0.037	0.000	0.011	0.001	0.000
21	0.016	12.85	0.175	0.447	0.002	0.937	0.024	0.028	0.016	0.417	0.126	0.083	0.000	0.131	0.002	0.003
22	0.006	20.66	0.279	0.532	0.000	1.255	0.049	0.052	0.006	0.483	0.208	0.105	0.000	0.188	0.005	0.007
23	0.041	5.451	0.175	0.205	0.010	0.540	0.031	0.018	0.041	0.331	0.154	0.065	0.000	0.081	0.003	0.002
24	0.056	51.05	0.509	1.614	0.011	8.507	0.084	0.287	0.056	0.366	0.244	0.075	0.000	1.278	0.011	0.043
25	0.026	13.21	0.282	0.466	0.006	9.962	0.106	0.248	0.026	0.374	0.198	0.087	0.000	1.497	0.014	0.037
26	0.024	40.81	0.280	0.942	0.002	1.097	0.035	0.031	0.024	0.396	0.184	0.080	0.000	0.165	0.004	0.004
27	0.020	42.22	0.244	1.509	0.000	0.567	0.024	0.024	0.020	0.453	0.129	0.090	0.000	0.085	0.002	0.003
28	0.020	1.820	0.083	0.066	0.003	0.239	0.019	0.011	0.021	0.293	0.081	0.038	0.000	0.026	0.001	0.001
29	0.003	347.8	0.355	2.062	0.000	38.56	0.064	0.218	0.000	0.392	0.193	0.090	0.000	5.797	0.008	0.032
30	0.000	258.5	0.190	0.961	0.000	11.07	0.035	0.049	0.000	0.443	0.148	0.075	0.000	1.665	0.003	0.007
31	0.003	5.469	0.103	0.048	0.000	0.193	0.027	0.011	0.003	0.376	0.103	0.038	0.000	0.027	0.002	0.001

Додаток Б

Результати обробки тестових наборів зображень відповідно до розробленої методики

σ_{vv}^{0}, σ_{vh}^{0} – зображення коефіцієнтів радарного зворотного розсіяння; $\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$ та $\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$ – зображення змодельованих значень коефіцієнтів радарного зворотного розсіяння; ε_{vv} та ε_{vh} – зображення синтетичної діелектричної проникності у поляризаціях vv та vh, відповідно; $\varepsilon_{enhanced}$ – зображення синтетичної діелектричної проникності підвищеної розрізненності.

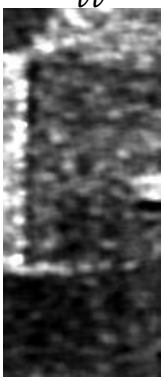
Б.1. Тестовий набір зображень №1



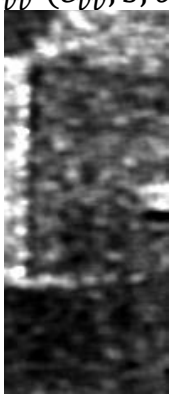
Оптичне зображення

σ_{vv}^{0}

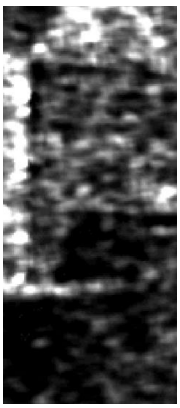
$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$



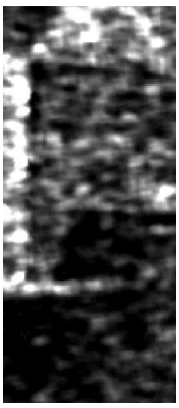
σ_{vh}^{0}



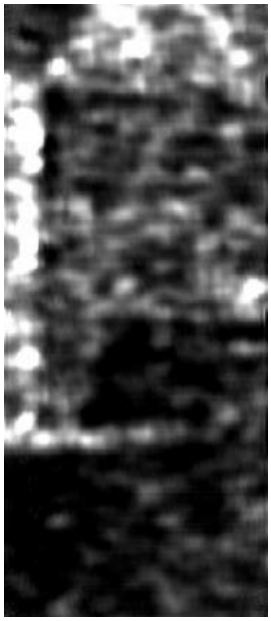
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}



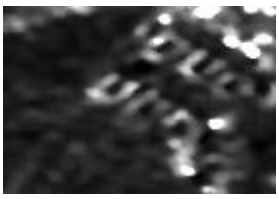
ε_{vh}



$\varepsilon_{enhanced}$

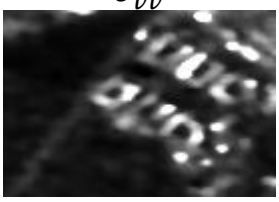
Б.2. Тестовий набір зображень №2

Оптичне зображення



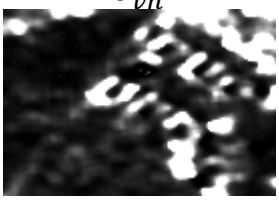
σ_{vv}^{0}

$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$



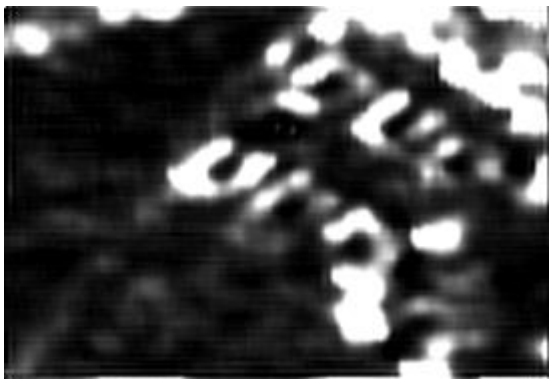
σ_{vh}^{0}

$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}

ε_{vh}



$\varepsilon_{enhanced}$

Б.3. Тестовий набір зображень №3

Оптичне зображення

σ_{vv}^{0}

$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$

σ_{vh}^{0}

$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$

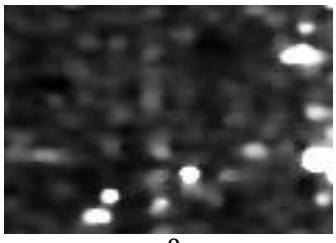
ε_{vv}

ε_{vh}

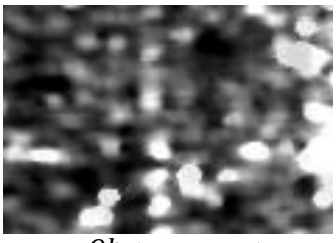
$\varepsilon_{enhanced}$

Б.4. Тестовий набір зображень №4

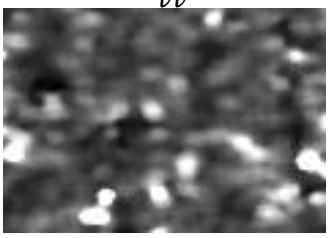
Оптичне зображення



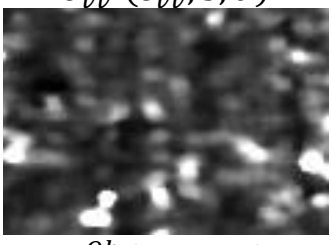
σ_{vv}^{0}



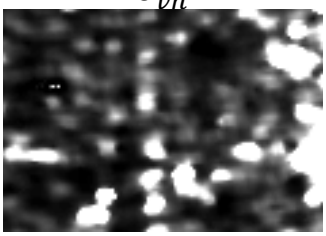
$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$



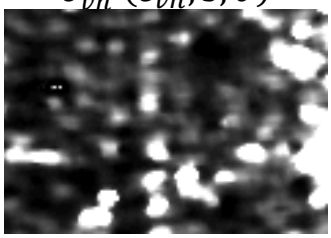
σ_{vh}^{0}



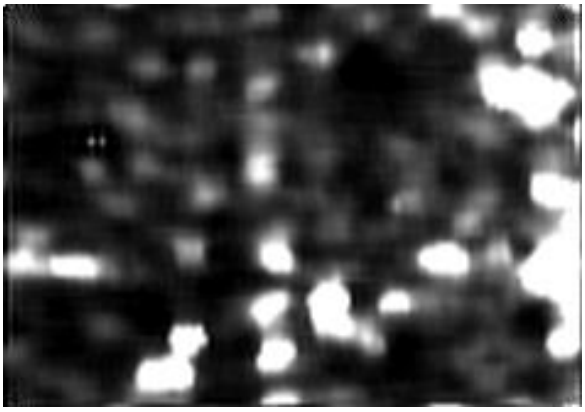
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}

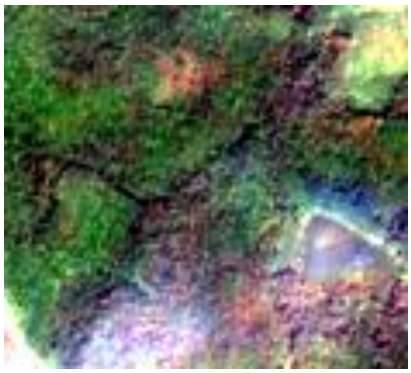


ε_{vh}

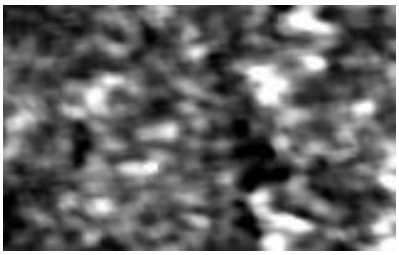


$\varepsilon_{enhanced}$

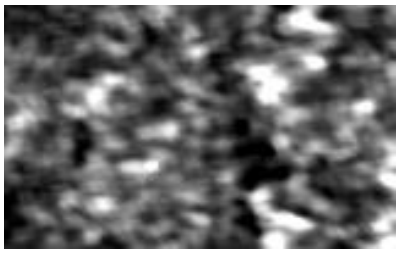
Б.5. Тестовий набір зображень №5



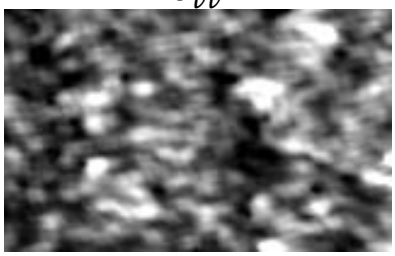
Оптичне зображення



σ_{vv}^{0}

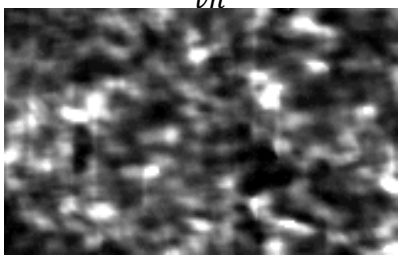


$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$

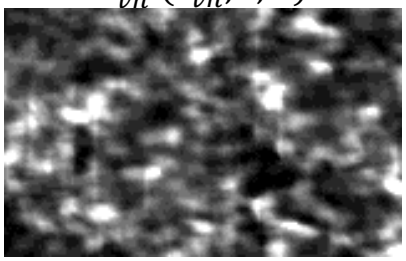


σ_{vh}^{0}

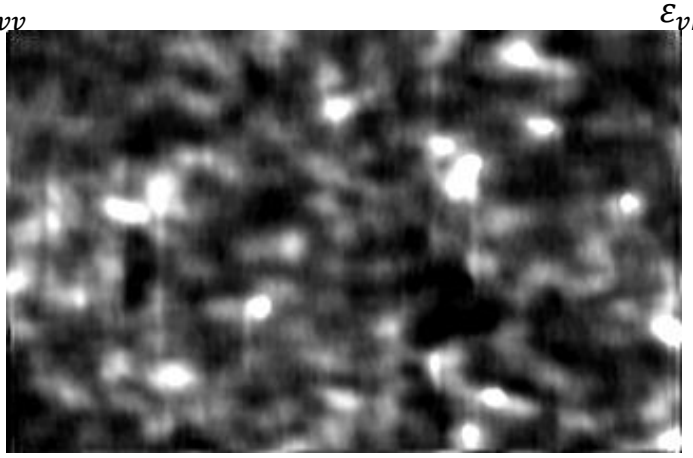
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}



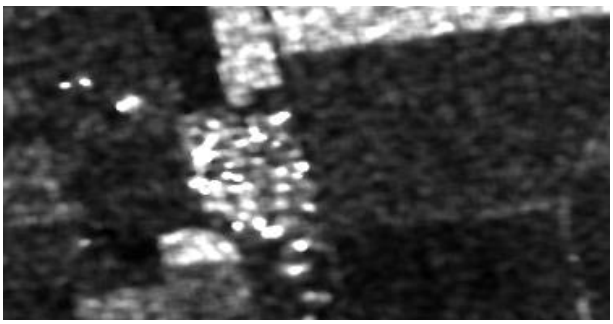
ε_{vh}



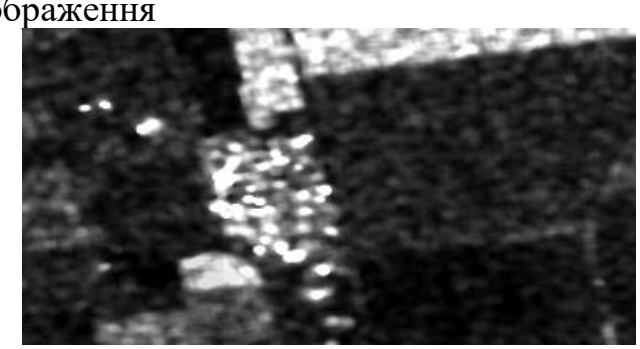
$\varepsilon_{enhanced}$

Б.6. Тестовий набір зображень №6

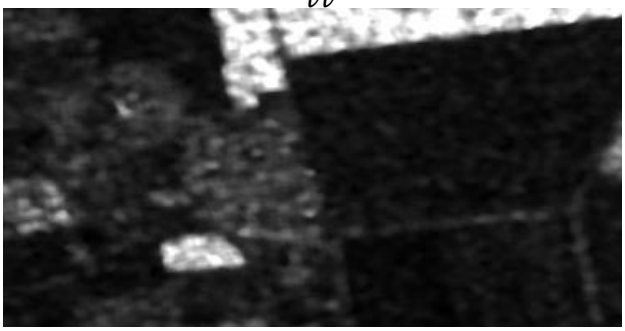
Оптичне зображення



σ_{vv}^{0}

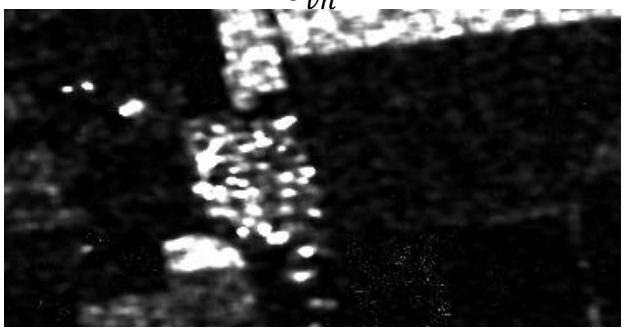


$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$

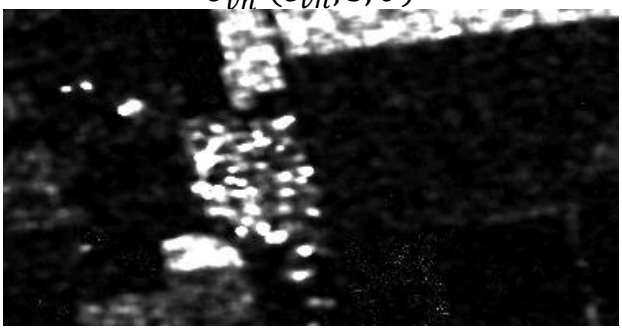


σ_{vh}^{0}

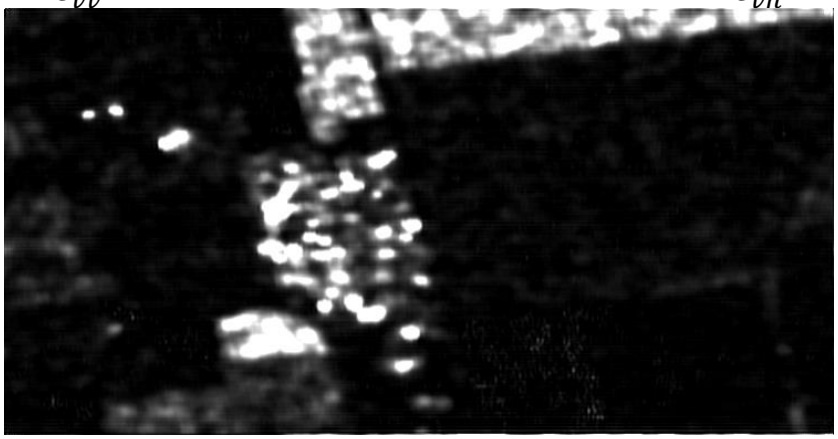
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}



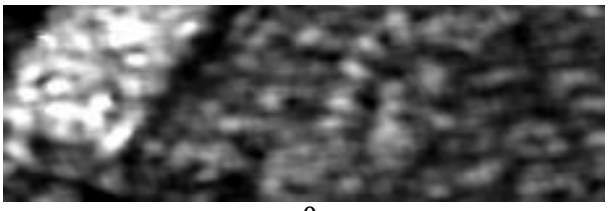
ε_{vh}



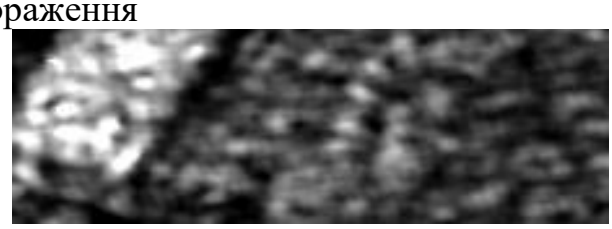
$\varepsilon_{enhanced}$

Б.7. Тестовий набір зображень №7

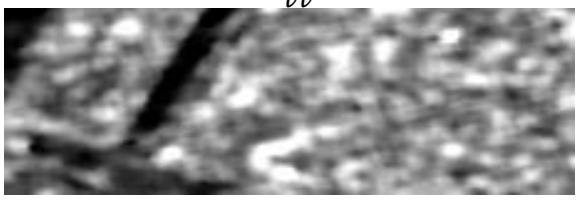
Оптичне зображення



σ_{vv}^{0}

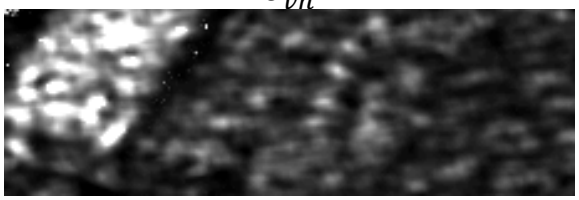


$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$



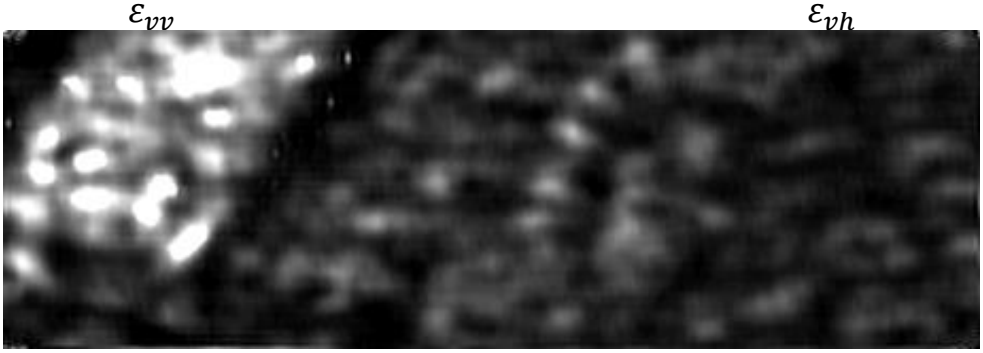
σ_{vh}^{0}

$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}

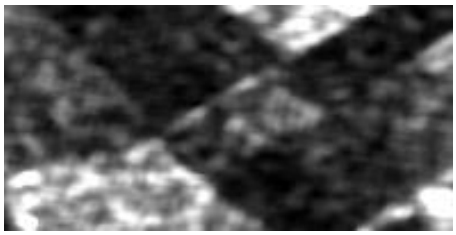
ε_{vh}



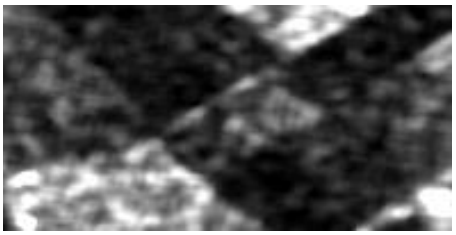
$\varepsilon_{enhanced}$

Б.8. Тестовий набір зображень №8

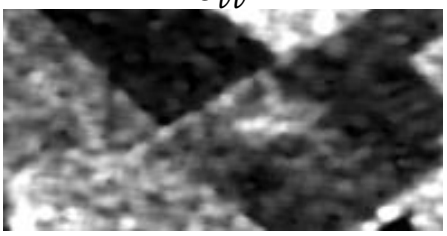
Оптичне зображення



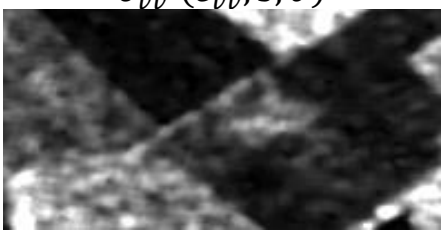
σ_{vv}^{0}



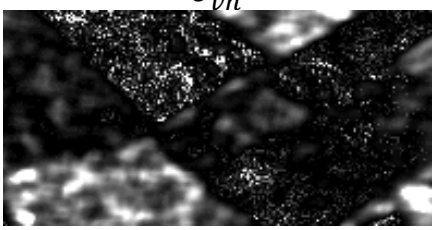
$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$



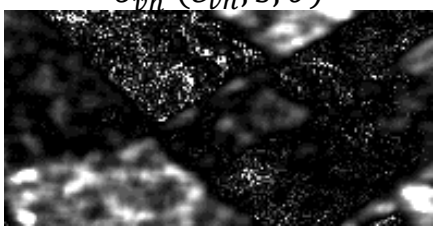
σ_{vh}^{0}



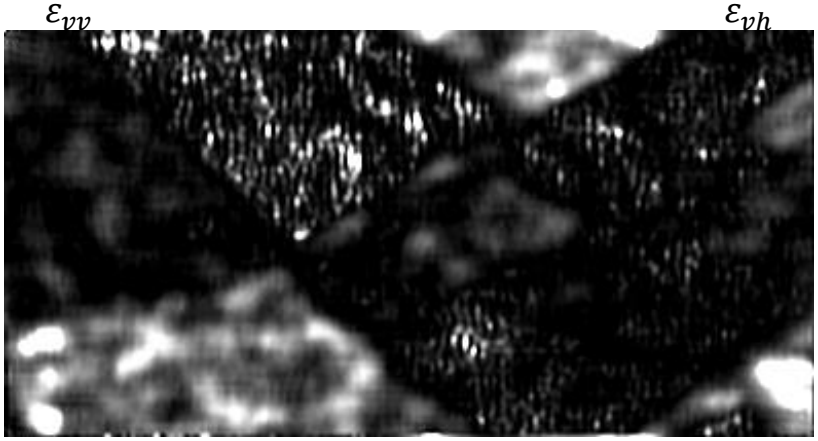
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}



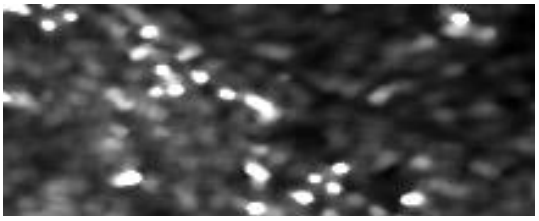
ε_{vh}



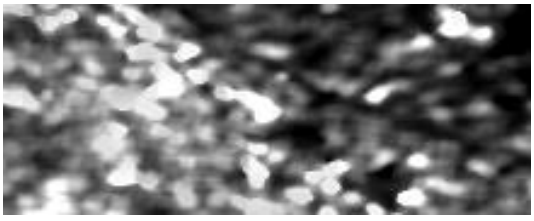
$\varepsilon_{enhanced}$

Б.9. Тестовий набір зображень №9

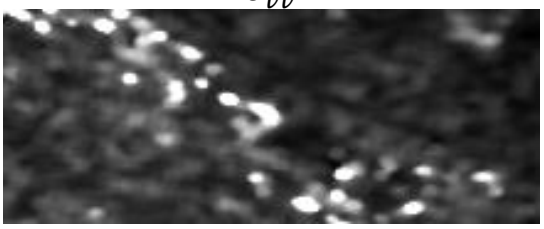
Оптичне зображення



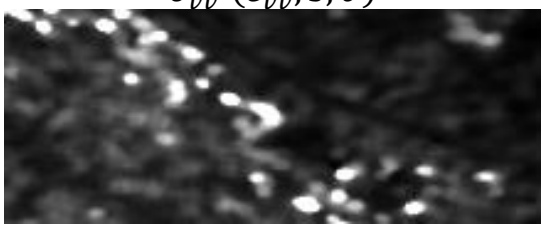
σ_{vv}^{0}



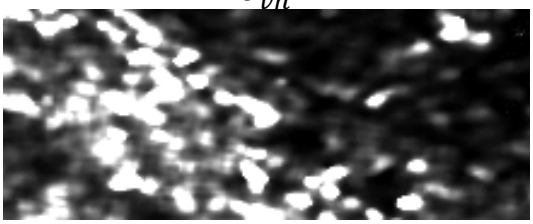
$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$



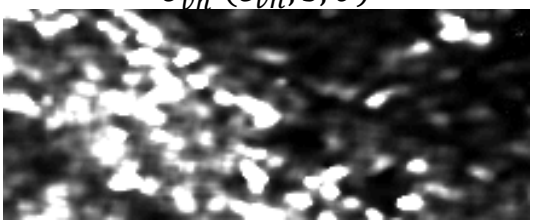
σ_{vh}^{0}



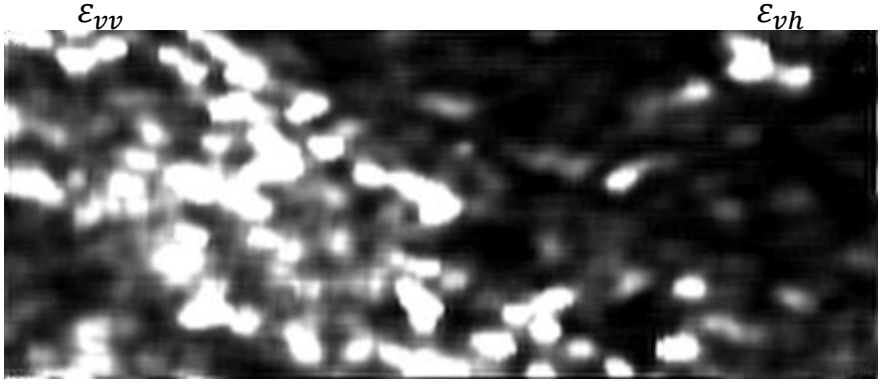
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}



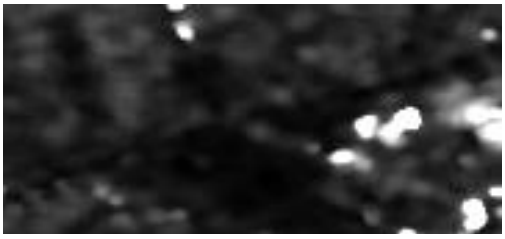
ε_{vh}



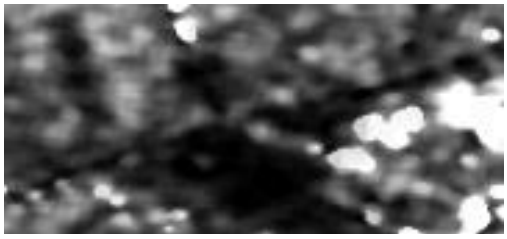
$\varepsilon_{enhanced}$

Б.10. Тестовий набір зображень №10

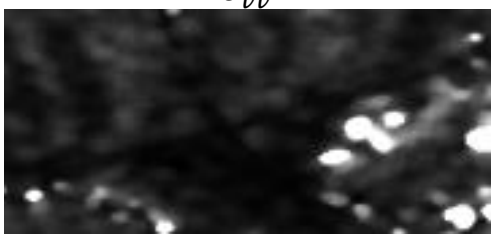
Оптичне зображення



σ_{vv}^{0}

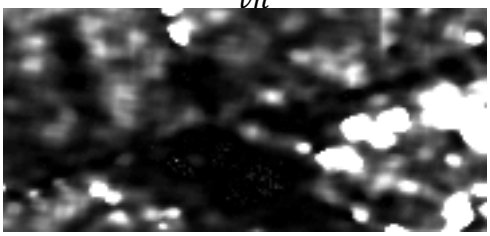


$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$

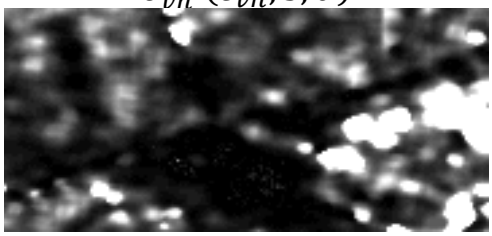


σ_{vh}^{0}

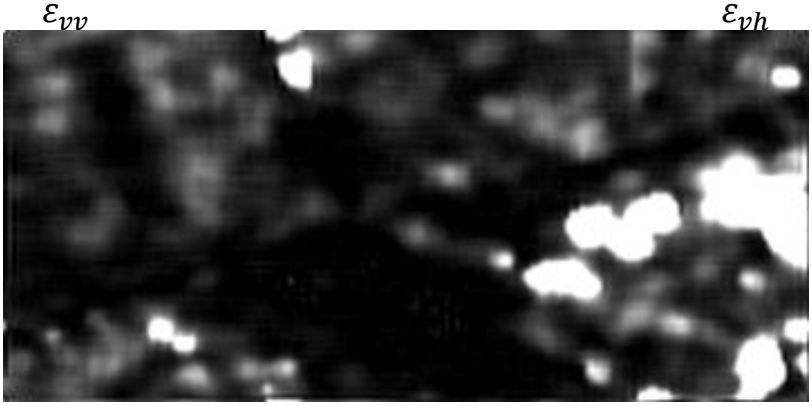
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}



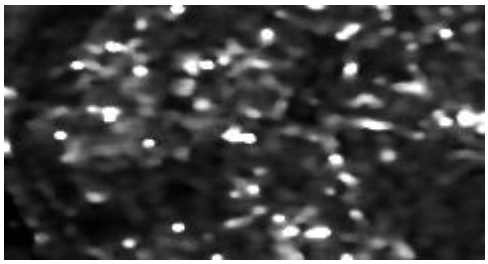
ε_{vh}



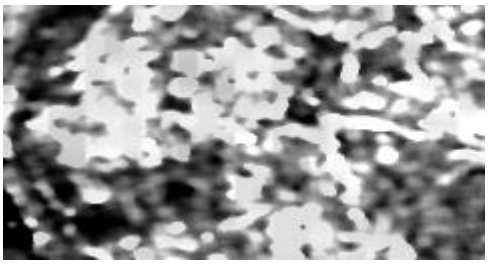
$\varepsilon_{enhanced}$

Б.11. Тестовий набір зображень №11

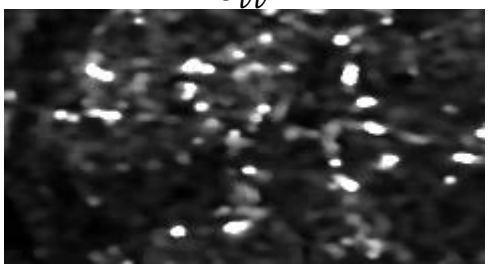
Оптичне зображення



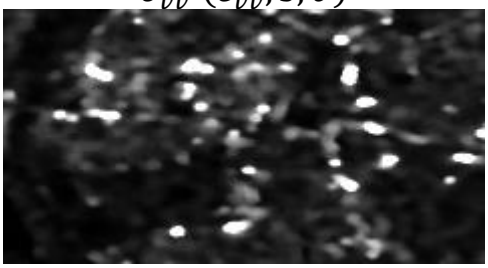
σ_{vv}^{0}



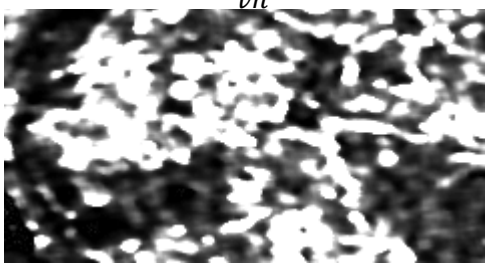
$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$



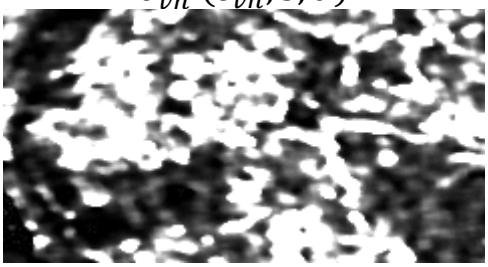
σ_{vh}^{0}



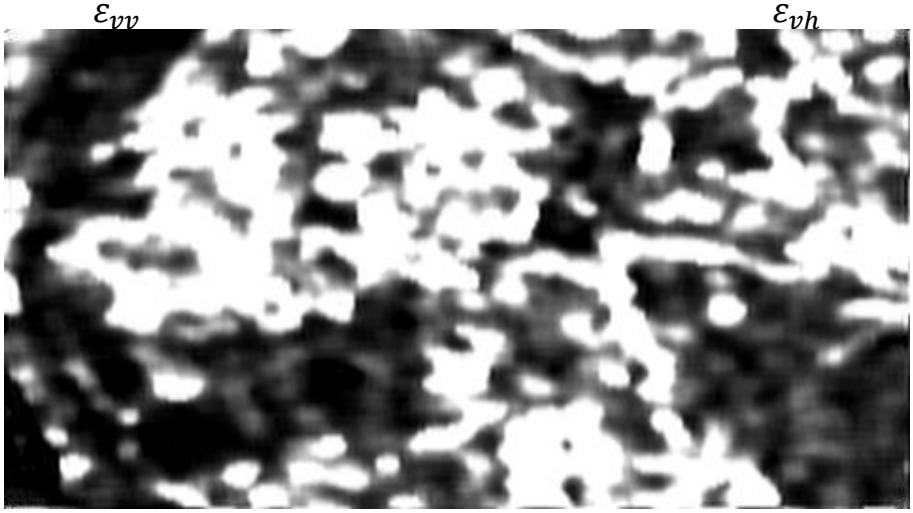
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}

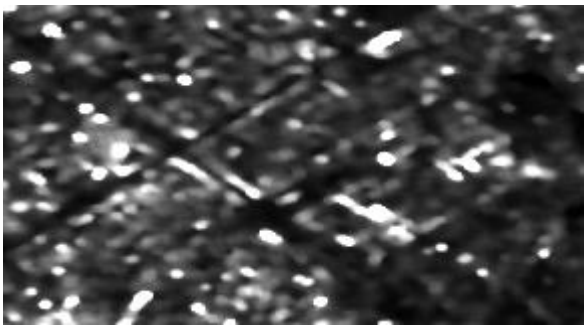


ε_{vh}

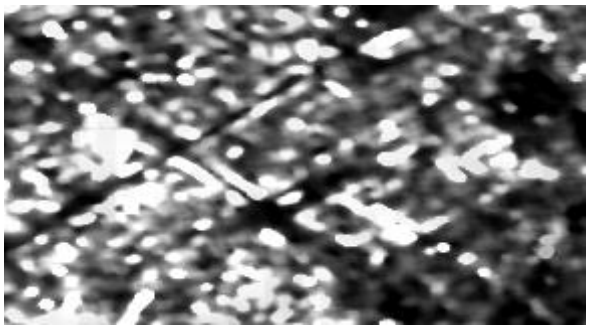


$\varepsilon_{enhanced}$

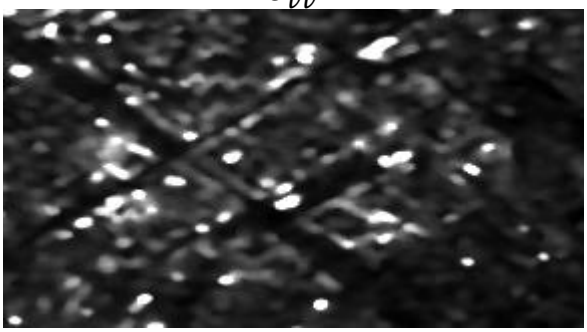
Б.12. Тестовий набір зображень №12



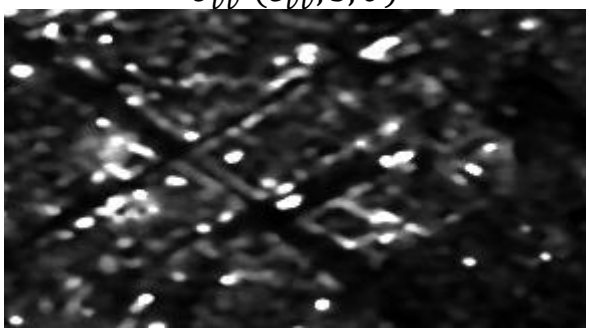
σ_{vv}^{0}



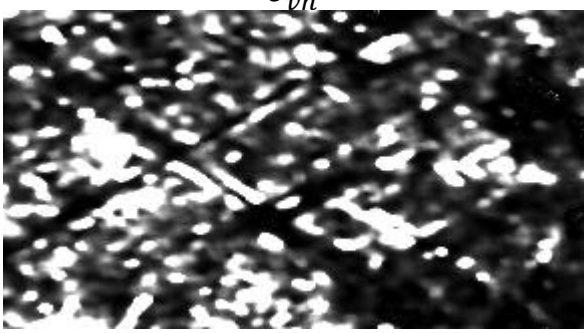
$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$



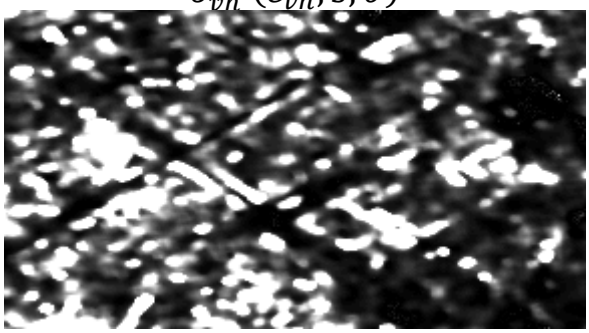
σ_{vh}^{0}



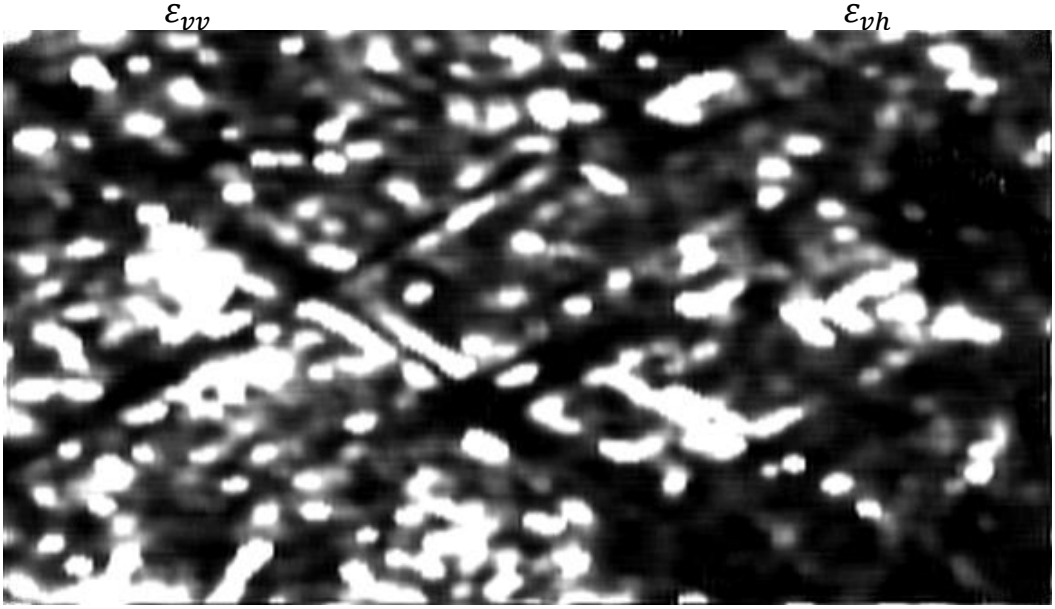
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}

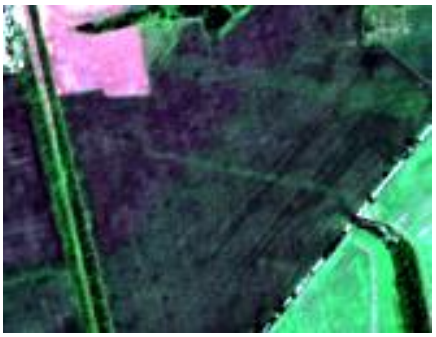


ε_{vh}

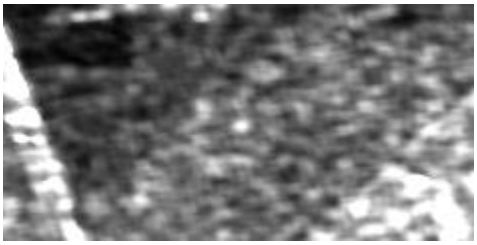


$\varepsilon_{enhanced}$

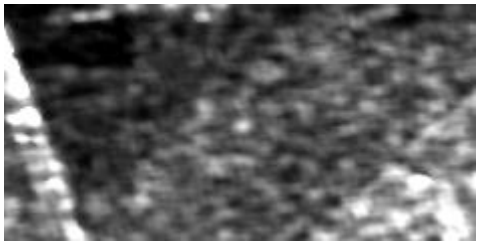
Б.13. Тестовий набір зображень №13



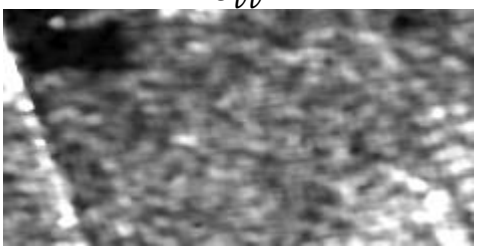
Оптичне зображення



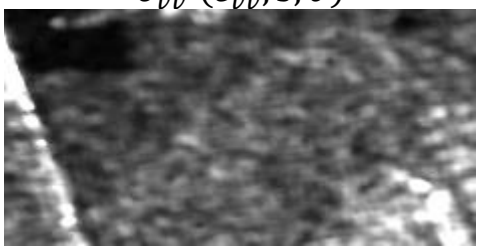
σ_{vv}^{0}



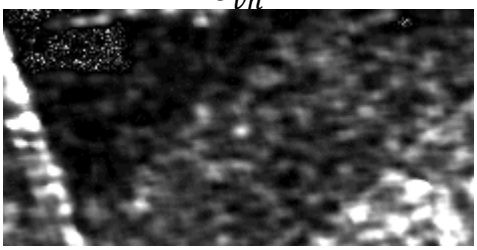
$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$



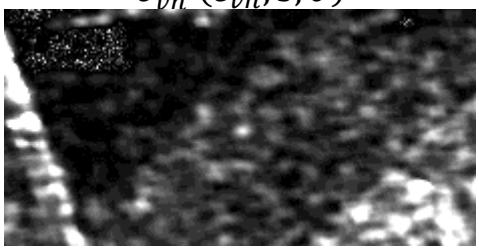
σ_{vh}^{0}



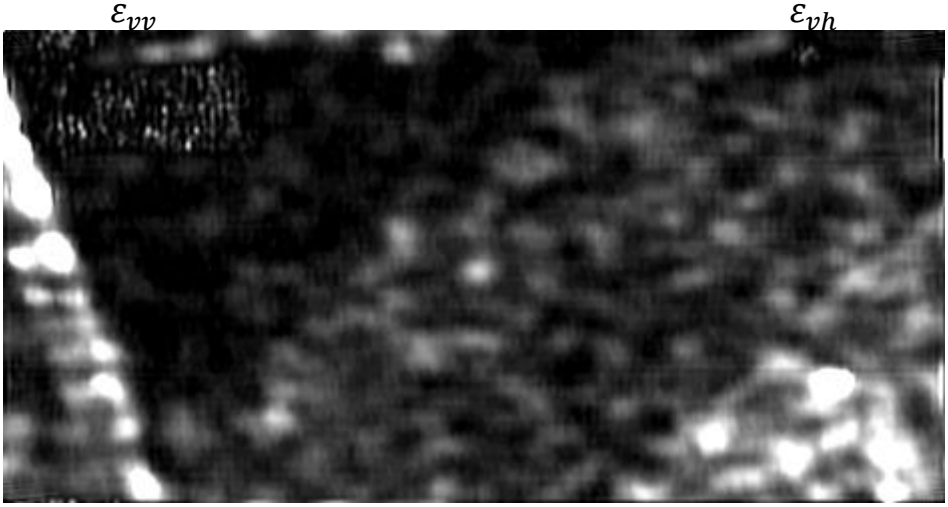
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}

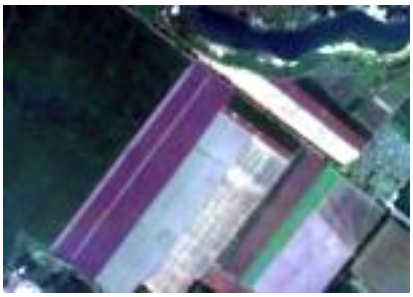


ε_{vh}

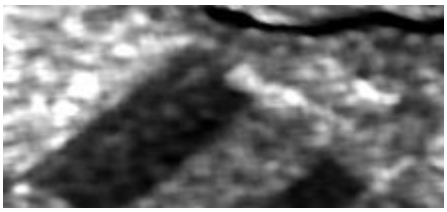


$\varepsilon_{enhanced}$

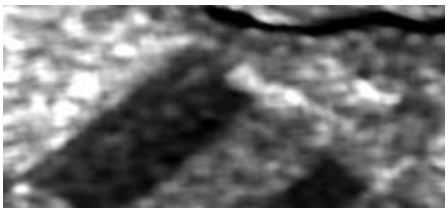
Б.14. Тестовий набір зображень №14



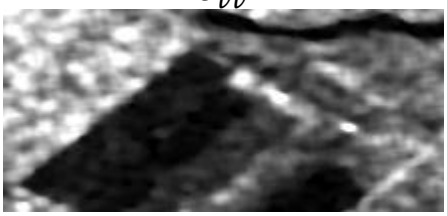
Оптичне зображення



σ_{vv}^{0}

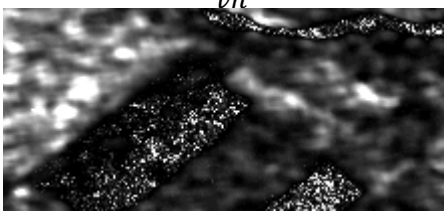


$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$

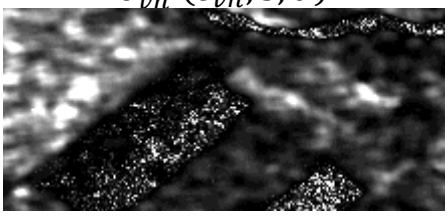


σ_{vh}^{0}

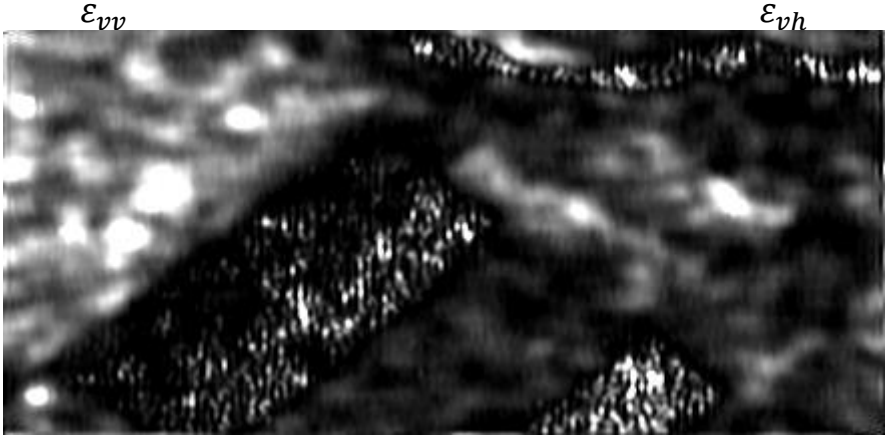
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}



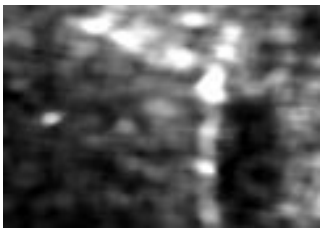
ε_{vh}



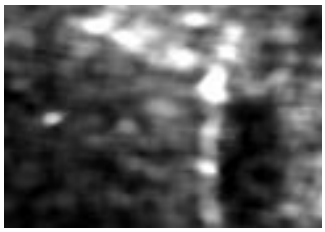
$\varepsilon_{enhanced}$

Б.15. Тестовий набір зображень №15

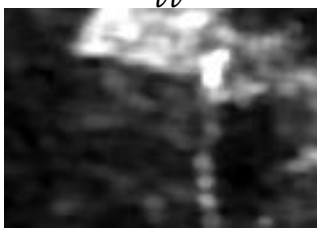
Оптичне зображення



σ_{vv}^{0}

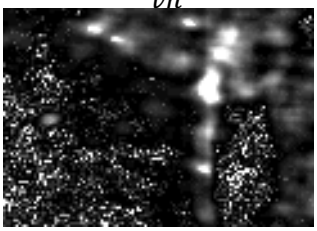


$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$

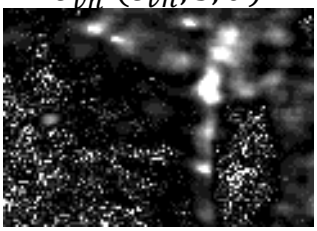


σ_{vh}^{0}

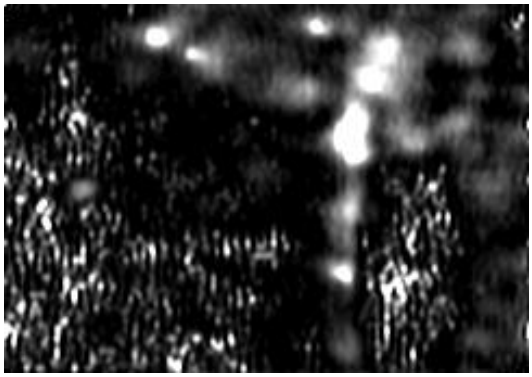
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}



ε_{vh}



$\varepsilon_{enhanced}$

Б.16. Тестовий набір зображень №16

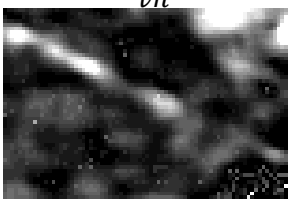
Оптичне зображення

σ_{vv}^{0}

$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$

σ_{vh}^{0}

$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}

ε_{vh}

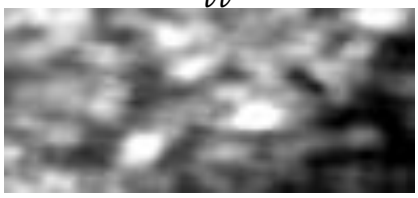
$\varepsilon_{enhanced}$

Б.17. Тестовий набір зображень №17

Оптичне зображення

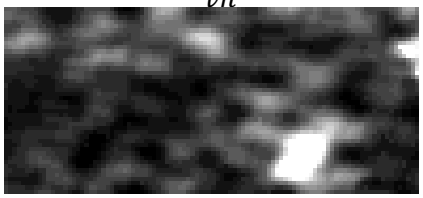
σ_{vv}^{0}

$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$

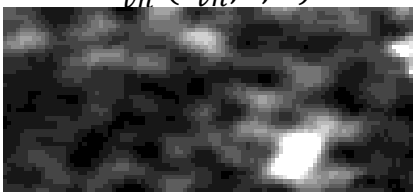


σ_{vh}^{0}

$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



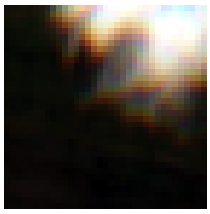
ε_{vv}



ε_{vh}

$\varepsilon_{enhanced}$

Б.18. Тестовий набір зображень №18



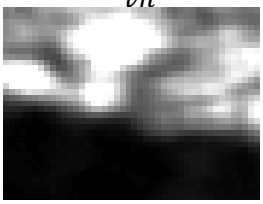
Оптичне зображення

σ_{vv}^{0}

$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$

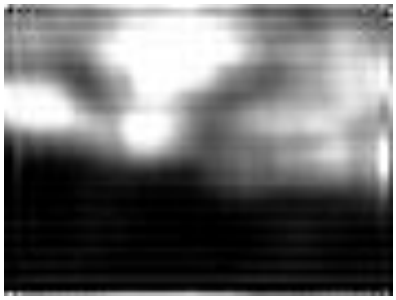
σ_{vh}^{0}

$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}

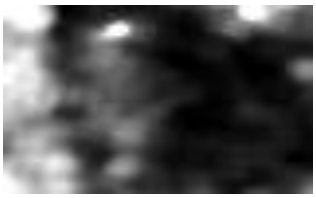
ε_{vh}



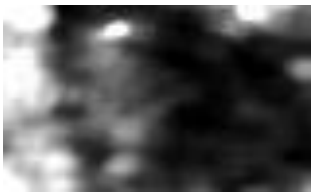
$\varepsilon_{enhanced}$

Б.19. Тестовий набір зображень №19

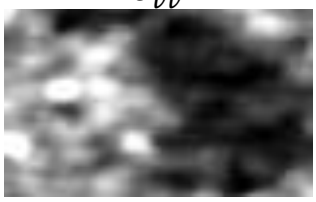
Оптичне зображення



σ_{vv}^{0}

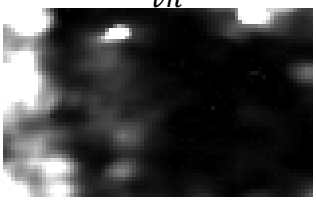


$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$



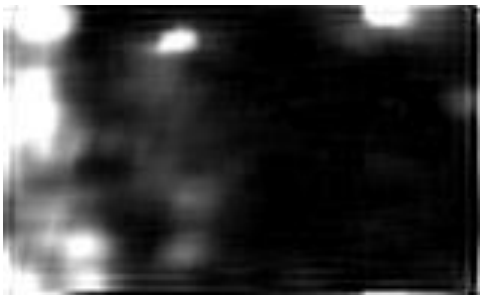
σ_{vh}^{0}

$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}

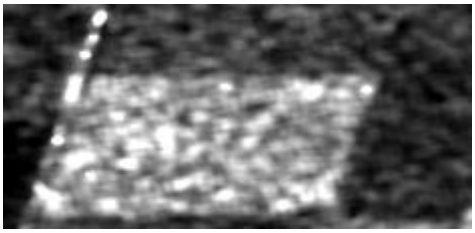
ε_{vh}



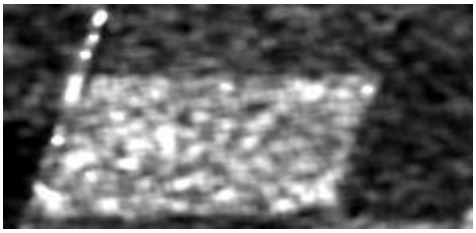
$\varepsilon_{enhanced}$

Б.20. Тестовий набір зображень №20

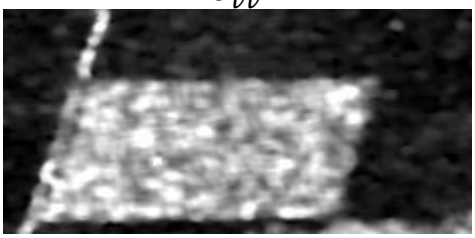
Оптичне зображення



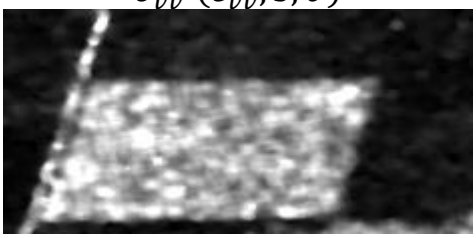
σ_{vv}^{0}



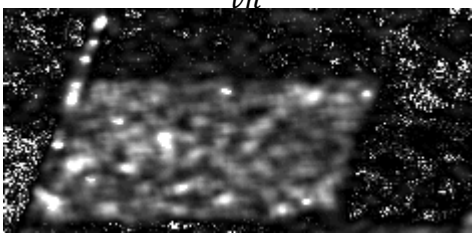
$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$



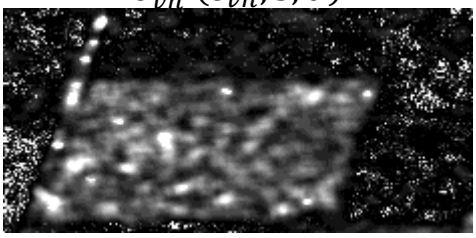
σ_{vh}^{0}



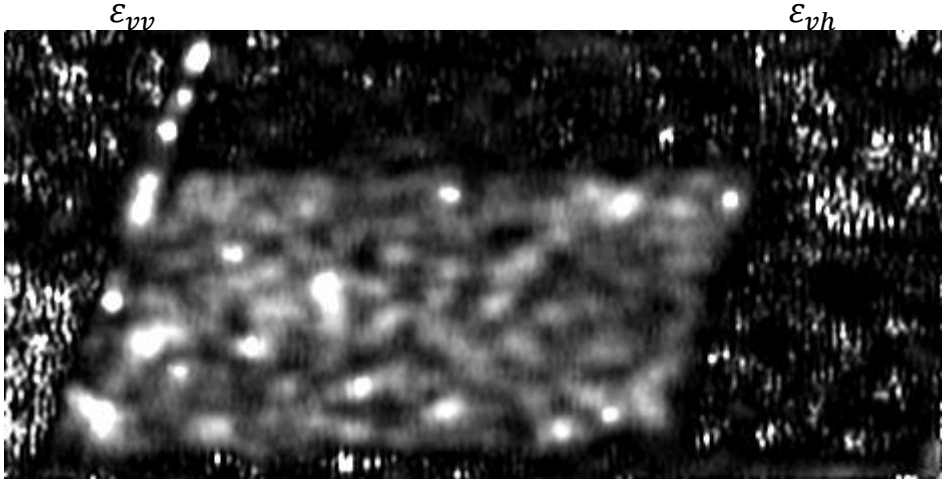
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}



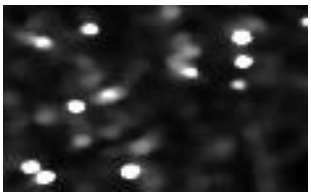
ε_{vh}



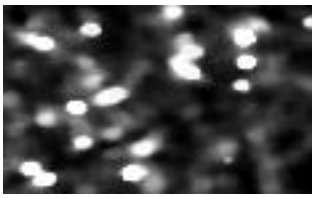
$\varepsilon_{enhanced}$

Б.21. Тестовий набір зображень №21

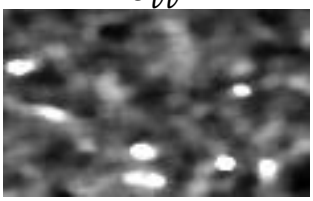
Оптичне зображення



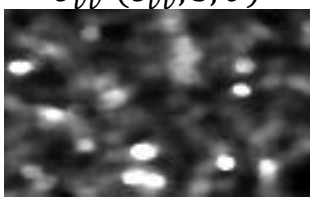
σ_{vv}^{0}



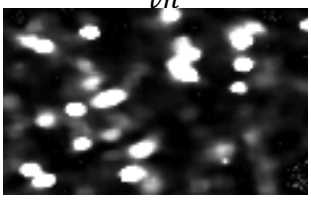
$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$



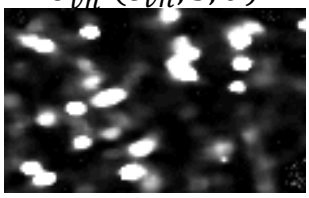
σ_{vh}^{0}



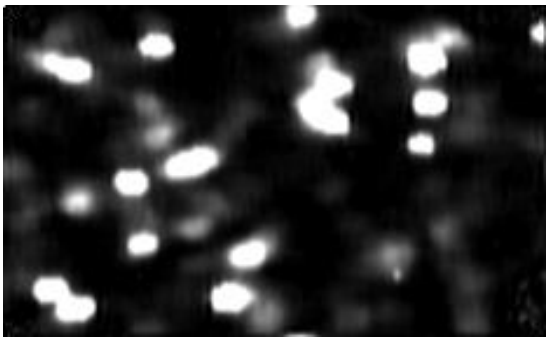
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}



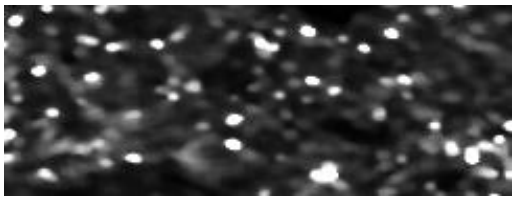
ε_{vh}



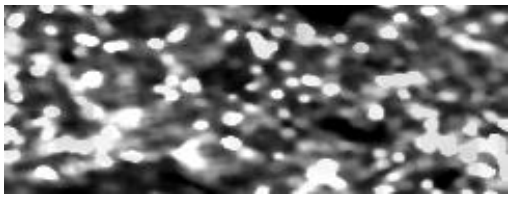
$\varepsilon_{enhanced}$

Б.22. Тестовий набір зображень №22

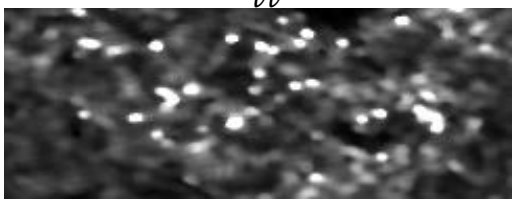
Оптичне зображення



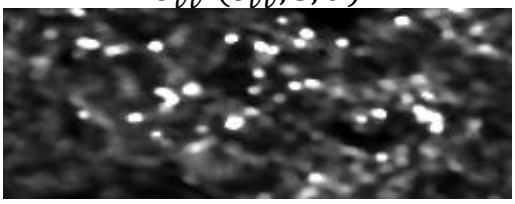
σ_{vv}^{0}



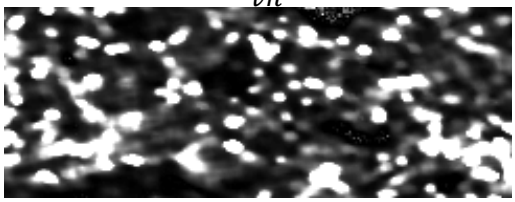
$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$



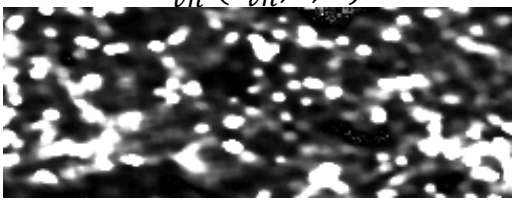
σ_{vh}^{0}



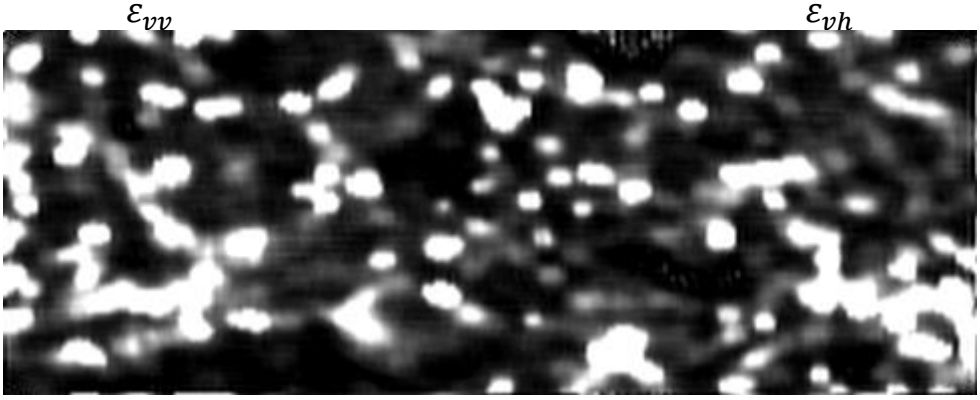
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}



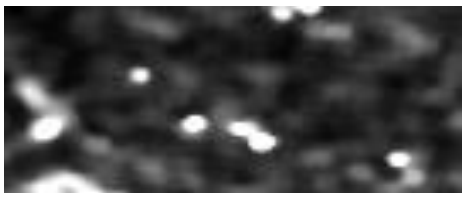
ε_{vh}



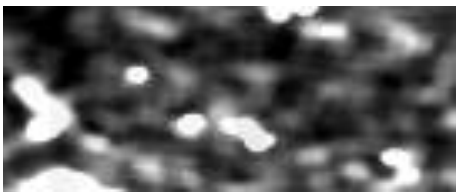
$\varepsilon_{enhanced}$

Б.23. Тестовий набір зображень №23

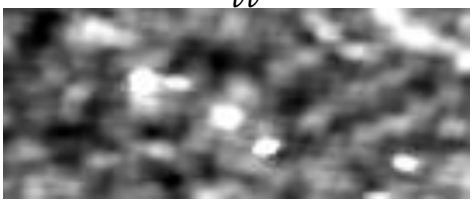
Оптичне зображення



σ_{vv}^{0}

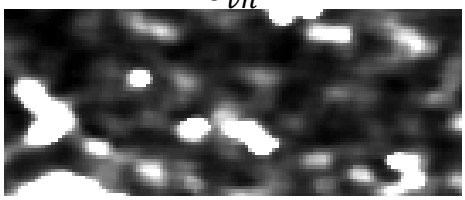


$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$

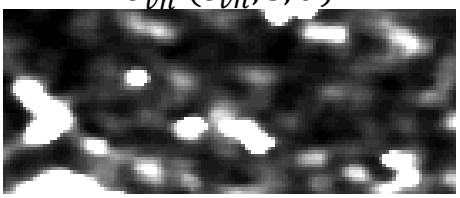


σ_{vh}^{0}

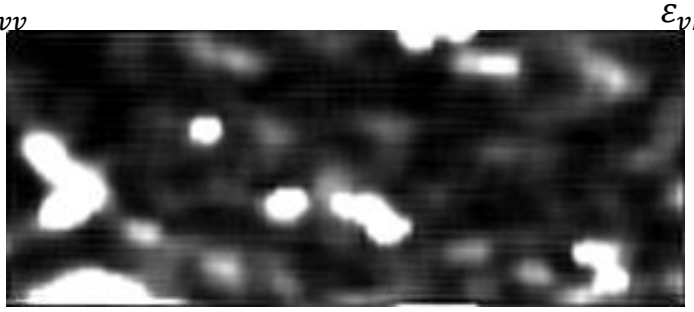
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}



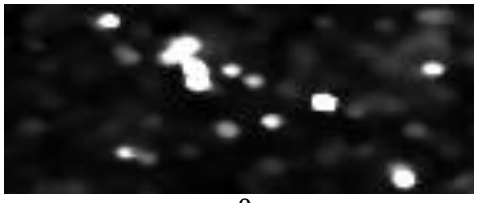
ε_{vh}



$\varepsilon_{enhanced}$

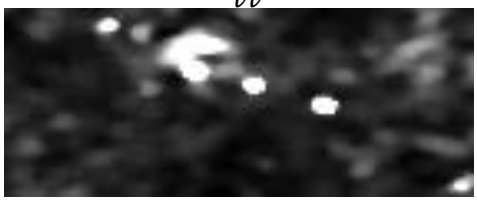
Б.24. Тестовий набір зображень №24

Оптичне зображення



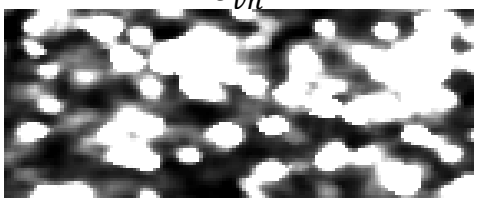
σ_{vv}^{0}

$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$

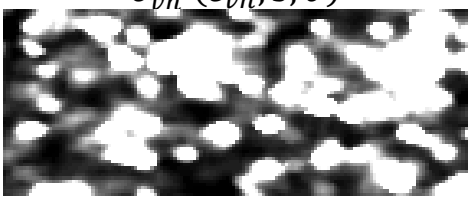


σ_{vh}^{0}

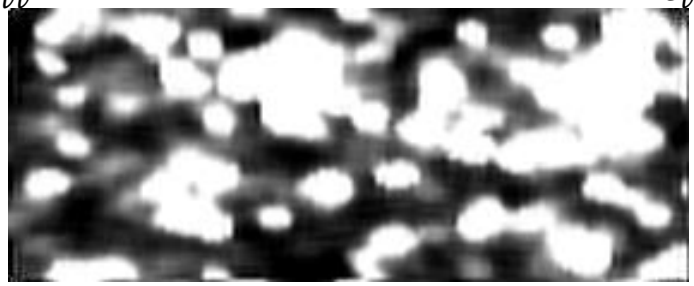
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}

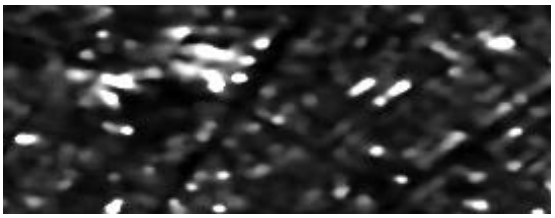


ε_{vh}

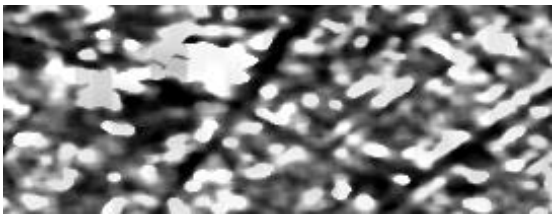


$\varepsilon_{enhanced}$

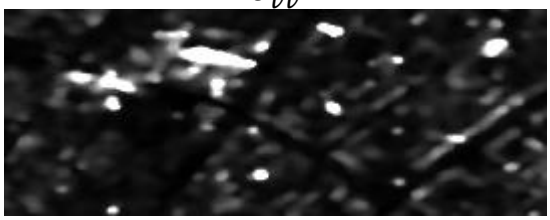
Б.25. Тестовий набір зображень №25



σ_{vv}^{0}

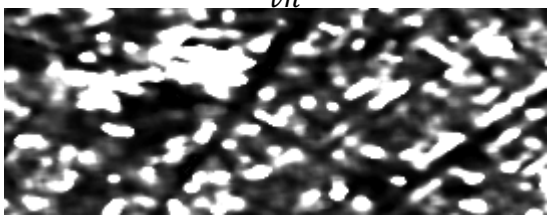


$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$

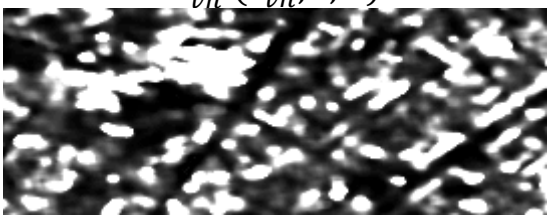


σ_{vh}^{0}

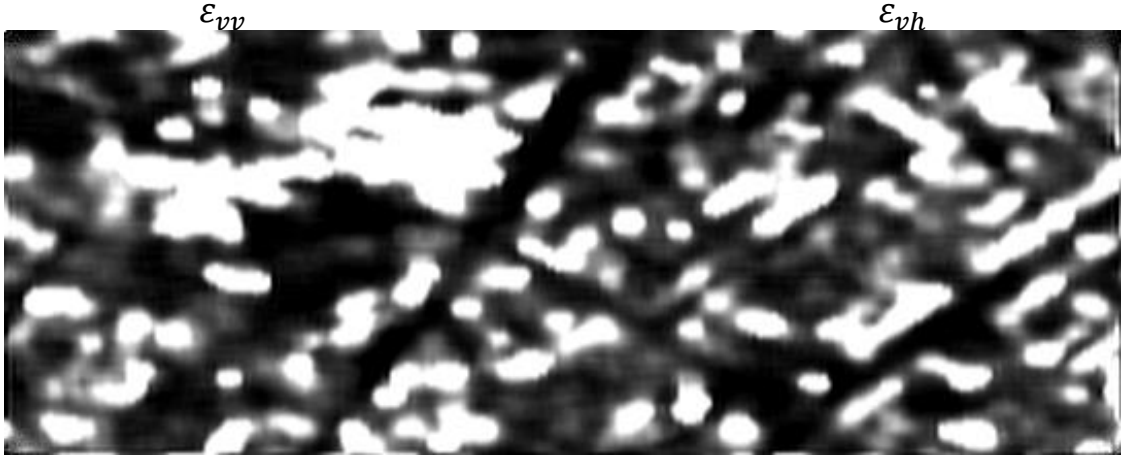
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}



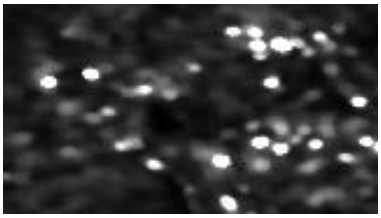
ε_{vh}



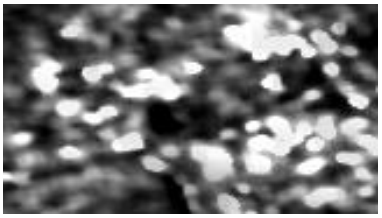
$\varepsilon_{enhanced}$

Б.26. Тестовий набір зображень №26

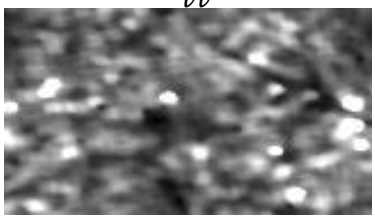
Оптичне зображення



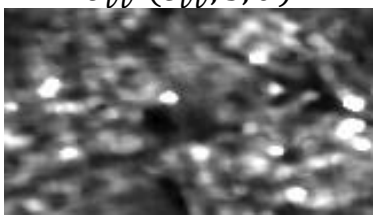
σ_{vv}^{0}



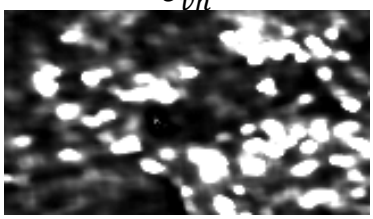
$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$



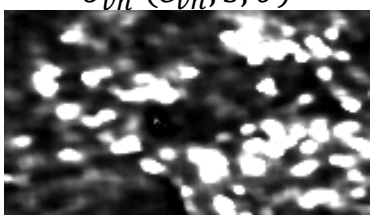
σ_{vh}^{0}



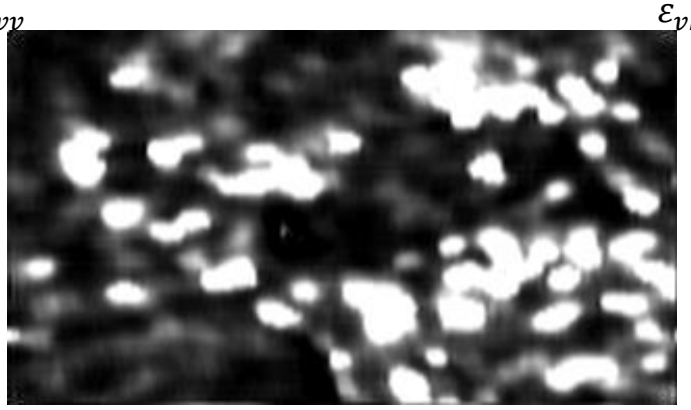
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}



ε_{vh}

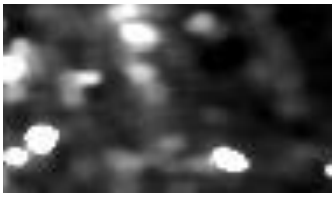


$\varepsilon_{enhanced}$

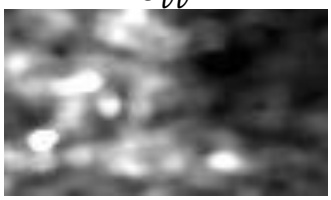
Б.27. Тестовий набір зображень №27

Оптичне зображення

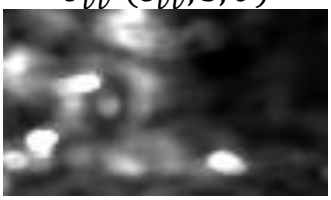
σ_{vv}^{0}



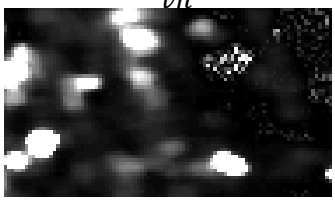
$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$



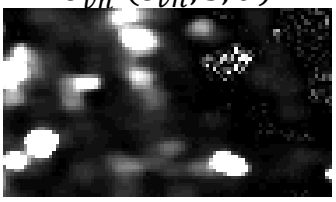
σ_{vh}^{0}



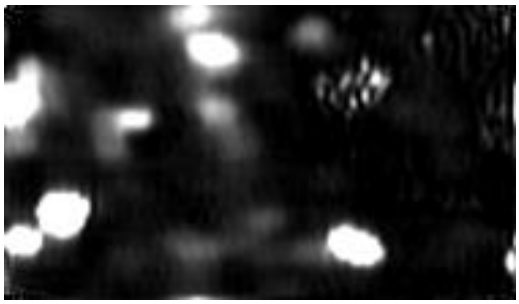
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}



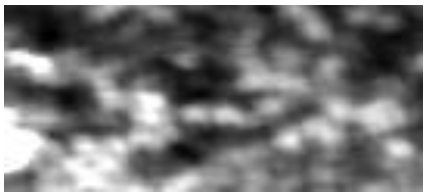
ε_{vh}



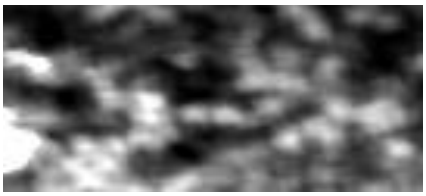
$\varepsilon_{enhanced}$

Б.28. Тестовий набір зображень №28

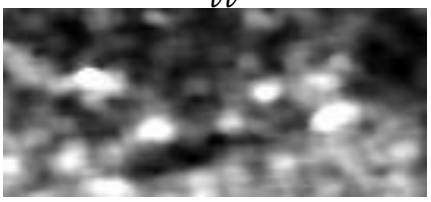
Оптичне зображення



σ_{vv}^{0}

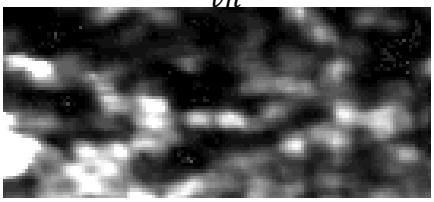


$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$

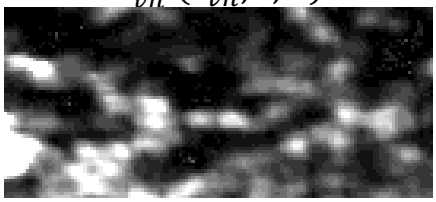


σ_{vh}^{0}

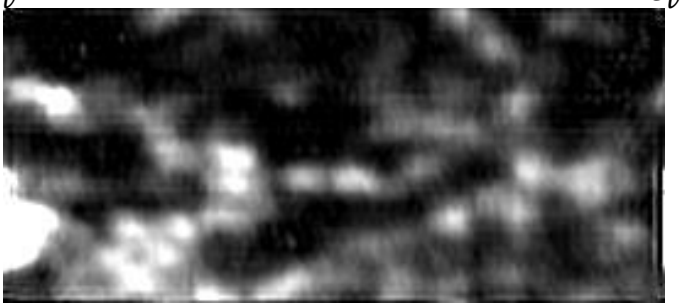
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}



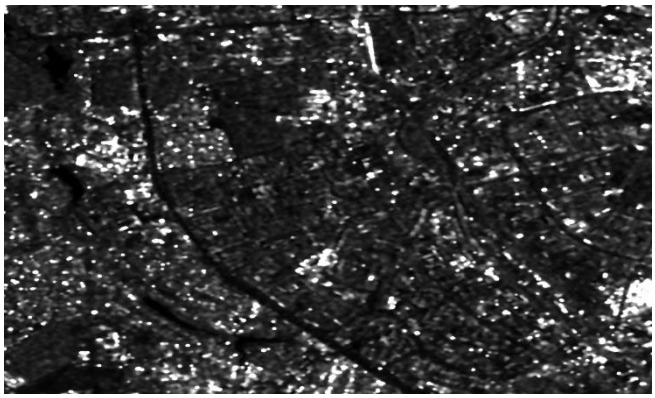
ε_{vh}



$\varepsilon_{enhanced}$

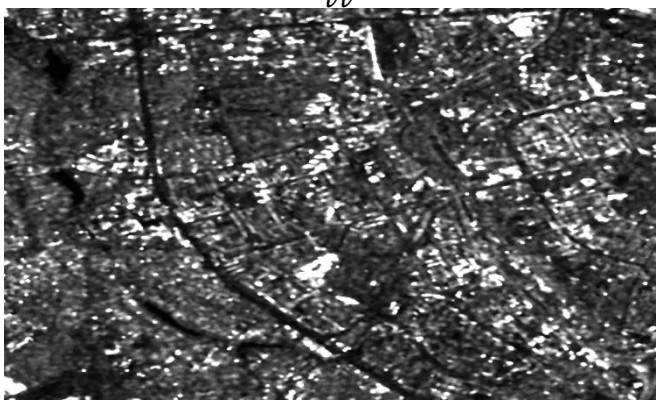
Б.29. Тестовий набір зображень №29

Оптичне зображення

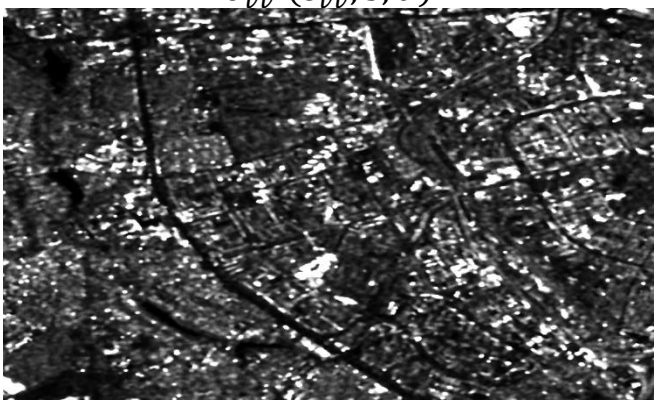


σ_{vv}^{0}

$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$



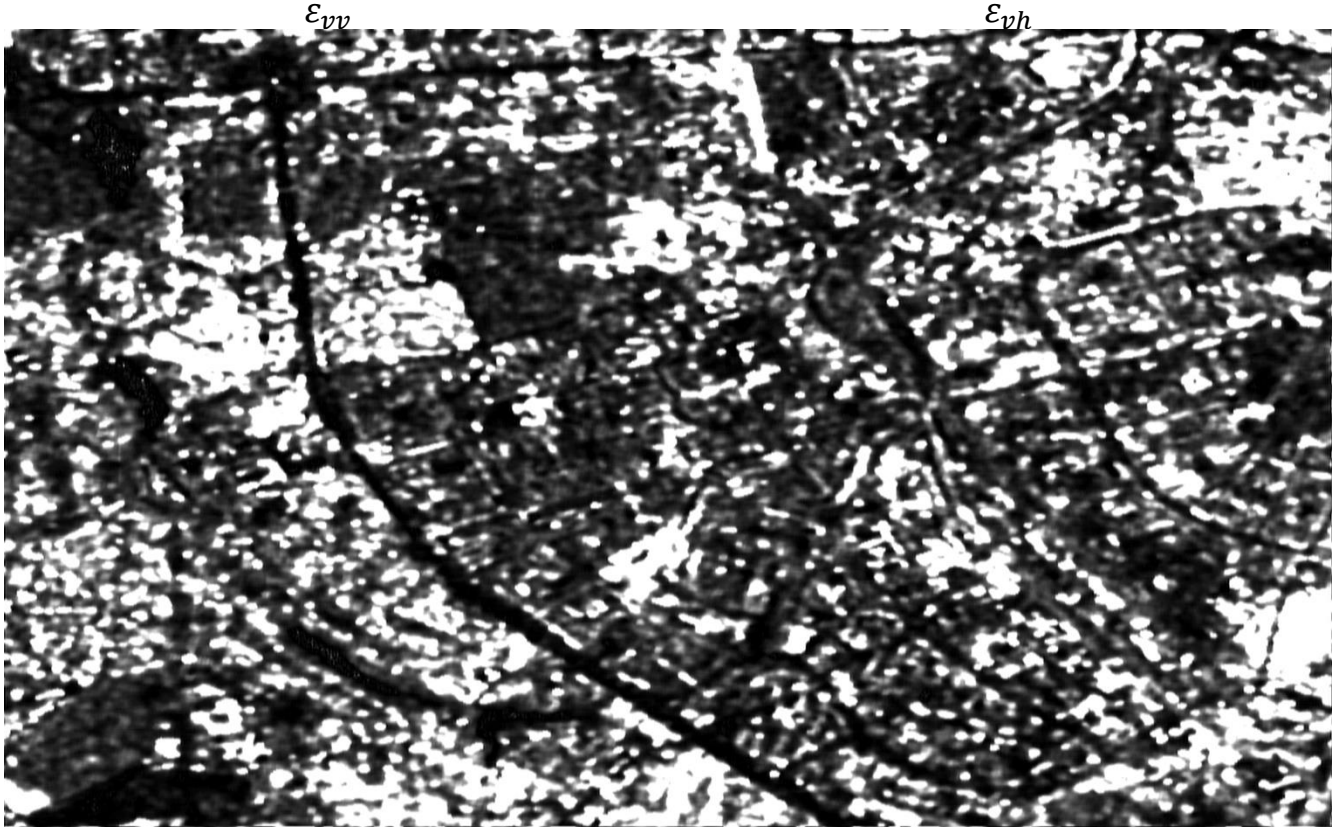
σ_{vh}^{0}



$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$

ε_{vv}

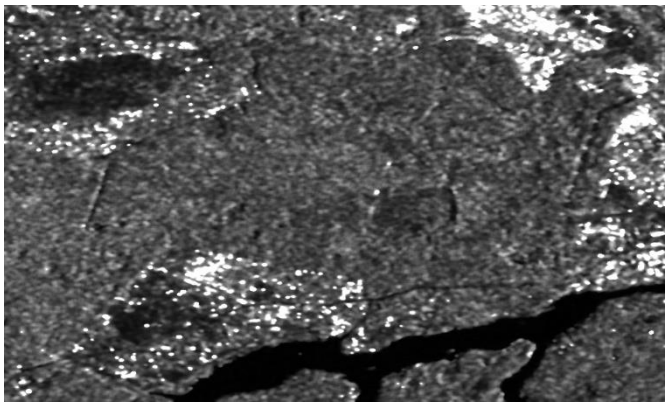
ε_{vh}



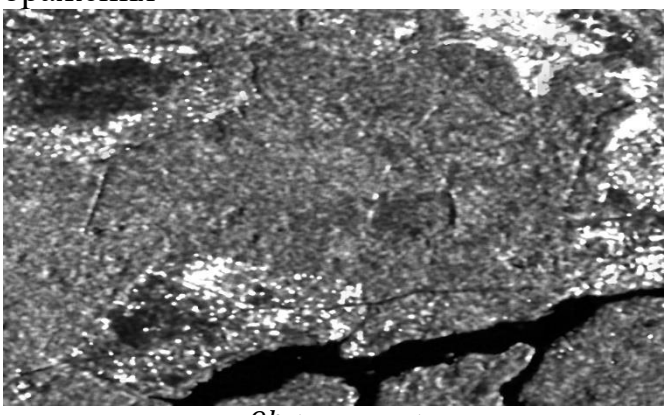
$\varepsilon_{enhanced}$

Б.30. Тестовий набір зображень №30

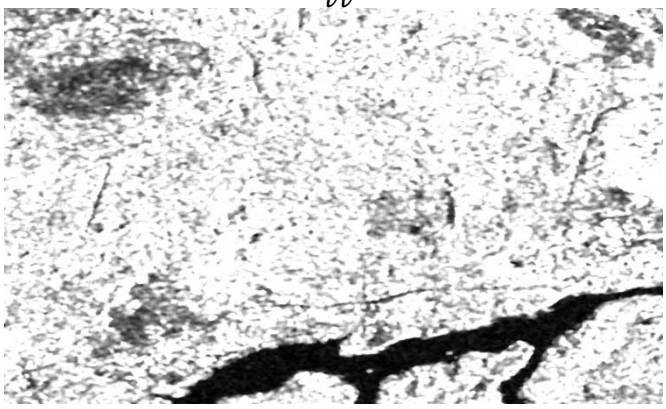
Оптичне зображення



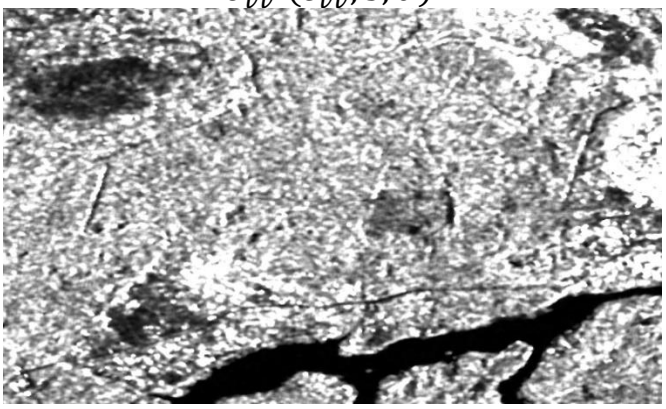
σ_{vv}^{0}



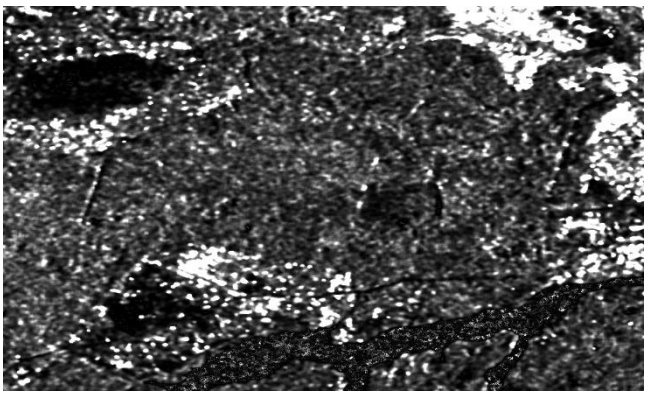
$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$



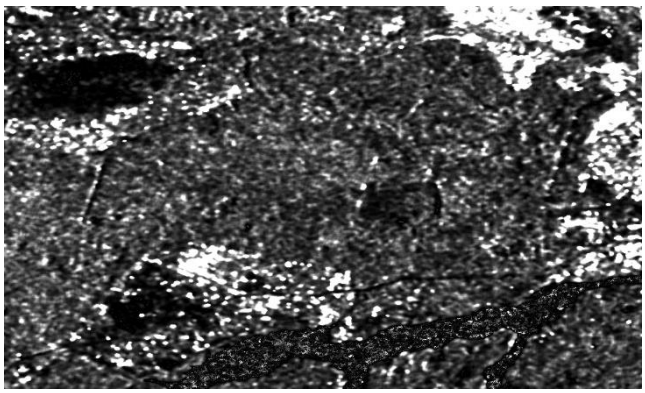
σ_{vh}^{0}



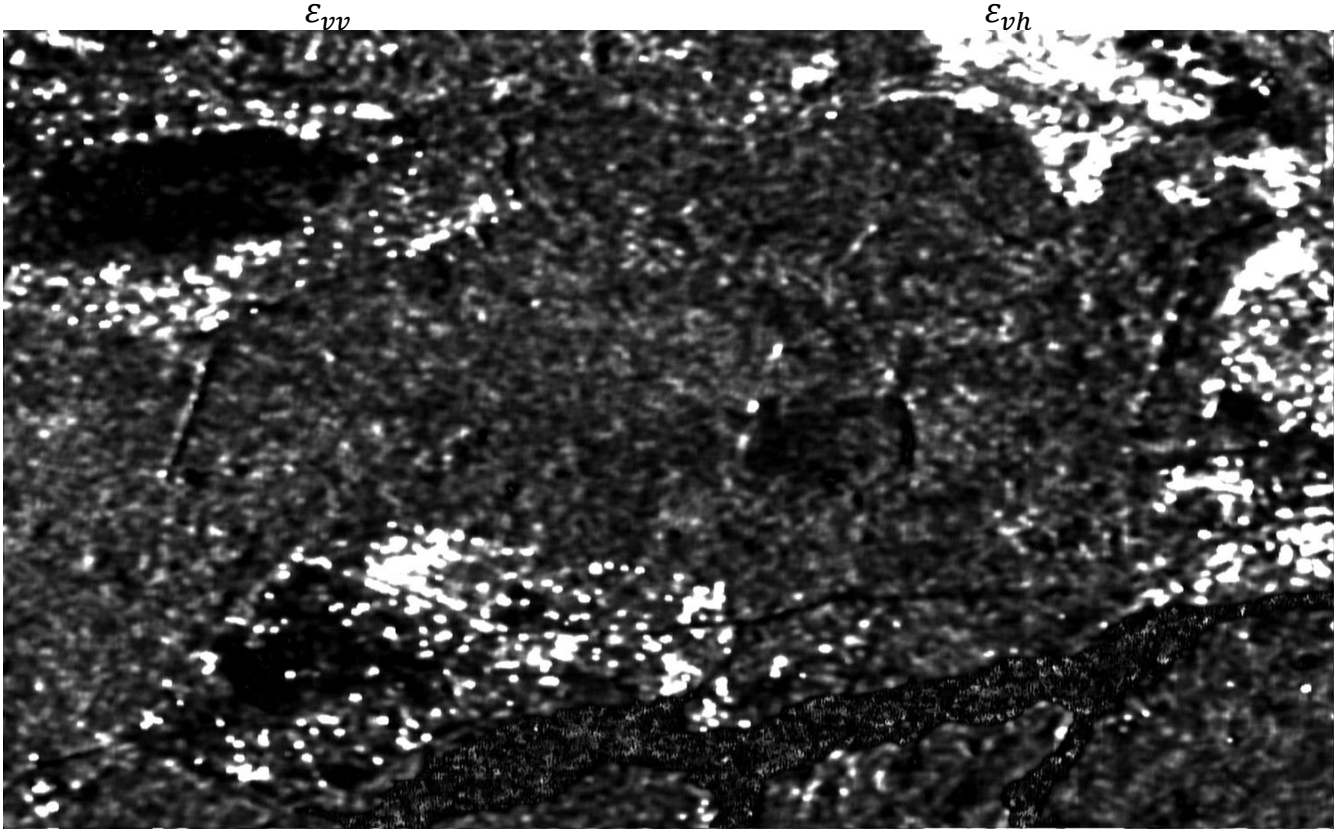
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}



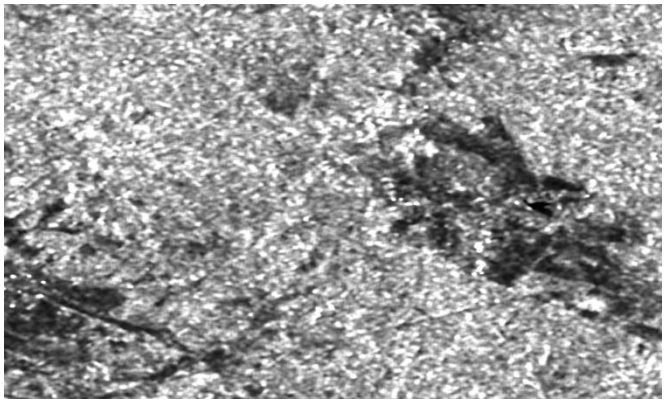
ε_{vh}



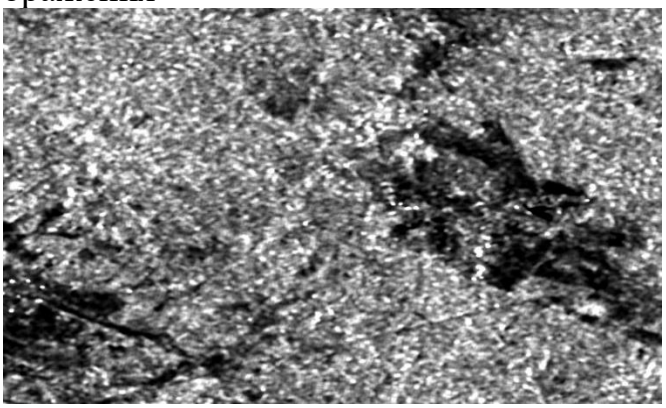
$\varepsilon_{enhanced}$

Б.31. Тестовий набір зображень №31

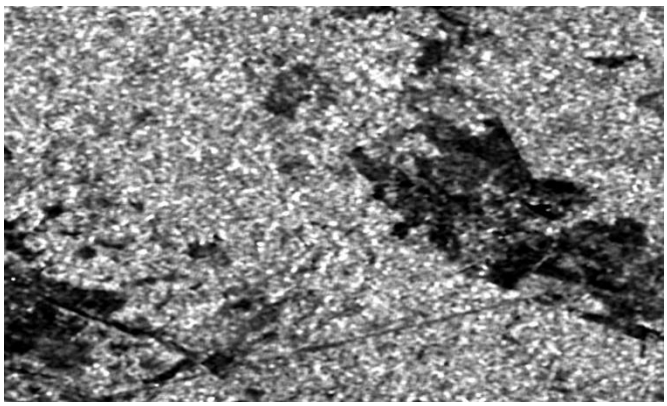
Оптичне зображення



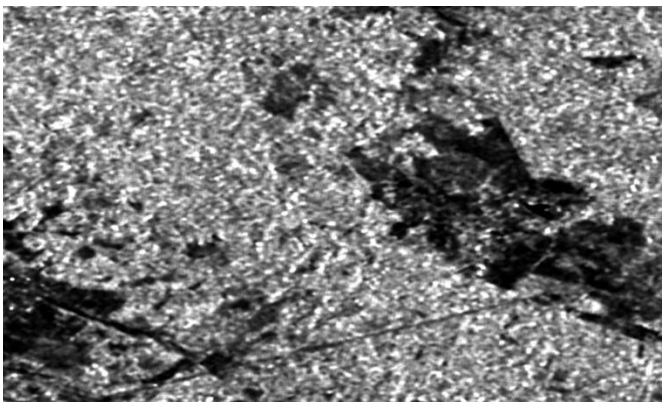
σ_{vv}^{0}



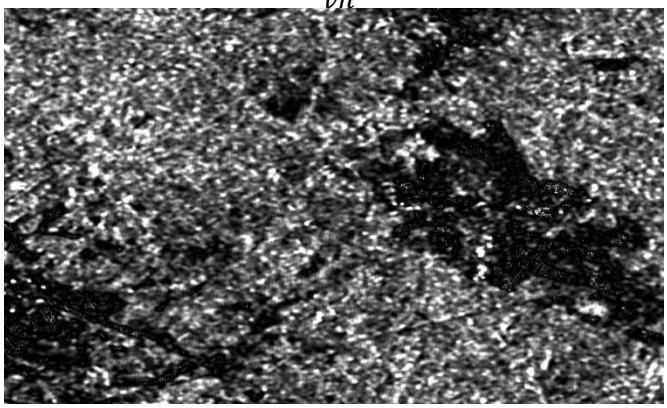
$\sigma_{vv}^{Oh}(\varepsilon_{vv}, s, \theta)$



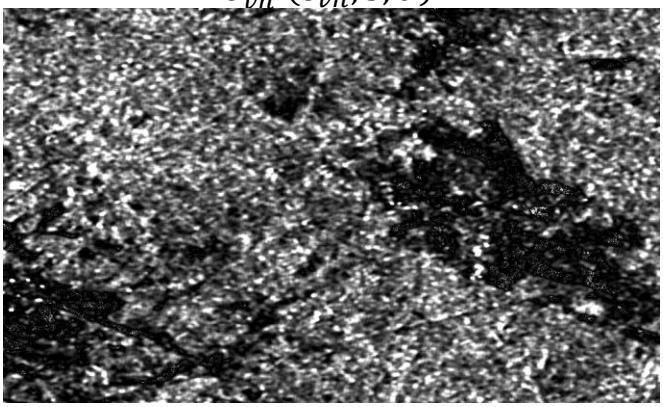
σ_{vh}^{0}



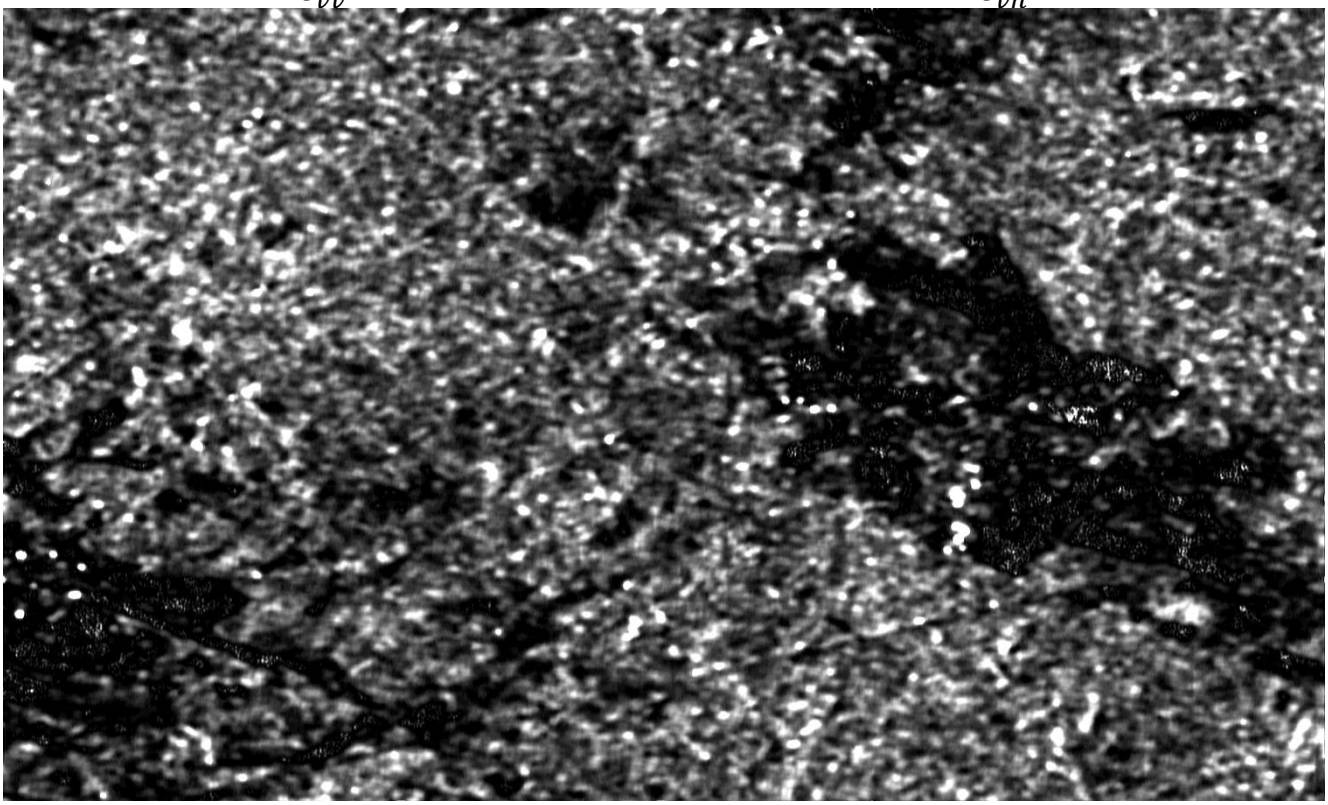
$\sigma_{vh}^{Oh}(\varepsilon_{vh}, s, \theta)$



ε_{vv}



ε_{vh}



$\varepsilon_{enhanced}$

Додаток В

Програмні коди модулів, написані на мові Python, для реалізації зведення різнополяризаційних радарних даних у діелектричну проникність середовища

В.1. Програмний код використовуваних безкоштовних бібліотек з відкритим доступом

```
import numpy as np
from PIL import Image
from multiprocessing import Pool
```

В.2. Програмний код модуля моделювання зворотного радарного розсіювання по моделі Оха

```
def R0(epsilon):
    return np.abs((1 - np.sqrt(epsilon)) / (1 + np.sqrt(epsilon))) ** 2

def g(k, s):
    return 0.7 * (1 - np.exp(-0.65 * ((k * s) ** 1.8)))

def Rh(epsilon, theta):
    nominator = np.cos(theta) - np.sqrt(epsilon - np.sin(theta) ** 2)
    denominator = np.cos(theta) + np.sqrt(epsilon - np.sin(theta) ** 2)
    return np.abs(nominator / denominator) ** 2

def Rv(epsilon, theta):
    nominator = np.sqrt(1 - (np.sin(theta) ** 2) / epsilon) - np.sqrt(epsilon) * np.cos(theta)
    denominator = np.sqrt(1 - (np.sin(theta) ** 2) / epsilon) + np.sqrt(epsilon) * np.cos(theta)
    return np.abs(nominator / denominator) ** 2

def p_sqrt(k, s, epsilon, theta):
    return (1 - np.exp(-k * s) * np.power(2 * theta / np.pi, 1 / (3 * R0(epsilon))))

def q(k, s, epsilon):
    return 0.23 * (1 - np.exp(-k * s)) * np.sqrt(R0(epsilon))

def oh_vv(k, s, epsilon, theta):
    return g(k, s) * (np.cos(theta) ** 3) * (Rv(epsilon, theta) + Rh(epsilon, theta))\
        / p_sqrt(k, s, epsilon, theta)

def oh_vh(sigma_vv, k, s, epsilon):
    return q(k, s, epsilon) * sigma_vv
```

В.3. Програмний код модуля зведення різнополяризаційних даних в діелектричну проникність земної поверхні

```
def find_best(sigma_vh, sigma_vv, k, theta):
    min_diff = 99999
    best_eps_vh = 0
    best_eps_vv = 0
    best_s = 0
    best_vh = 0
    best_vv = 0
    sigma_error_threshold = 0.2
    eps_error = 3.0
    max_epsilon = 30  # default 30
    epsilon_step = 0.5  # default 0.5
    eps_error_step = 0.25  # default 0.25
    roughness_step = 0.001  # default 0.001
    for eps_vh in np.arange(3, max_epsilon, epsilon_step):
        for eps_vv in np.arange(max(eps_vh - eps_error, 3), min(eps_vh + eps_error, 30), eps_error_step):
            for s in np.arange(0.0012, 0.027, roughness_step):
                simulated_vh = oh_vh(sigma_vh, k, s, eps_vh)
                simulated_vv = oh_vv(k, s, eps_vv, theta)
                vv_diff_ok = np.abs(sigma_vv - simulated_vv) < np.abs(sigma_vv) * sigma_error_threshold
                vh_diff_ok = np.abs(sigma_vh - simulated_vh) < np.abs(sigma_vh) * sigma_error_threshold
                if not (vv_diff_ok and vh_diff_ok):
                    continue
                diff = np.abs(sigma_vv - simulated_vv) ** 2 + np.abs(sigma_vh - simulated_vh) ** 2
                if diff < min_diff:
                    best_eps_vh = eps_vh
                    best_eps_vv = eps_vv
                    best_s = s
                    min_diff = diff
                    best_vh = simulated_vh
                    best_vv = simulated_vv

    return best_eps_vh, best_eps_vv, best_s, min_diff, best_vh, best_vv

def find_best_multiproc(sigma_vh, sigma_vv, k, theta):
    min_diff = 99999
    best_eps_vh = 0
    best_eps_vv = 0
    best_s = 0
    best_vh = 0
    best_vv = 0
    eps_error = 1.0
    max_epsilon = 30  # default 30
```

```
    epsilon_step = 0.5  # default 0.5
    eps_error_step = 0.25  # default 0.25
    roughness_step = 0.001  # default 0.001
    for eps_vh in np.arange(3, max_epsilon, epsilon_step):
        for eps_vv in np.arange(max(eps_vh - eps_error, 3), min(eps_vh + eps_error, 30), eps_error_step):
            for s in np.arange(0.0012, 0.027, roughness_step):
                simulated_vh = oh_vh(sigma_vh, k, s, eps_vh)
                simulated_vv = oh_vv(k, s, eps_vv, theta)

                diff = np.abs(sigma_vv - simulated_vv) ** 2 + np.abs(sigma_vh - simulated_vh) ** 2
                if diff < min_diff:
                    best_eps_vh = eps_vh
                    best_eps_vv = eps_vv
                    best_s = s
                    min_diff = diff
                    best_vh = simulated_vh
                    best_vv = simulated_vv

    return best_eps_vh, best_eps_vv, best_s, sigma_vh - best_vh, sigma_vv - best_vv, best_vh, best_vv

def main_multiproc(set_number):
    print(f'Processing Set{set_number}...')
    source_dir = lambda x: f'D:\\PostGraduateWork\\Data\\Set{x}\\Processed\\Subset_2\\'
    result_dir = lambda x: f'D:\\PostGraduateWork\\Data\\Set{x}\\Processed\\Results\\'
    wavelength = 0.055465763
    k = 2 * np.pi / wavelength

    sigma_vh = np.array(Image.open(source_dir(set_number) + 'SigmaVH.tif'), dtype=np.float64)
    sigma_vv = np.array(Image.open(source_dir(set_number) + 'SigmaVV.tif'), dtype=np.float64)
    theta = np.array(Image.open(source_dir(set_number) + 'localIncidenceAngle.tif'), dtype=np.float64)

    epsilon_vh = np.zeros(sigma_vh.shape, dtype=np.float64)
    epsilon_vv = np.zeros(sigma_vv.shape, dtype=np.float64)
    roughness = np.zeros(sigma_vh.shape, dtype=np.float64)
    differences_vh = np.zeros(sigma_vh.shape, dtype=np.float64)
    differences_vv = np.zeros(sigma_vh.shape, dtype=np.float64)
    sim_vh = np.zeros(sigma_vh.shape, dtype=np.float64)
    sim_vv = np.zeros(sigma_vv.shape, dtype=np.float64)

    for i in range(sigma_vh.shape[0]):
        print(f'Set{set_number} = {i / sigma_vh.shape[0] * 100}%')
        for j in range(sigma_vh.shape[1]):
            epsilon_vh[i][j], epsilon_vv[i][j], roughness[i][j], differences_vh[i][j], differences_vv[i][j],\
            sim_vh[i][j], sim_vv[i][j] = find_best_multiproc(sigma_vh[i][j], sigma_vv[i][j], k, theta[i][j])
```

```
    Image.fromarray(epsilon_vh).save(result_dir(set_number) + 'Epsilon_VH.tif')
    Image.fromarray(epsilon_vv).save(result_dir(set_number) + 'Epsilon_VV.tif')
    Image.fromarray(roughness).save(result_dir(set_number) + 'Roughness.tif')
    Image.fromarray(differences_vh).save(result_dir(set_number) + 'Differences_VH.tif')
    Image.fromarray(differences_vv).save(result_dir(set_number) + 'Differences_VV.tif')
    Image.fromarray(sim_vh).save(result_dir(set_number) + 'Simulated_VH.tif')
    Image.fromarray(sim_vv).save(result_dir(set_number) + 'Simulated_VV.tif')

def calc_informativity(eps_vv, eps_vh, eps_enh):
    eps_mean = (eps_vv + eps_vh) / 2
    c_low = 1 / (4 * eps_mean)
    eps_enh_norm = eps_enh / 2
    c_high = 1 / (4 * eps_enh_norm)
    inf_gain = np.abs(c_high / c_low) * 100 - 100
    return c_low, c_high, inf_gain
```

Додаток Г

Наукові праці, опубліковані за темою дисертаційного дослідження

Розділи у монографіях

Г.1. Stankevich, S., Piestova I., Lubskyi, M., Shklyar, S., Lysenko, A., Maslenko O., & Rabcan, J. (2021). Knowledge-Based Multispectral Remote Sensing Imagery Superresolution. *Studies in Computational Intelligence*, 219–236. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-74556-1_13, URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-74556-1_13 (Індексація: Scopus Q3. *Особистий внесок*: аналіз інформативності супутникових зображень; аналіз методів підвищення просторової розрізненності супутникових зображень; застосування моделі підвищення просторової розрізненності зображення)

Г.2. Stankevich, S., Piestova, I., Shklyar, S., & Lysenko, A. (2019). Satellite Dual-Polarization Radar Imagery Superresolution Under Physical Constraints. In: Shakhovska N., Medykovskyy M.O. (eds) *Advances in Intelligent Systems and Computing IV. CSIT 2019*, Springer, Cham, 1080. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0_30, URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-33695-0_30 (Індексація: Scopus Q3. *Особистий внесок*: застосування моделі IEM до перетворення радарних даних в значення синтетичної діелектричної проникності земної поверхні; застосування моделі субпіксельного зміщення для оцінки зміщення пари зображень; застосування моделі підвищення просторової розрізненності; застосування моделі оцінки просторової розрізненності)

Г.3. Popov, M., Stankevich, S., Kozlova, A., Piestova, I., Lubskiy, O., Titarenko, O., Svideniuk, M., Andreiev, A., Lysenko, A., & Singh, S.K. (2021). Long-Term Satellite Data Time Series Analysis for Land Degradation Mapping to Support Sustainable Land Management in Ukraine. *Advances in Geographical and Environmental Sciences*, 165–189. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-4768-0_11, URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-4768-0_11 (Інші закордонні видання. *Особистий внесок:* аналіз залежності якості класифікації об’єктів земної

поверхні від значень просторової розрізненності та шумової складової супутникових зображень)

Наукові статті, опубліковані у фахових періодичних виданнях

Г.4. Stankevich, S. A., Svideniuk, M. O., & Lysenko, A. R. (2021). Land Surface Roughness Parameter Retrieval by Inverse Simulation of Dual-Polarization Radar Backscattering. *Applied Questions of Mathematical Modeling*, 4(2.1). DOI: https://doi.org/10.32782/kntu2618-0340/2021.4.2.1.22, URL: https://ojs.kntu.net.ua/index.php/aqmm/article/view/150/186 (Індексація: фахове видання України категорії «Б». *Особистий внесок*: застосування моделі зворотного розсіювання до моделювання шорсткості земної поверхні; оцінка довжини кореляції горизонтального профілю земної поверхні)

Г.5. Stankevich, S. A., Popov, M., Shklyar, S., Sukhanov K., Andreiev A., Lysenko, A., Xing, K., Cao, S., Shh, Y., & Sun, B. (2020). Estimation of mutual subpixel shift between satellite images: software implementation. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 24, 9–14. DOI: https://doi.org/10.36023/ujrs.2020.24.165, URL: https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/165/186 (Індексація: фахове видання України категорії «Б». *Особистий внесок*: розробка моделі та алгоритму оцінки цілопіксельного зміщення пари зображень з їх застосуванням; розробка моделі та алгоритму оцінки субпіксельного зміщення пари зображень з їх застосуванням)

Г.6. Станкевич, С.А., Шкляр, С.В. & Лисенко, А.Р. (2018). Програмний модуль оцінки субпіксельного зміщення знімків, отримуваних з квадрокоптеру. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 17, 10-13. DOI: https://doi.org/10.36023/ujrs.2018.17.128, URL: https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/128/144 (Індексація: фахове видання України категорії «Б». *Особистий внесок*: оцінка субпіксельного зміщення пари зображень; трансформування кольорових зображень в панхроматичний вигляд; збір даних за допомогою квадрокоптера)

Г.7. Станкевич, С.А., Лубський, М.С., & Лисенко, А.Р. (2017). Підвищення просторової розрізненності аерознімання з квадрокоптеру на основі субпіксельної обробки зображень. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 15, 40-42.

DOI: https://doi.org/10.36023/ujrs.2017.15.113, URL: https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/113/130 (Індексація: фахове видання України категорії «Б». *Особистий внесок*: застосування моделі підвищення просторової розрізненності зображення, отриманого за допомогою квадрокоптера; оцінка просторової розрізненності)

Г.8. Лисенко, А.Р. (2023). Методика підвищення інформативності космічних знімків, отриманих за допомогою багатополяризаційного радара із синтезованою апертурою. *Український журнал дистанційного зондування Землі, 10*(3), 10–15. https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.3.243, URL: https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/243/255 (Індексація: фахове видання України категорії «Б».)

Г.9. Stankevich, S. A., Piestova, I. O., & Lysenko, A. R. (2020). Radar Data Product Superresolution under Parameter Variation. *Central European Researchers Journal, 6*(2), 8–13. URL: https://ceres-journal.eu/download.php?file=2020_02_02.pdf (Інші закордонні видання. *Особистий внесок*: оцінка можливостей зведення різнополяризаційних даних в єдине значення діелектричної проникності земної поверхні; застосування моделі та алгоритму підвищення просторової розрізненності супутникового зображення; застосування моделі оцінки просторової розрізненності)

Г.10. Stankevich, S., Popov, M., Shklyar, S., Sukhanov, K., Andreiev, A., Lysenko, A., Kun, X., Shixiang, C., Yupan, S., Xing, Z., & Boya, S. (2020). Subpixel-shifted Satellite Images Superresolution: Software Implementation. *WSEAS Transactions on Computers*, 19, 31–37. DOI: https://doi.org/10.37394/23205.2020.19.5, URL: https://wseas.com/journals/computers/2020/a105105-063.pdf (Інші закордонні видання. *Особистий внесок*: розробка та застосування моделей та алгоритмів підвищення просторової розрізненності супутникових зображень; оцінка просторової розрізненності)

Патент України на винахід

Г.11. Спосіб підвищення просторової розрізненності розподілу температури земної поверхні, одержаного дистанційно. Станкевич С. А., Пєстова І. О., Лубський М. С., Лисенко А. Р.: пат. 126778 Україна: МПК G06T5/50, G06T7/32, G06V10/20,

G06V10/36. № a 2021 01200; заявл. 10.03.2021; опубл. 01.02.2023, Бюл. №5 (*Особистий внесок*: застосування моделі підвищення просторової розрізненності зображення; застосування моделі оцінки просторової розрізненності зображення)

Апробація матеріалів дисертації

Г.12. Stankevich, S. A., Lubskyi, 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 2021)*, 89–94. DOI: https://doi.org/10.1109/IDT52577.2021.9497630, URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9497630 (Індексація: Web of Science. *Особистий внесок*: аналіз методів підвищення просторової розрізненності зображення; застосування моделі для оцінки просторової розрізненності зображення)

Г.13. Stankevich, S., Piestova, I., Shklyar, S., & Lysenko, A. (2019). Physically Constrained SAR Data Superresolution. *2019 IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies* (CSIT 2019), 228–231. DOI: https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2019.8929833, URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8929833 (*Особистий внесок*: розробка та застосування алгоритму обробки радарних зображень з метою підвищення їх просторової розрізненності; розробка та застосування алгоритму зведення різнополяризаційних даних в діелектричну проникність земної поверхні; застосування моделі підвищення просторової розрізненності зображення; оцінка просторової розрізненності)

Г.14. Stankevich S.A., Andreiev A.A., & Lysenko A.R. (2020). Multiframe remote sensed imagery superresolution. *Proceedings of the 15th International Scientific-Practical Conference on Mathematical Modeling and Simulation Systems* (MODS 2020), 128–131. (*Особистий внесок*: застосування моделі підвищення просторової розрізненності зображення; застосування моделі оцінки субпіксельного зсуву пари зображень; оцінка просторової розрізненності)

Додаток Д

Акти впроваджень результатів дисертаційного дослідження

Д.1. Акт впровадження результатів у наукових дослідженнях Відділу чистих та прикладних наук Урбінського університету імені Карло Бо (Італія)

1506
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI URBINO CARLO BO

DISPEA
DIPARTIMENTO DI SCIENZE PURE E APPLICATE

To whom it may concern

We hereby certify that Artur Lysenko has collaborated in the research on the definition of the capable faults of the northern Umbrian-Marche Apennine conducted by the undersigned at the Department of Pure and Applied Sciences of the Carlo Bo University of Urbino.
In particular, he contributed to the analysis of tectonic features using RSM.
Artur Lysenko demonstrated remarkable analytical and synthesis skills which led to useful results for the project.

Urbino, 15.06.2023

Mauro De Donatis

Prof. Mauro De Donatis

tel. +39 0722 304295
mauro.dedonatis@uniurb.it

Д.2. Акт впровадження результатів у навчальному процесі ННІ “Інститут геології” Київського національного університету імені Тараса Шевченка

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Директор ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктор геологічних наук, професор

_____ Сергій ВИЖВА

“20” червня 2023 р.

АКТ

впровадження результатів наукових досліджень аспіранта Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України **Лисенка Артура Ростиславовича**

Комісія в складі:

голова – доктор геологічних наук, доцент, заступник директора з науково-педагогічної роботи (наукова робота) Шабатура О.В.,

члени комісії – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри геоінформатики Зацерковний В.І.; доктор геологічних наук, старший дослідник, доцент кафедри геоінформатики Меньшов О.І.,

склали цей акт про те, що науковий результат, одержаний Лисенком А.Р., а саме – *методика підвищення розрізненості двополяризаційних радіолокаційних супутникових зображень на основі перетворення сигналу зворотного розсіювання на значення діелектричної проникності земної поверхні*, був використаний у навчальному процесі ННІ «Інститут геології», а саме представлений і обговорений на розширеному семінарі кафедри геоінформатики 19.06.2023.

Голова комісії Олександр ШАБАТУРА

Члени комісії Віталій ЗАЦЕРКОВНИЙ

Олександр МЕНЬШОВ