

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Горобець Олексій Миколайович

УДК 537.8 + 528.855

ДИСЕРТАЦІЯ

**«НАЗЕМНЕ МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ
АЕРОКОСМІЧНИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ
ЗЕМЛІ»**

Спеціальність 01.04.03 – радіофізика

(фізико-математичні науки)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

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

_____ О.М. Горобець

Науковий керівник Єлісєєва Надія Петрівна, доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

Харків – 2019

АНОТАЦІЯ

Горобець О. М. Наземне метрологічне забезпечення точності аерокосмічних систем дистанційного зондування Землі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика (Фізико-математичні науки). – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2019.

Високий попит на продукцію космічного землегляду викликаний великою кількістю прикладних задач, яка дедалі зростає. Нові методи використання таких даних диктують більш жорсткі вимоги до якості продукту дистанційного зондування Землі, в тому числі до періодичності та точності експлуатаційного калібрування космічних сенсорів. Окремим важливим напрямком діяльності в цій сфері є забезпечення простежуваності яскравості пікселя на знімку до міжнародної метрологічної системи одиниць СІ. Обрана тема дисертації є актуальною, бо передбачає розробку низки фізико-математичних і науково-технічних рішень, а також програмного забезпечення для найважливішої складової надійного метрологічного забезпечення – післястартового калібрування радіолокаторів космічного базування з синтезованою апертурою антени (РСА), а також розробку апаратних рішень у сфері малогабаритних антен для ретрансляторів зондуючого сигналу (як мобільних та ефективних пристроїв для зовнішнього калібрування РСА).

Об'єкт дослідження – радіофізичні методи дистанційного зондування, оброблювані цифрові сигнали у вигляді специфікованих радіолокаційних та інфрачервоних зображень поверхні Землі зі спеціальним калібрувальним

приладдям або з антропогенними спорудами, електромагнітні поля і хвилі у відкритій системі транспондера, їх дифракція й інтерференція.

Предмет дослідження – фізичні явища в радіолокації, зокрема при зовнішньому калібруванні РСА; нові підходи щодо обробки цифрових сигналів, а саме, пошук наземних споруд, придатних для калібрування космічних РСА; залежність характеристик спрямованості й узгодження антени типу диполь над екраном від її електричних розмірів і конфігурації.

В роботі отримані наступні нові наукові результати:

1. Уперше встановлена кореляція між шириною відгуку на точковий об'єкт (кількість пікселів) і шириною апертури використовуваного для калібрування РСА відбивача. Вочевидь вона є наслідком систематичної похибки, викликані високою імовірністю розміщення центра відгуку на межі пікселів. Запропонований новий метод визначення роздільної здатності РСА, що базується на зворотному матричному згортанні. Визначення ширини відгуку безпосередньо за обчисленим ядром згортання емітує точковий відгук для відбивачів незалежно від їх ефективної площі розсіяння (ЕПР) або розмірів їх апертур. Це дозволяє використовувати тригранні кутникові відбивачі різного розміру водночас і для дослідження радіометричних властивостей, зокрема чутливості, і для визначення роздільної здатності РСА. За результатами проведених вимірювань цей метод забезпечує в середньому на 15 % меншу невизначеність типу А (стандартне відхилення), ніж найбільш поширений з відомих методів. Єдине обмеження цього методу для найбільш детальних режимів роботи РСА полягає в необхідності отримати доступ до параметрів алгоритму автофокусування.

2. Удосконалено математичну модель залежності яскравості зображення відбивача на радіолокаційному зображенні (РЛЗ) від ЕПР еталонних відбивачів, що розташовані на підстильній поверхні, та розроблено метод визначення передатної функції РСА на основі аналізу більше 100 радіолокаційних

зображень відбивачів, який дозволяє суттєво підвищити точність визначення ЕПР об'єкта за його яскравістю у верхній і нижній частинах динамічного діапазону РСА. Це досягається за рахунок переходу від квазілінійної моделі передатної функції до сигмоїдальної. Також запропоновані універсальні характеристики цієї моделі, які дозволяють користувачеві порівнювати між собою параметри різних РСА й оцінювати їх придатність для виконання конкретних тематичних завдань. Розроблені математичні моделі відгуку на точкову ціль на радіолокаційному зображенні та досліджено можливість їх застосування для зовнішнього калібрування РСА за РЛЗ. Запропонований спосіб апроксимації відгуку за центральними рядком і стовпцем доцільно використовувати для випадків високих фонових шумів, наприклад для визначення радіометричних характеристик. Запропонований спосіб з апроксимацією двовимірного відгуку двовимірною функцією Гауса – доцільно використовувати для підвищення точності визначення характеристик РСА при роботі з РЛЗ з низьким рівнем фонових шумів.

3. Дістав подальший розвиток розв'язок задачі виявлення антропогенних об'єктів на монохромних знімках Землі. Він дозволяє підвищувати точність зовнішнього калібрування радіометричних параметрів РСА за рахунок значної кількості тест-об'єктів на РЛЗ з ЕПР відомою заздалегідь для даного ракурсу. Відповідно до проведених досліджень це можуть бути металеві споруди господарського призначення, такі як цистерни чи водонапірні вежі, або інші будівлі з дахом із матеріалу з регулярною структурою, такого як шифер. Розроблений алгоритм не потребує чіткої специфікації форми або тренувального набору даних. Він базується на принципах, за якими будівлі на знімках шукає оператор, а саме пошук неприродних форм, в нашому випадку – об'єктів з прямими межами та близькими до прямих кутами між ними. Розроблений метод був протестований на серії монохромних зображень в

інфрачервоному діапазоні. Він дозволяє визначити майже всі будівлі, проте має місце і високий шанс хибного виявлення. Такі хибні об'єкти мають бути відсіяні при зйомці однієї місцевості з різних ракурсів.

4. Уперше для розв'язання задачі створення високоефективного "точкового" наземного відбивача для наземних еталонних полігонів запропоновано активний радіолокаційний відповідач-ретранслятор (транспондер) зі слабкоспрямованими приймальною і передавальною антенами та мікрохвильовими підсилювачами з високим коефіцієнтом підсилення. Така антена дозволяє зменшити невизначеність вимірювань, зумовлену похибками кутового положення антени ретранслятора. Працездатність транспондера підтверджено в прямому наземно-космічному експерименті з РСА космічного апарата (КА) «TerraSar-X». Запропоновано та теоретично й експериментально доведено можливість розширення смуги робочих частот вібраторної антени, розміщеної паралельно плоскому екрану, шляхом введення між вібратором і екраном стрижневих або дискових неоднорідностей. Показано, що такий спосіб узгодження впливає на діаграму спрямованості не суттєво. Використання обох погоджувальних елементів дозволяє розширити робочу смугу до 17 % від центральної робочої частоти за рівнем коефіцієнта стоячої хвилі за напруженістю (КСХН) ≤ 1.5 , і до 18,7 % за рівнем КСХН ≤ 2.0 . Визначено також вимоги до взаємного розміщення приймальної та передавальної антен такого типу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблені два новітніх методи вимірювання роздільної здатності та радіометричних характеристик РСА космічного базування дозволяють використовувати для визначення роздільної здатності та радіометричних характеристик одні й ті самі тригранні кутникові відбивачі (ТКВ), що призводить до підвищення загальної точності калібрування РСА. Розроблена низка програмних модулів, в яких реалізовані ці методи, спрощує

для кінцевого споживача використання зображень для калібрування радіолокаторів космічного базування.

Запропонована й апробована можливість зовнішнього калібрування РСА за допомогою наземних антропогенних споруд, досліджені їх типові конструктиви та розроблений алгоритм пошуку об'єктів на монохромних знімках земної поверхні з формою, характерною для антропогенних споруд. Це дозволяє в реальному масштабі часу визначити об'єкти, які можуть бути придатні для зовнішнього калібрування РСА. Цей новий підхід у розпізнаванні образів може бути застосований в інших сферах науки та техніки (розпізнавання дорожніх знаків, класифікація патогенних мікроорганізмів за мікрознімками, тощо), окрім дистанційного зондування.

Розроблений і експериментально досліджений транспондер може бути використаний для розробки подібних пристроїв у інших частотних діапазонах. Використана компактна широкосмугова антена перспективна для використання у мобільних системах зв'язку.

Отримані результати та розроблені методи випробувані та впроваджені в практику при зовнішньому калібруванні РСА КА «Кондор-Э» та «TerraSar-X» в період експериментальних випробувань підсупутникового калібрувального полігону «Скрипалі» НКАУ в 2012–2016 рр.

Ключові слова: Електромагнітні хвилі, радіолокатор, зовнішнє калібрування, радіолокаційне зображення, роздільна здатність, чутливість, розпізнавання образів, антена, кутниковий відбивач.

ABSTRACT

Gorobets O. M. Ground metrological accuracy assurance of space-born Earth Observation units. – The qualifying scientific paper, manuscripts.

Thesis for a Candidate Degree in physics and mathematics: Specialty 01.04.03 – radio physics (physics and mathematics). – V. N Karazin Kharkiv National University, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2019.

High demand for a space-born Earth Observation (EO) products is caused by a large number of particular applications, which is always growing. New methods of using such data ask for higher requirements for the EO product quality, including the periodicity and accuracy of the vicarious calibration of space-craft sensors. Another important activity area in this branch is to ensure the traceability of a pixel brightness on a radar image to the international system of units SI. The topic of the thesis is relevant because it involves the development of a number of scientific and technical solutions, as well as software for the most important component of a metrological support – the vicarious calibration of a space-based Synthetic Aperture Radar (SAR) and also because of the developing of point-target antennas for a transponder to relay scanning signals (as a mobile and efficient device for vicarious calibration of a SAR).

Research objects: radiophysical methods of a remote sensing, specified radar and infrared images of the Earth with shown special calibration devices or buildings which should be processed as digital signals, electromagnetic fields and waves in an external transponder system as well as their diffraction and interference.

Research subjects are: radar physical phenomena, in particular related to the vicarious calibration of SAR; new approaches to digital signal processing, intended to searching targets suitable for the vicarious calibration of spaceborne SAR; dependences of directional and impedance pattern of a dipole above the screen antenna on its electrical dimensions and configuration.

Following new scientific results have been obtained in the work:

1. It is established for the first time the correlation between the point-target response width (number of pixels) with the reflector aperture dimensions, which is used to calibration. Obviously, this is the result of a systematic error caused by the high probability of appearing the response center at the pixel boundaries. The advanced method for determining a SAR resolution has been proposed as well. The main principle which that is based on is the operation of matrix deconvolution. The evaluating of response width directly by gotten the convolution kernel emulates a point-target response of reflector independent to its Radar Cross-section (RCS) or aperture size. This allows to use triangle corner reflectors of various sizes for evaluating both resolution and radiometric properties of SAR's at the same time. According to the measurements have been, this method provides on average 15 % less type A uncertainty (standard deviation) than the most prevalent among common ones. The only limitation of this method for the spotlight mode of SAR is the need to access autofocus algorithm parameters.

2. The mathematical model of the SAR output signal dependence versus the Radar Cross-section of reference reflectors, which are located on the scanned surface, is improved. The appropriate method for detailed evaluation of the transfer function and sensitivity of the SAR, which is based on more than hundred radar images of corner reflectors is developed as well. This significantly improves the accuracy of evaluation the object's RCS by its brightness on image in cases where it is close to the upper or lower bound of the SAR dynamic range. This is achieved by transfer function conversion from a quasilinear to the sigmoidal one. Also there are proposed general parameters of this model that allow a user to compare different SAR's with each other and to assess their suitability for a specific application. Mathematical models of the point-target response on the radar image are developed and their suitability for the SAR vicarious calibration by radar images are investigated as well. The proposed method of a response curve fitting by the center line and column could

be used for high background noise cases to evaluate, for example radiometric characteristics. The proposed one with fitting by the two-dimensional Gaussian is suitable to improve the accuracy of evaluating SAR characteristics when working with radar images with a low background noise.

3. It is got Further development of building extraction solution from grayscale images of an Earth surface. It allows to increase the accuracy of the SAR vicarious calibration due to increasing a number of test objects on the radar image if appropriate RCS'es is known in advance for this sight-angle. According to the research, these could be metal structures of common use, such as tanks or water towers, or moreover buildings with a roof material of regular structure, such as slate. The algorithm doesn't need to specify the typical object shape precisely and does not require a training dataset at all. It is based on principles by which a human finds buildings on Earth surface images, namely the search for unnatural shapes, in our case – objects with straight boundaries and close to right angles between. The algorithm has been tested on the monochrome images dataset of infrared spectrum. It allows to extract almost all buildings, but there is a high chance of the false positive, which could be strong reduced by shooting the same scene from different sight-angles.

4. It is proposed for the first time, the transponder with low-directional receiving and transmitting antennas and high gain microwave amplifiers as the high-performance point-target (reflector) for the ground test-site. Such antenna type reduces a measurements uncertainty caused by angular position errors of transponder antennas. The performance of the given transponder has been confirmed through the vicarious calibration campaign with the «TerraSar-X» spacecraft SAR. It is proposed the way of expanding the frequency band of the dipole antenna, placed above the flat screen, by inserting a metal rod or disk between the dipole and the screen. Its possibility proved theoretically and potential shown experimentally. It is shown that such way of band extension does not affect significantly to the directive pattern.

The use of both impedance matching elements allows to extend the frequency band up to 17 % of the central one at the voltage standing wave ratio (VSWR) ≤ 1.5 level, and to 18.7 % at the level of VSWR ≤ 2.0 . Requirements of mutual placement of the receiving and transmitting ones have been determined as well.

The practical significance of obtained results mostly consist of two developed newest methods for measuring the resolution and radiometric characteristics of the space-born SAR, which allows to use same corner reflectors to determine the one's resolution and sensitivity. It should improve overall accuracy of the SAR vicarious calibration as well. A number of software modules have been developed in which these methods are implemented. It makes simple to use radar images for a calibration of space-born SAR's by the end-user.

The possibility of the SAR vicarious calibration with man-made objects is investigated and tested. It is explored their typical shapes and it is developed the algorithm of building extraction from grayscale images. The main principle is searching for objects with an unnatural shape. It is possible to get it quickly a lot of objects that can be suitable for the vicarious calibration of a SAR. This new approach to pattern recognition can be applied in other areas except for remote sensing, such as road traffic, classification of pathogenic microorganisms by microscopes etc.

The developed and experimentally tested transponder can be used to develop similar devices in other frequency bands. The used compact broadband antenna is also quite useful in mobile communication systems.

Obtained results and developed methods have been tested and put into practice during the vicarious calibration campaign of the "Condor-E" and "TerraSar-X" space-born SAR's. It has been done during the testing and adoption stage of the calibration test site "Skripali" which has been supervised by the National Space Agency of Ukraine (NSAU) in 2012–2016.

Key words: Electromagnetic waves, radar, vicarious calibration, radar image, resolution, sensitivity, pattern recognition, antenna, corner reflector.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Наукові праці у наукових фахових виданнях України:

1. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Красногорский М. Г., Костриков А. Л., Купко В. С., Лебедев А. С., Малюков В. М., Ратушная Е. С. Мобильный контрольно-калибровочный комплекс для РСА космического базирования // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2012. № 1010. Вип. 20. С. 3–9. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у створенні й експериментальних випробуваннях полігону для калібрування РСА, розробив механічні вузли для точної орієнтації відбивачів за параметрами траси космічного апарата.)*

1а. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Костяшкин С. И., Красногорский М. Г., Малюков В. М., Мель И. А., Ратушная Е. С. Полигонно-калибровочный комплекс для наземного обеспечения радиолокационного космического землеобзора // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2012. № 1010. Вип. 20. С. 10–18. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у створенні та в роботі полігону, розробив конструкторську документацію до калібрувального комплексу.)*

2. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Красногорский М. Г., Малюков В. М. Внешняя калибровка РСА космического базирования: 2. Метод радиометрической калибровки радиолокаторов высокого разрешения // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2012. № 1038. Вип. 21. С. 7–10. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у розробці методичної бази для обробки результатів і створив на її основі необхідні програмні скрипти для постановки експерименту.)*

3. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Красногорский М. Г., Лебедев А. С., Малюков В. М. Теория и практика полигонного обеспечения космического радиолокационного землеобзора // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2013. № 1094. Вип. 23. С. 36–43. *(Особистий внесок здобувача: розв'язав задачу із обчислення азимуту сліду траси космічного апарата на поверхні Землі для заданих географічних координат.)*

4. Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Махов Е. С. Вибраторные антенны с согласующимися неоднородностями в ближней зоне // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2017. Вип. 27. С. 70–74. *(Особистий внесок здобувача: розробив креслення експериментальних зразків антен, теоретично й експериментально дослідив узгодження та діаграми спрямованості антен.)*

5. **Горобец А. Н.** Обработка монохромного изображения поверхности Земли для обнаружения строений // Радіофізика та електроніка. 2017. Т. 22, № 4. С. 11–18.

5a. Переклад: **Gorobets A. N.** Building Detection using Processing of Monochromatic Earth Observation Image // Telecommunications and Radio Engineering. 2018. Vol. 77, Issue 3. P. 243–256. (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

Наукові праці у зарубіжних наукових фахових виданнях:

6. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Сафронова Л. П. Эффективная площадь рассеяния наземных сооружений, используемых в качестве радиолокационных реперов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. 2009. Вип. 6, Т. 2. С. 506–512. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у розрахунках і експериментальних дослідженнях.)*

7. Елисеева Н. П., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.** Характеристики ближнего поля горизонтального вибратора, расположенного над квадратным экраном // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 7. С. 611–628. (Видання входить до наукометричної бази Science index.)

7a. Переклад: Yeliseyeva N. P., Gorobets N. N. **Gorobets A. N.** Characteristics of Near Field of the Horizontal Vibrator Located above a Square Screen // Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. Vol. 61, № 7. P. 749–766. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у розрахунках, підготовці графічних матеріалів і аналізі одержаних результатів.)* (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science.)

8. Yeliseyeva N. P., **Gorobets A. N.**, Katrich V. A., Nesterenko M. V. Radiation Fields of System of Two Impedance Crossed Vibrators Excited In-Phase and Placed over a Rectangular Screen // Progress In Electromagnetics Research B. 2017. Vol. 77, Issue 1. Article number 52503, P. 71–84. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у розрахунках і підготовці графічних матеріалів.)* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

9. Атрошенко Л. М., **Горобец А. Н.**, Горобец Н. Н., Данилова Т. Д., Елизаветин И. В., Жиличкин А. Г., Малюков В. М., Скрыльников Р. А., Тарасова П. Д. Результаты верификации данных, получаемых КА «Terrasar-X», с использованием наземных тест-объектов // Исследование Земли из космоса. 2017. № 4. С. 68–78. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у розробці тест-об'єктів і розробив конструкторську документацію до них.)* (Видання входить до наукометричної бази Science index.)

Наукові праці апробаційного характеру (тези доповідей на наукових конференціях) за темою дисертації:

10. Ратушная Е. С., **Горобец А. Н.**, Канивец К. П., Ковшов С. Б., Лебедев А. С., Малюков В. М. Размещение пассивных средств калибровки и валидации на подспутниковом полигоне «Скрипалі» // 11th Ukrainian Conference on Space Research, Aug. 29 – Sept. 2 2011. : abstr. Yevpatoria, 2011. Р. 88. *(Особистий внесок здобувача: розробив схему розміщення калібрувального приладдя.)*

11. Лебедев А. С., Горобец Н. Н., Кийко В. И., Атрошенко Л. М., **Горобец А. Н.**, Ковшов С. Б., Красногорский М. Г. Материалы для создания тестовых площадок оценки динамического диапазона РСА космического базирования. 1. Гофрированные материалы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов): материалы IX Всероссийской Открытой конференции, 14–18 нояб. 2011 г., Москва, 2011. С. 42. *(Особистий внесок здобувача: розробив креслення тестових майданчиків.)*

12. Онищенко А. А., Пивовар Е. А., **Горобец А. Н.**, Лебедев А. С. Современные технологии представления пространственной информации в процессе создания и эксплуатации новой техники наземной инфраструктуры космических исследований // 12th Ukrainian Conference on Space Research, 3–7 sept. 2012. : abstr. Yevpatoria, 2012. Р. 123. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у розрахунках і підготовці графічних матеріалів та їх аналізі.)*

13. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костриков А. Л., Красногорский М. Г., **Горобец А. Н.**, Лебедев А. С., Малюков В. М., Ратушная Е. С. Полигонно-калибровочный комплекс для РСА космического базирования // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 22-й Международной Крымской конференции, 10–14 сент. 2012 г., Севастополь, 2012. С. 1005–1006. *(Особистий внесок здобувача: брав активну*

участь в організації, експериментальних дослідженнях і роботі полігону.)
(Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

14. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костриков А. Л., Купко В. С., **Горобец А. Н.**, Мель И. А. Метрологические аспекты наземного обеспечения космического землеобзора // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія–2012): матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції, 9–11 жовт. 2012 р., Харків, 2012. С. 455–462. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в розрахунках і створив відповідні програмні скрипти.)*

15. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костяшкин С. И., Красногорский М. Г., **Горобец А. Н.**, Лебедев А. С., Малюков В. М., Ратушная Е. С. Летно-экспериментальные испытания полигонно-калибровочного комплекса подспутникового полигона Скрипалі // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов): материалы X Всероссийской Открытой конференции, 12–16 нояб. 2012 г., Москва, 2012. С. 145. *(Особистий внесок здобувача: брав активну участь в експериментальних випробуваннях полігону.)*

16. Лебедев А. С., Горобец Н. Н., Кийко В. И., Купко В. С., Красногорский М. Г., **Горобец А. Н.**, Мындарь И. Г. Распределенные метрологические средства для оценки УЭПР подстилающей поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов): материалы X Всероссийской Открытой конференции, 12–16 нояб. 2012 г., Москва, 2012. С. 147. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в супутніх теоретичних і експериментальних дослідженнях.)*

17. Лебедев А. С., Ковшов С. Б., Малюков В. М., **Горобец А. Н.** Материалы для создания тестовых площадок оценки динамического диапазона РСА космического базирования. 2. Материалы на основе набора металлических

сфер // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов): материалы X Всероссийской Открытой конференции, 12–16 нояб. 2012 г., Москва, 2012. С. 151. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в супутніх теоретичних і експериментальних дослідженнях.)*

18. Лебедев А. С., **Горобец А. Н.** Дополнения к программному обеспечению дешифрирования радиолокационных космических снимков для повышения надежности результатов испытаний РСА // 13th Ukrainian Conference on Space Research, 2–6 sept. 2013. : abstr. Yevpatoria, 2013. P. 200. *(Особистий внесок здобувача: запропонував методи обробки радіолокаційного зображення, створив необхідні програмні модулі, доповідав особисто.)*

19. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костриков А. Л., Красногорский М. Г., **Горобец А. Н.**, Лебедев А. С., Малюков В. М., Мель И. А. Использование объектов хозяйственного назначения для внешней калибровки РСА космического базирования // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 23-й Международной Крымской конференции, 8–14 сент. 2013 г., Севастополь, 2013. С. 1150–1151. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в теоретичних розрахунках і постановці експерименту.)* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

20. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Красногорский М. Г., Малюков В. М., **Горобец А. Н.** Начальный период внешней калибровки характеристик РСА МКА «Кондор - Э» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов): материалы XI Всероссийской Открытой конференции, 11–15 нояб. 2013 г., Москва, 2013. С. 163. *(Особистий внесок здобувача: брав активну участь в роботі полігону.)*

21. **Gorobets A.**, Yeliseyeva N., Gorobets M. Power and Polarization Patterns of a Circularly Polarized Four-Dipole Radiator with a Square Screen // MIKON'2014: Proceedings on CD of 20th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communications, 16–18 June, 2014. Gdansk, Poland, 2014. P. 589–591. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в розрахунках, створив усі графічні матеріали та робив доповідь особисто.)* (Видання входить до наукометричної бази Science index.)

22. Yeliseeva N. P., Gorobets N. N., **Gorobets A. N.**, Calculation of near field of dipole placed above rectangular screen // ICATT'2015: Proceedings on CD of X Anniversary International Conference of Antenna Theory and Techniques, 21–24 April, 2015. Kharkov, 2015. P. 102–104. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в розробці програмних рішень для розрахунків, підготував усі графічні матеріали та робив доповідь на конференції.)* (Видання входить до наукометричних баз Scopus, Web of Science та Science index.)

23. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Мирошниченко А. Ю., Мындарь И. Г., Онищенко А. А., Пивовар Е. А. Наземное обеспечение CAL/VAL PCA TERRASAR-X и KOMPSAT-5 // 15th Ukrainian Conference on Space Research, 24–28 aug. 2015. : abstr. Odessa, 2015. P. 183. *(Особистий внесок здобувача: брав активну участь в роботі полігону й обробці отриманих результатів.)*

24. **Горобец А. Н.**, Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н. Метод получения функции размытия с использованием сосредоточенных целей с известной эквивалентной апертурой // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов): материалы XIII Всероссийской Открытой конференции, 16–20 нояб. 2015 г., Москва, 2015. С. 23. *(Особистий внесок здобувача: запропонував новий підхід до обробки параметрів, що валідуються, створив необхідні програмні модулі, доповідав особисто.)*

25. **Горобець А. Н.** Характеристики контрольно-калибровочных полигонов для наземного обеспечения работы космических систем "Січ-2-1" и "Січ-2М" // 16th Ukrainian Conference on Space Research, 22–27 aug. 2016. : abstr. Odessa, 2016. P. 193.

26. **Горобець О. М.** Радіометричний аналіз якості радіолокаційного зображення // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія–2016): Х Міжнародна науково-технічна конференція, 5–7 жовт. 2016 р. : тези доп. Харків, 2016. С. 82.

27. **Gorobets A. N.**, Yelisseyeva N. P., Katrich V. A., Nesterenko M. V. Optimization of Circularly Polarized Radiation of Inphase Crossed Impedance Dipoles with Screen // ICATT'17: Proceedings on CD of XI International Conference on Antenna Theory and Techniques, 24–27 may, 2017. Kyiv, 2017. P. 270–272. (*Особистий внесок здобувача: брав участь у розрахунках і підготовці графічних матеріалів, робив доповідь особисто.*) (Видання входить до наукометричних баз Scopus, Web of Science та Science index.)

28. **Gorobets A. N.** Segmentation for Detecting Buildings in Infrared Space Images // ICATT'17: Proceedings on CD of XI International Conference on Antenna Theory and Techniques, 24–27 May, 2017. Kyiv, 2017. P. 364–366. (Видання входить до наукометричних баз Scopus, Web of Science та Science index.)

29. Yelisseyeva N. P., Katrich V. A., Nesterenko M. V., **Gorobets. A. N.** Synthesis of Circularly Polarized Radiation by Inphase Crossed Impedance Wire Dipoles with Screen // UKRCON: Proceedings on CD of 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, May 29 – June 2, 2017. Kyiv, 2017. P. 98–101. (*Особистий внесок здобувача: розробка програми, проведення розрахунків і підготовка графічних матеріалів, робив доповідь особисто.*) (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science.)

30. Атрошенко Л. М., Борщева Г. А., **Горобець А. Н.**, Горобець Н. Н., Костриков А. Л., Мель И. А., Ярмольчук Е. Д. Методы наземного обеспечения внешней калибровки сенсоров отечественных КС ДЗЗ // Вимірювальна та

Обчислювальна Техніка в Технологічних Процесах (ВОТТП-2017): матеріали 17-ї міжнародної науково-технічної конференції, 8–13 черв. 2017 р., Одеса, 2017. С. 29–30. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у розробці нових методів калібрування, запропонував нові підходи.)*

31. Yeliseyeva N. P., **Gorobets A. N.**, Katrich V. A., Pshenichnaya S. V. Directional and Polarization Characteristics of Crossed Impedance Wire Dipoles with Square Screen // UkrMiCo'2017: Proceedings on CD of International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, 11–15 Sept. 2017. Kyiv, 2017. P. 113–117. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у розробці програми розрахунків, обробці графічних матеріалів і їх аналізі.)* (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science.)

32. **Gorobets A. N.**, Gorobets N. N., Mahov E. S. Impedance Matching of Dipole Antennas by Metal Rod and Disk Placing // UWBUSIS'2018: Proceedings on Flash-drive of 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 04–07 Sept. 2018. Odessa, 2018. P. 357–361. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у проведенні експерименту, аналізі та підготовці матеріалів до публікації.)* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

33. Gorobets N. N., Bulgakova A. A., Lyashchenko V. A., **Gorobets A. N.**, Optimizing the Vibrator Antenna, Parallel to a Flat Screen, by the Maximum Directive Gain in the Normal Direction // UWBUSIS'2018: Proceedings on Flash-drive of 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 04–07 Sept. 2018. Odessa, P. 372–375. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в розрахунках, аналізі результатів і підготовці матеріалів до публікації.)* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

Наукові праці, які додатково відображають
наукові результати дисертації:

34. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костриков А. Л., Купко В. С., **Горобец А. Н.**, Требования, предъявляемые к контрольно-калибровочным комплексам для наземного обеспечения CalVal РСА космического базирования // Український метрологічний журнал. Харків, 2013. № 3. С. 46–52. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в експериментальному випробуванні полігону та формуванні вимог до нього.)*

35. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Купко В. С., **Горобец А. Н.**, Лебедев А. С., Малюков В. М. Критерии оценки результатов летных испытаний РСА космического базирования // Український метрологічний журнал. Харків, 2014. № 2. С. 28–34. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в роботі полігону, обробці й аналізі отриманих результатів.)*

36. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Мель И. А., Мындарь И. Г. Требования к точностным характеристикам установки метрологических средств для внешней калибровки РСА космического базирования // Український метрологічний журнал. Харків, 2014. № 2. С. 45–50. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в розрахунках і дослідженнях точності виготовлення та встановлення радіолокаційних відбивачів.)*

37. **Горобец А. Н.** Расширенный метод метрологической оценки разрешающей способности радиолокационного изображения // Український метрологічний журнал. Харків, 2017. № 3. С. 9–16.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	23
ВСТУП.....	24
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН І ЗАВДАННЯ ЗОВНІШНЬОГО КАЛІБРУВАННЯ РАДІОЛОКАТОРІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ	32
1.1 Основні поняття, концепції та параметри датчиків ДЗЗ космічного базування	35
1.2 Калібрування за наземними природними об'єктами та за допомогою антропогенних об'єктів господарського призначення	40
1.3 Калібрування за допомогою ретрансляторів	47
1.4 Висновки до розділу 1	51
РОЗДІЛ 2 РОЗШИРЕНИЙ МЕТОД МЕТРОЛОГІЧНОЇ ОЦІНКИ Й АТЕСТАЦІЇ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ЗОБРАЖЕНЬ	52
2.1 Попередня обробка вихідних даних.....	52
2.2 Визначення роздільної здатності РСА за радіолокаційним зображенням .	55
2.3 Радіометричні властивості радіолокаційного зображення	66
2.4 Висновки до розділу 2.....	87
РОЗДІЛ 3 ВИКОРИСТАННЯ БУДІВЕЛЬ ДЛЯ ЗОВНІШНЬОГО ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО КАЛІБРУВАННЯ РАДІОЛОКАТОРІВ, АЛГОРИТМ ПОШУКУ БУДІВЕЛЬ НА МОНОХРОМНИХ СУПУТНИКОВИХ ЗОБРАЖЕННЯХ	89
3.1 Геометрична прив'язка радіолокаційних знімків за допомогою об'єктів господарського призначення	90
3.2 Калібрування радіометричних характеристик РСА за допомогою типових покрівельних матеріалів	97

3.3 Алгоритм пошуку споруд на монохромних супутникових зображеннях	105
3.3.1 Попередня обробка зображень	107
3.3.2 Розмиття та визначення похідної зображення за координатами	110
3.3.3 Адаптивний фільтр.....	114
3.3.4 Визначення лінійних фрагментів контуру	122
3.3.5 Формування списку відрізків.....	126
3.3.6 Проріджування та сортування відрізків	130
3.3.7 Виявлення об'єктів з формою, характерною для споруд	133
3.3.8 Оцінка продуктивності методу	135
3.4 Висновки до розділу 3	138
РОЗДІЛ 4 ВИКОРИСТАННЯ РЕТРАНСЛЯТОРА ЗІ	
СЛАБКСПРЯМОВАНОЮ АНТЕНОЮ ДЛЯ ЗОВНІШНЬОГО	
КАЛІБРУВАННЯ РСА КОСМІЧНОГО БАЗУВАННЯ	140
4.1 Дослідження транспондерів для зовнішнього післястартового	
калібрування РСА космічного базування	140
4.2 Спосіб узгодження антени в заданій широкій смузі частот.....	147
4.3 Підвищення характеристик спрямованості слабкоспрямованих антен	
транспондера	154
4.4 Висновки до розділу 4.....	160
ВИСНОВКИ	162
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	165
ДОДАТОК А	181
ДОДАТОК Б	191

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ДЗЗ – дистанційне зондування Землі

ДС – діаграма спрямованості

ЕПР – ефективна площа розсіювання

КА – космічний апарат

ККК – контрольно-калібрувальний комплекс

КСД – коефіцієнт спрямованої дії

КСХ – коефіцієнт стоячої хвилі

КСХН – коефіцієнт стоячої хвилі за напруженістю

ПЕПР – питома ефективна площа розсіювання

РЛЗ – радіолокаційне зображення

РСА – радіолокатор з синтезованою апертурою (антени)

СКВ – середньоквадратичне відхилення

СЛАР – системи лінійних алгебраїчних рівнянь

ТКВ – тригранний кутниковий відбивач

у.о.я – умовні одиниці яскравості

у.л.о.я. – умовні логарифмічні одиниці яскравості

NEBN – Noise Equivalent Beta Naught (радіолокаційна яскравість шумового еквівалента)

RCS – Radar Cross-section (ефективна площа розсіювання)

RMSE – Root Mean Square Error (міра якості моделі)

RPC – Rational Polynomial Coefficients (поліноміальна модель)

SAR – Synthetic Aperture Radar (радіолокатор з синтезованою апертурою)

ВСТУП

Актуальність теми. В наш час багато зусиль світового наукового співтовариства вкладається у розвиток сфери дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Розвиток цієї області науки та технологій вкрай необхідний для забезпечення прийняття уповноваженими органами обґрунтованих рішень в таких сферах діяльності, як безпека й обороноздатність країни, надзвичайні ситуації (в тому числі пожежна безпека лісового господарства, повені, урагани, тощо), контроль стану врожаю та ще безлічі дуже важливих задач. Проте, за час експлуатації орбітальні засоби землеогляду піддаються значним впливам зовнішнього середовища, що призводить до суттєвих змін їх параметрів, в результаті чого вони потребують постійного дистанційного оцінювання (зовнішнього калібрування) характеристик. Розвиток необхідних для цього норм і засобів, зокрема для радіолокаційних космічних сенсорів, лише починається і тому вони слабо поширені. Відтак, орган, який приймає рішення державного рівня, не має можливості об'єктивно оцінити якість отриманих знімків. В той самий час, у сфері зовнішнього калібрування космічних сенсорів міжнародною спільнотою визнано як одне з ключових напрямків забезпечення простежуваності величини сигналу, отриманого від сенсора орбітального базування, до державних еталонів (і тим самим до одиниць СІ) – найважливішої складової метрологічного забезпечення ДЗЗ.

Відзначимо, що оптичні засоби ДЗЗ отримали більш значний розвиток методів зовнішнього післястартового калібрування (vicarious calibration). Імовірно це пов'язано з великою кількістю прикладних задач що ефективно розв'язуються як у комерційному секторі, так і в науковій сфері. Зокрема, у напрямку забезпечення простежуваності сигналів від космічних сенсорів оптичного та інфрачервоного діапазонів до метрологічної системи одиниць зроблено значний науковий внесок.

В свою чергу радіолокаційні засоби ДЗЗ дозволяють розв'язувати ширший спектр задач за рахунок незалежності від метеорологічних умов або

часу доби, і тому отримали значніший розвиток за останні роки. Нові методи використання даних ДЗЗ диктують більш жорсткі вимоги до якості його продукту, яка забезпечується не в останню чергу адекватним метрологічним супроводом зйомки, в тому числі необхідною періодичністю та точністю експлуатаційного калібрування датчиків ДЗЗ.

Таким чином, обрана тема дисертації є актуальною, бо передбачає розробку низки фізико-математичних і науково-технічних рішень, а також програмного забезпечення для найважливішої складової надійного метрологічного забезпечення – післястартового калібрування радіолокаторів космічного базування з синтезованою апертурою антени (РСА), а також розробку апаратних рішень у сфері малогабаритних антен для ретрансляторів зонduючого сигналу (як мобільних та ефективних пристроїв для зовнішнього калібрування РСА). Ці розробки дозволяють розв'язати низку нагальних задач зовнішнього калібрування РСА, а отже і задовільнити тим самим існуючий попит на засоби підвищення якості інформаційного продукту ДЗЗ й ефективності його використання, а саме – простежуваність величини сигналу, отриманого від сенсора орбітального розташування, з заданою невизначеністю до метрологічних величин.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження виконані у відповідності з поточними та перспективними планами наукової роботи Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за тематикою розвитку теорії та техніки в області прикладної електродинаміки та безпосередньо пов'язані з виконанням планових фундаментальних держбюджетних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України: «Оптимізація просторового розподілу поля поблизу пристроїв, які випромінюють електромагнітні хвилі» (державна реєстрація №0109U000537; 2009–2011 рр.), «Електромагнітні поля поблизу випромінюючих систем великих електричних розмірів» (державна реєстрація №0112U000545; 2012–2014 рр.), «Аналіз і синтез заданого просторового розподілу електромагнітного випромінювання антенних решіток на довільних

відстанях» (державна реєстрація №0116U000811; 2016–2018 рр.), а також НДР «Створення полігонно-калібрувального комплексу для наземного забезпечення космічної системи 710КС» (державна реєстрація №0110U004803; 2010–2012 рр.), яка була виконана кафедрою прикладної електродинаміки за господарським договором. Автор брав участь в даних НДР як виконавець і його науковий внесок відображено в дисертації.

Мета і завдання роботи. Метою дисертаційної роботи є розвиток методів зовнішнього післястартового калібрування радіолокаторів космічного базування з синтезованою апертурою антени як найважливішої складової забезпечення якості продукції космічного радіолокаційного землегляду. Досягнення цієї мети має підвищити якість калібрування та скоротити видатки на обслуговування радіолокаторів космічного базування в процесі експлуатації, насамперед, за рахунок розробки нових фізико-математичних, апаратних і програмних рішень. Виходячи з цілі роботи були поставлені наступні завдання:

1. Проаналізувати існуючі методи зовнішнього калібрування РСА, виявити їх недоліки та створити метод визначення роздільної здатності РСА за радіолокаційним зображенням у реальному масштабі часу.
2. Поєднати та систематизувати критерії оцінки радіометричних характеристик РСА за радіолокаційними зображеннями. Розробити алгоритм визначення критеріїв оцінки чутливості РСА та розробити математичну модель точкового відгуку на об'єкт, яка має забезпечити кращу точність визначення ефективної площі розсіювання (ЕПР) відбивача за його радіолокаційним зображенням.
3. Дослідити можливість використання для зовнішнього калібрування РСА наземних антропогенних об'єктів. Розробити програмні рішення для автоматизованого пошуку наземних об'єктів, придатних для зовнішнього калібрування РСА в процесі експлуатації.
4. Дослідити теоретично й експериментально антени типу диполь над екраном довільних розмірів у якості антени для калібрувального ретранслятора (транспондера) та визначити можливості покращення

узгодження такої антени з фідерним трактом і розширення її робочої смуги частот.

Об’єктом дослідження є: радіофізичні методи дистанційного зондування, оброблювані цифрові сигнали у вигляді специфікованих радіолокаційних та інфрачервоних зображень поверхні Землі зі спеціальним калібрувальним приладдям або з антропогенними спорудами, поля і хвилі у відкритій системі транспондера, їх дифракція й інтерференція.

Предметом дослідження є: фізичні явища в радіолокації, зокрема при зовнішньому калібруванні РСА; нові підходи щодо обробки цифрових сигналів, а саме, пошук наземних споруд, придатних для калібрування космічних РСА; залежність характеристик спрямованості й узгодження антени типу диполь над екраном від її електричних розмірів і конфігурації.

Методи досліджень.

1. Методи прикладної електродинаміки, зокрема метод геометричної теорії дифракції, використано для дослідження антен калібрувального ретранслятора.
2. Методи теорії імовірностей і статистичної радіофізики використані при розробці нових методів калібрування РСА космічного базування.
3. Методи обчислювальної математики використані при розробці математичних моделей, що є невід’ємними компонентами запропонованих способів зовнішнього калібрування.
4. Методи експериментальних досліджень – використані при обробці цифрових зображень, при налагодженні програмного забезпечення запропонованих методів і для дослідження узгодження антени типу диполь над екраном, шляхом розміщення металевих неоднорідностей у ближній зоні антени.

Наукова новизна отриманих результатів. В дисертації отримані нові результати, які відносяться до загальних і окремих фізико-математичних моделей, що використовуються для обробки зображень земної поверхні,

валідації та калібруванні РСА та загалом в радіофізиці. В роботі отримані наступні наукові результати.

1. Уперше встановлена залежність ширини відгуку на точковий об'єкт (кількість пікселів) від ширини апертури використовуваного для калібрування РСА відбивача та запропонований новий метод визначення роздільної здатності РСА космічного базування, що дозволяє використання тригранних кутникових відбивачів різного розміру на основі операції зворотного матричного згортання. За результатами проведених вимірювань цей метод забезпечує в середньому на 15 % меншу невизначеність типу А ніж найбільш поширений з відомих методів.
2. Удосконалено математичну модель залежності яскравості зображення відбивача на радіолокаційному зображенні (РЛЗ) від ЕПР еталонних відбивачів, що розташовані на підстильній поверхні, та розроблено метод визначення передатної функції РСА на основі аналізу більше 100 радіолокаційних зображень відбивачів, який дозволяє суттєво підвищити точність визначення ЕПР об'єкта за його яскравістю у верхній і нижній частинах динамічного діапазону РСА.
3. Дістав подальший розвиток розв'язок задачі виявлення антропогенних об'єктів на монохромних знімках Землі. Розроблений алгоритм не потребує чіткої специфікації форми або тренувального набору даних. Метод призначений для пошуку антропогенних об'єктів, що можуть бути використані для калібрування чутливості РСА. Даний підхід дозволяє підвищити точність визначення ЕПР в нижній частині динамічного діапазону РСА за рахунок використання великої кількості тест-об'єктів.
4. Уперше для розв'язання задачі створення високоефективного "точкового" наземного відбивача для наземних еталонних полігонів запропоновано активний радіолокаційний відповідач-ретранслятор (транспондер) зі слабкоспрямованими приймальною і передавальною антенами та мікрохвильовими підсилювачами з високим коефіцієнтом підсилення.

Така антена дозволяє зменшити невизначеність вимірювань, зумовлену похибками кутового положення антени ретранслятора. Працездатність транспондера підтверджено в прямому наземно-космічному експерименті з РСА КА «TerraSar-X». Запропоновано та теоретично й експериментально доведено можливість розширення смуги робочих частот вібраторної антени, розміщеної паралельно плоскому екрану, шляхом введення між вібратором і екраном стрижневих або дискових неоднорідностей.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що: Розроблені два новітніх методи вимірювання роздільної здатності та радіометричних характеристик РСА космічного базування дозволяють використовувати для визначення роздільної здатності та динамічного діапазону сенсора одні й ті самі тригранні кутникові відбивачі, що призводить до підвищення загальної точності калібрування РСА. Розроблена низка програмних модулів, в яких реалізовані ці методи, спрощує використання зображень для калібрування радіолокаторів космічного базування, а для кінцевого споживача – спрощує вибір сенсора та режиму його роботи для виконання конкретного тематичного завдання.

Запропонована й апробована можливість зовнішнього калібрування РСА за допомогою наземних антропогенних споруд і дослідження їх типових конструктивів дозволяє зменшити видатки на калібрування та валідацію РСА космічного базування. Розроблений алгоритм пошуку об'єктів на монохромних знімках земної поверхні з формою, характерною для антропогенних споруд, дозволяє в реальному масштабі часу визначити об'єкти, які можуть бути придатні для зовнішнього калібрування РСА. Цей новий підхід у розпізнаванні образів може бути застосований в інших сферах науки та техніки (розпізнавання дорожніх знаків, класифікація патогенних мікроорганізмів, тощо), окрім дистанційного зондування.

Розроблений та експериментально досліджений транспондер може бути використаний не тільки для зовнішнього калібрування РСА, але і як мобільний

репер, а запропонована концепція врахування зворотного зв'язку між приймальною та передавальною антенами може бути ефективною для розробки аналогічних пристроїв у інших частотних діапазонах. Розроблена компактна широкосмугова антена перспективна для використання у мобільних системах зв'язку.

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно розроблено новітні методи й алгоритми визначення характеристик радіолокатора космічного базування за знімками земної поверхні, а також алгоритм пошуку антропогенних об'єктів.

Участь автора в спільних роботах, що стосуються експериментальних результатів, полягає в тому, що він запропонував спосіб обчислення азимуту сліду траси космічного апарата на підстильній поверхні та відповідний спосіб побудови схеми розміщення метрологічних пристроїв (відбивачів, тощо), брав безпосередню участь у підготовці та проведенні експериментів в безлунній камері та польових (космічних) експериментів, розробив механічні вузли для регулювання положення відбивачів і відповідну конструкторську документацію, а також брав участь в розробці математичного та програмного забезпечення польових експериментів.

Участь автора в сумісних роботах, що стосуються теоретичних досліджень, полягає в тому, що він брав активну участь в математичному моделюванні при розробці антени, розрахунках і аналізі отриманих результатів, а також представляв роботи особисто на вітчизняних і зарубіжних наукових конференціях (9 доповідей).

Апробація результатів дисертації. Наукові результати та основні положення дисертації були представлені й опубліковані в матеріалах наступних конференцій:

- Ukrainian Conference on Space Research. Yevpatoria/Odessa, 2011, 2012, 2013, 2015, 2016.
- Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 2011, 2012, 2013, 2015 гг.

- Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Севастополь, 2012, 2013 гг.
- Міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка». Харків, 2012, 2016 pp.
- 20th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communications (MIKON'2014). 16–18 June, Gdansk, Poland, 2014.
- Anniversary International Conference of Antenna Theory and Techniques (ICATT). Kharkiv, 2015, 2017.
- IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). Kyiv, May 29 – June 2, 2017.
- 17-та міжнародна науково-технічна конференція “Вимірювальна та Обчислювальна Техніка в Технологічних Процесах (ВОТТП-2017)”. Одеса, 8–13 червня 2017 р.
- International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2017). Kyiv, September 11–15, 2017.

Публікації. Матеріали дисертації опубліковано в 37 наукових працях, серед яких 5 статей у наукових фахових виданнях України, 4 у зарубіжних виданнях (в тому числі з них 2 англійською мовою), 24 тези доповідей на фахових вітчизняних і міжнародних конференціях та 4 статті в інших наукових журналах, які додатково відображають наукові результати. З наведених робіт 15 входять до наукометричних баз, зокрема Scopus, Web of Science та Science index (ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3582-3659>). Робота виконана самостійно та не містить плагіату.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 191 сторінку, з них основного тексту – 143 сторінки. Дисертація містить 13 таблиць і 37 рисунків. Список використаних джерел розташований на 16 аркушах і нараховує 122 джерела.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН І ЗАВДАННЯ ЗОВНІШНЬОГО КАЛІБРУВАННЯ РАДІОЛОКАТОРІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

В останні десятиліття все більшого розвитку отримують технології дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), особливо космічний землегляд. У той самий час попит накладає свої вимоги не тільки на вартість і періодичність знімання, але й на якість продукції космічного землегляду. У ряді програм важливою вимогою є прив'язка яскравості на зображенні до відповідної метрологічної характеристики апаратури ДЗЗ. Ця задача відома як: забезпечення простежуваності (traceability) сигналу сенсора до міжнародної метрологічної системи одиниць СІ. Вона важлива для продукції ДЗЗ всіх діапазонів електромагнітних хвиль, однак серед них найбільш перспективними за цілою низкою ознак можна вважати космічні знімки в радіодіапазоні.

Що до метрологічного забезпечення таких продуктів землегляду відзначимо, що калібрування сенсора поділяють на передстартове (виробниче) та післястартове (експлуатаційне). Післястартове калібрування, в свою чергу, поділяють на внутрішнє та зовнішнє. Внутрішнє калібрування здійснюють шляхом порівняння амплітуди прийнятого сигналу з амплітудами відомих рівнів сигналів від вбудованих в радіолокатор каліброваних генераторів шуму, що безумовно є необхідним, але не забезпечує всієї потрібної інформації. Та, якщо виробниче калібрування передбачає, що і пристрій, який калібрується, і робочий еталон знаходиться в лабораторії, то зовнішнє експлуатаційне калібрування (vicarious calibration) відбувається безпосередньо під час експлуатації, тобто, коли сенсор знаходиться на орбіті, а робочі еталони можуть перебувати на поверхні Землі, яка знімається. Крім того, лабораторне калібрування регламентується методиками та стандартами підприємства-

виробника, в той час, як при зовнішньому експлуатаційному калібруванні, на даний час не використовуються ніякі стандарти.

Важливу роль у розвитку технологій невійськового призначення, пов'язаних з ДЗЗ, грає міжнародна некомерційна організація GEO (Group on Earth Observations). Ця організація являє собою співдружність більше ніж ста урядових і комерційних організацій по всьому світу, пов'язаних тим чи іншим чином з ДЗЗ [1]. Як свого роду майданчик для обміну досвідом і напрацюваннями, GEO розділена на ряд організацій в залежності від напрямку, що розвивається ними (рис. 1.1). Так, підрозділ, що відповідає за космічний землегляд, називається CEOS (Committee on Earth Observation Satellites). Даний комітет, в свою чергу, розділений на групи за областями виконуваних завдань [2]. Таким чином було створено робочу групу з калібрування та валідації WGCV (Working Group on Calibration and Validation). Відзначимо, що важливою частиною цього напрямку є Cal/Val портал, на якому публікуються різноманітні документи, пов'язані із зовнішнім калібруванням [3]. Так, наприклад, існує ряд документів, що стосуються зовнішнього калібрування оптичних систем космічного базування, які взаємопов'язані між собою. Найбільш повний комплект рекомендацій та інших документів за цим напрямком опубліковано на окремому ресурсі робочої групи QA4EO (Quality Assurance Framework for Earth Observation). Головний вид діяльності цієї робочої групи – розв'язання задач, які пов'язані з забезпеченням якості кінцевої продукції ДЗЗ, в тому числі – зовнішнє калібрування оптичних систем. Згідно опублікованому робочому плану [4], одним з ключових напрямків є забезпечення простежуваності величини сигналу, отриманого від сенсора орбітального базування, до державних еталонів (і тим самим до одиниць СІ) – найважливішої складової метрологічного забезпечення ДЗЗ.

Відзначимо, що оптичні засоби ДЗЗ отримали більш значний розвиток методів зовнішнього післястартового калібрування. Імовірно це пов'язано з великою кількістю прикладних задач, що ефективно розв'язуються як у комерційному секторі, так і в науковій сфері. Зокрема, у напрямку забезпечення

простежуваності сигналів від космічних сенсорів оптичного діапазону до метрологічної системи одиниць зроблено значний науковий внесок [5].

Відзначимо, що всі документи, представлені цими організаціями, як правило, поширюються у якості так званих good practices, або, інакше кажучи, носять виключно рекомендаційний характер. Крім того, якщо з питань зовнішнього калібрування оптичних систем накопичена чимала кількість таких документів, то з калібрування РСА їх практично немає. Є лише короткі згадки в деяких загальних документах, так, наприклад, CEOS рекомендує проводити зовнішнє калібрування РСА шляхом використання не менше трьох транспондерів з періодичністю близько 35 днів (один орбітальний цикл) [6].

З огляду на те, що інтерес до калібрування радіолокаторів у всесвітній організації GEO поки не отримав належного розвитку, необхідно звернутися до більш конкретних розробок і досліджень. У якості прикладу калібрування РСА з використанням як тригранних кутникових відбивачів, так і ретрансляторів (транспондерів) для калібрування РСА можна звернутися до [7]. Однак найбільш чітко та змістовно метод зовнішнього калібрування для РСА наведено в роботі [8], яка і послужила основою для розробки нових підходів.

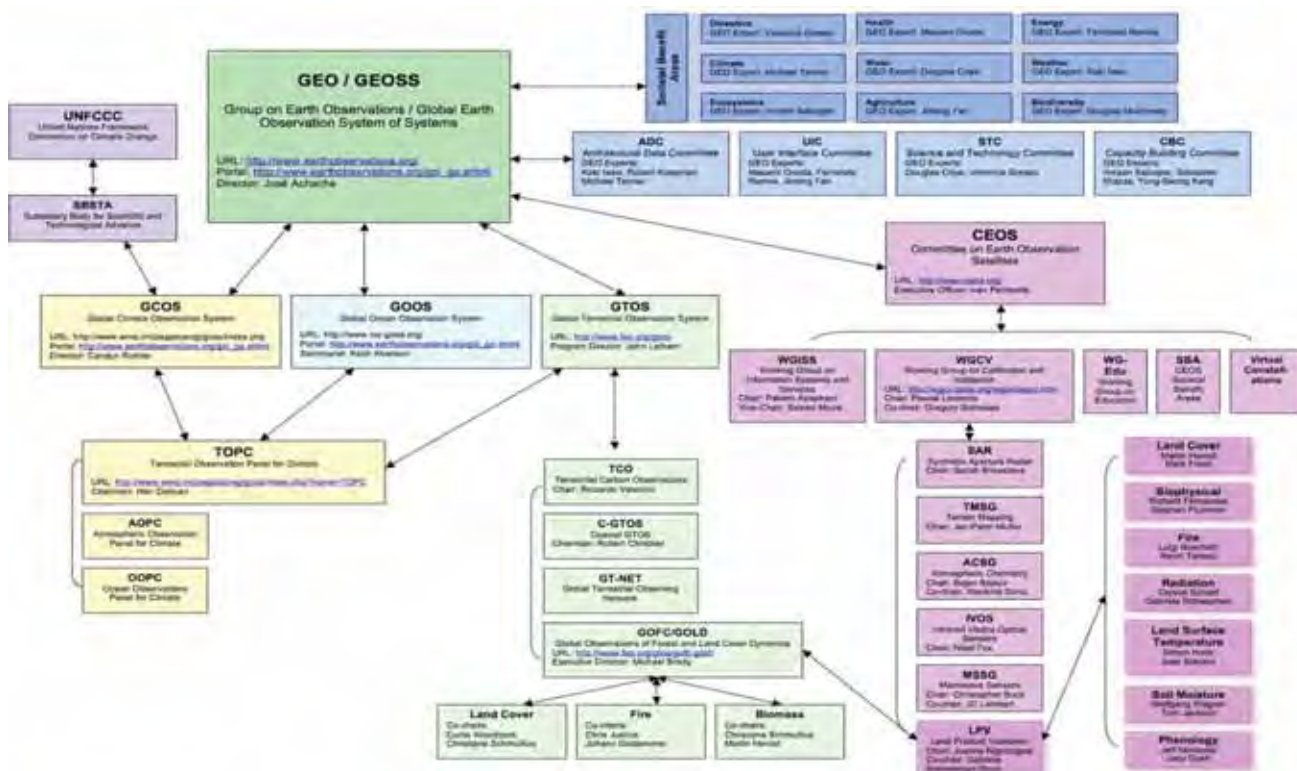


Рис. 1.1 Структура взаємозв'язків підрозділів організації GEO

1.1 Основні поняття, концепції та параметри датчиків ДЗЗ космічного базування

У порівнянні з оптичними системами ДЗЗ радіолокатор з синтезованою апертурою має ряд істотних особливостей. Так, наприклад, якщо в оптичній системі ДЗЗ яскравість пікселя на зображенні визначена в основному альбедо об'єкта, що знімається, то в радіодіапазоні величина яскравості обумовлена ефективною поверхнею розсіяння (ЕПР). ЕПР – це площа деякої уявної плоскості поверхні, розташованої нормально до напрямку падаючої плоскості хвилі, яка до того ж є ідеальним ізотропним перевипромінювачем. Цей випромінювач задовольняє такій умові: коли він розміщується в точці розташування об'єкта, в місці розташування антени радіолокаційної станції створюється така ж густина потоку потужності електромагнітного поля, що й від реального об'єкта [9]. Ця величина вимірюється в квадратних метрах і залежить від форми та поверхневої провідності об'єкта, що відбиває сигнал, а також від довжини хвилі зонduючого сигналу. Цей параметр був вперше введений в радіолокації, проте в контексті простежуваності цієї величини до системи СІ відзначимо, що металева куля із ідеальною провідністю з екваторіальною площею поперечного перерізу в 1 м^2 має ЕПР відповідно 1 м^2 за умови, що довжина хвилі зонduючого сигналу значно менша за радіус кулі [10].

На практиці, як правило, з метою забезпечення максимальної інформативності радіолокаційні системи мають нелінійну передатну функцію. Тому в ДЗЗ часто ЕПР вимірюється в децибелах, що співвідноситься з квадратними метрами в такий спосіб [10]:

$$\sigma_m[dB] = 10 \lg \frac{\sigma_m [\text{м}^2]}{1\text{ м}^2}, \quad (1.1)$$

де σ_m – ЕПР об'єкта в максимумі діаграми зворотного розсіяння.

Існує два найбільш вживаних інструмента для зовнішнього експлуатаційного калібрування – це активні ретранслятори (транспондери) та пасивні відбивачі [11]. Одним з найбільш часто використовуваних типів

відбивачів є тригранні кутникові відбивачі з трикутними гранями. Тригранні відбивачі як такі, забезпечують досить високі значення ЕПР при відносно невеликих розмірах еквівалентної апертури. А трикутні грані таких відбивачів, в свою чергу обумовлюють широкий (пологий) максимум індикатриси зворотного розсіювання, що дозволяє зменшити вимоги до точності орієнтування такого відбивача при незмінно високій точності значення ЕПР. Відома залежність між розміром тригранного кутникового відбивача з трикутними гранями та його ЕПР в максимумі індикатриси зворотного розсіювання, описана в [10]. Ця залежність має вигляд:

$$\sigma_m = \frac{4\pi a^4}{3\lambda^2}, \quad (1.2)$$

де λ – довжина робочої хвилі радіолокатора, a – довжина грані відбивача. Тут мається на увазі, що відбивач складається з трьох однакових рівнобедрених трикутників, суміщених катетами, причому довжина грані відбивача і є довжиною катетів відповідних трикутників.

Щодо характеристик якості радіолокаційних зображень (РЛЗ), на основі яких кінцевий споживач може вибрати режим необхідної зйомки, – це просторова роздільна здатність і радіометричні властивості радіозображення.

Роздільна здатність трактується як здатність приладів розрізняти дуже близькі в просторі, в часі або за фізичними властивостями об'єкти або процеси, та як мінімальне значення відмінностей, які виявляються фізичним приладом в однорідних явищах [12]. На практиці роздільна здатність, як правило, визначається додатково для конкретного кола завдань.

Для оптичних систем роздільну здатність в процесі зовнішнього калібрування вимірюють за допомогою двох еталонних об'єктів, розташованих на поверхні, що знімається, шляхом зміни відстані між ними. Мінімальна відстань, на якій об'єкти на знімку розрізняються, і вважається роздільною здатністю (за Релеєм) [13]. У радіолокації такий метод зазвичай не практикують, тому що завдяки інтерференції полів від близько розташованих відбивачів їх зображення на знімку сильно відрізняються від випадку до

випадку. Навіть за умови великої вибірки на одному знімку конкретна величина традиційної роздільної здатності носитиме статистичний характер. Тому при оцінюванні роздільної здатності сенсора за РЛЗ, як правило, оцінюють ширину відгуку на точкову ціль [8] за рівнем 0,707 від максимального рівня сигналу. При цьому ширина відгуку визначається в пікселях для центрального рядка та центрального стовпчика зображення відгуку, а після цього отримані значення перетворюють в метри в такий спосіб:

$$\rho_Y = \frac{L_R M_R}{\sin \gamma}, \quad (1.3a)$$

$$\rho_X = L_X M_X. \quad (1.3b)$$

тут ρ_Y – роздільна здатність за поперечної дальності на місцевості в метрах, ρ_X – роздільна здатність в метрах уздовж сліду траси космічного апарату (КА), L_R – ширина відгуку в пікселях за каналом лінійної частотної модуляції, L_X – ширина відгуку в пікселях за каналом синтезування, M_R , M_X – масштаби (розміри пікселя) за похилою дальністю та в напрямку руху КА відповідно, γ – кут падіння радіохвиль на підстильну поверхню (від горизонту).

Однак варто зазначити, що спроби оцінити роздільну здатність РСА способом, традиційним для оптичних сенсорів, робилися. Так, за даними польового експерименту в роботі [14] вдалося визначити роздільну здатність РСА KOMPSAT-5 за Релеєм між 2 та 3 метрами, в той час як ширина відгуку на точкову ціль склала 0,9 і 1,21 метра за азимутом і дальністю відповідно.

Розглянемо далі калібрування РСА за радіометричними властивостями. Метою пошуку радіометричних параметрів РЛЗ є можливість визначення за знімком ЕПР цілі (для умовно точкових цілей) або ж питомої ЕПР (ПЕПР) для розподілених цілей. Відзначимо, що деякі сучасні дослідження в цій області вказують на недостатність такого підходу [11]. В першу чергу це пов'язано з тим, що значення ЕПР для будь-якого реального об'єкту залежить від частоти зонduючого сигналу, а при скануванні місцевості за допомогою РСА, як правило, використовується частотна модуляція з подальшим фазовим кодуванням. Це ускладнює визначення смуги робочих частот зонduючого

сигналу. Крім того, азимутальні лінії пікселів (рядки) зазвичай формуються шляхом частотного "сканування" променем [8] а це, в свою чергу, означає, що одна й та ж ціль може мати різні рівні відгуку у випадках розташування на протилежних краях знімка. Більш того, і самі еталонні цілі складно реалізувати, оскільки розрахунок тих же тригранних кутникових відбивачів виконується за формулами, отриманими з оптичного наближення, а врахування дифракційних ефектів вимагає додаткових теоретичних і експериментальних досліджень. У подібних експериментах зазвичай використовується гармонійний сигнал, тому навіть невелика невизначеність спектра скануючого сигналу РСА може привести до суттєвих похибок при визначенні ЕПР за зображенням за рахунок дифракції електромагнітної хвилі на елементах відбивача.

Але, незважаючи на зазначене вище, в даний час найбільш традиційним і тому найбільш практичним параметром, який дозволяє описати радіолокаційну яскравість цілі, є ЕПР. На додаток відзначимо, що крім зовнішнього експлуатаційного калібрування існує цілий ряд джерел даних про похибки вимірювальних вузлів радіолокатора. Так, наприклад, згідно з метаданими знімків з експерименту [15], РЛЗ може бути позначений як «радіометрично відкалібрований», навіть якщо натурних вимірювань з еталонними цілями проведено не було. При цьому для компенсації спотворень використовують дані бортового обладнання, накопичену статистику, тощо. Більш того, в роботі [11] вказано, що етапу радіометричного калібрування передують радіометрична нормалізація, яка включає до себе: врахування параметрів діаграми спрямованості антени, корекцію теплового дрейфу підсилювача, оцінку відмінності поляризацій випроміненого та прийнятого сигналів, атмосферну корекцію, а також врахування спотворення частоти відбитого сигналу та зміщення в просторі скануючих променів антени.

Таким чином, процедура зовнішнього радіометричного калібрування РСА полягає в точному визначенні залежності яскравості на знімку від реальної ЕПР цілі. Необхідний для цього набір параметрів у найбільш загальному випадку включає до себе щонайменше чутливість (нижню межу динамічного діапазону

РСА), рівень насичення (верхню межу динамічного діапазону РСА) та параметри математичної моделі для обрахунку ЕПР із яскравості (зазвичай ця модель квазілінійна).

Зауважимо, що деякі оператори надають кінцевому користувачеві знімок у двох варіантах: з оптимізацією за роздільною здатністю (spatially enhanced) і оптимізацією за радіометричними характеристиками (radiometrically enhanced) [16].

Однак відкритим залишається питання: як сформувати чіткі критерії, що вказують на радіометричні якості РЛЗ і дають можливість порівнювати між собою характеристики різних сенсорів. Роботи у цій галузі рясніють поняттями, що частково перекриваються від «параметрів передавальної функції» до «прямої ідеального реагування» [14, 17, 18]. Далі будуть запропоновані розроблені нами методи для визначення декількох числових параметрів, які забезпечують найбільш повне визначення характеристик РЛЗ у процесі експлуатаційного калібрування.

Також актуальна задача геометричної корекції знімків. Зокрема, в оптичних системах спотворення викликані неточностями виготовлення самого сенсора, а також перепадами висоти поверхні, що знімається. Тут мається на увазі, що корекція форми геоїда для коректної інтерпретації даних на площині вже здійснена. Корекція знімків за двома відомими джерелами похибок, що лишилися, виконується з використанням так званої RPC-моделі (Rational Polynomial Coefficients) для корекції спотворень, що вносяться апаратними засобами, а також з використанням цифрової моделі рельєфу даної місцевості для корекції перепадів висот [19]. Таким чином, якісний вихідний продукт (знімок) ДЗЗ передбачає, що кінцевий споживач буде працювати з ортофотознімками, на яких форма контурів всіх об'єктів відповідає виду зверху, а сам знімок придатний для подальшої побудови ортофотоплану та точних карт. Однак на практиці похибка геометричної прив'язки об'єктів на місцевості до координатної сітки може становити аж до декількох десятків метрів, що для ряду завдань неприйнятно.

Для підвищення точності таких сенсорів (і їх моделей), а також у ряді випадків для уточнення цифрової моделі рельєфу конкретної місцевості використовують наземні точки прив'язки, відомі також як GCP (Ground Control Points). Такі точки являють собою добре помітні на знімку об'єкти, для яких заздалегідь відомі геодезичні координати з більш високою точністю. До питання про точність вимірювання координат відзначимо, що об'єкти, положення яких були виміряні з високою точністю (близько десятка сантиметрів), зазвичай також називають реперами. Для оптичних знімків це може бути кут перехрестя або будівлі, в той час як для РЛЗ складніше виконати вимоги до розміру та яскравості об'єкта на знімку. Відзначимо, що також всебічно й детально розглядається питання про кількість реперів, необхідну для точного геодезичного прив'язування знімків [20]. Нижче нами запропоновано підхід для використання металевих об'єктів господарського призначення у якості реперів.

1.2 Калібрування за наземними природними об'єктами та за допомогою антропогенних об'єктів господарського призначення

Зовнішнє калібрування (vicarious calibration) космічних сенсорів після запуску носія є найважливішим завданням, тому в даний час активно розробляються методи їх калібрування в період експлуатації КА. Велика увага приділяється інструментальному польотному калібруванню шляхом відповідного розташування спеціально виготовлених еталонів на певній ділянці поверхні Землі (наземному полігоні ДЗЗ) та їх подальшій космічній зйомці. Однак, організація великої кількості калібрувальних засобів і реперів, необхідної для підвищення якості кінцевого продукту ДЗЗ, пов'язана з великими матеріальними витратами й організаційними труднощами (відводи земель, кваліфікація кадрів, узгодження та синхронізація етапів роботи та ін.).

У той самий час деякі завдання зовнішнього калібрування цілком можна виконати, використовуючи специфічні природні об'єкти. Для досягнення цієї

мети були створені спеціалізовані калібрувальні полігони для оптичних сенсорів, розташовані поблизу особливих природних об'єктів, таких як сольові лимани, що пересихають [2]. Велика площа земної поверхні природним чином покрита складом з високим вмістом кристалів солі, має високий альbedo, що вельми зручно для калібрування оптичних систем. Крім того, великі площі дозволяють сформувати велику вибірку вимірювань навіть для сенсорів з низькою роздільною здатністю та великим розміром пікселя, а проведені на Землі квазісинхронні вимірювання відбивних характеристик поверхні забезпечують прийнятну для практики точність. Такий підхід – свого роду компроміс між точністю та вартістю робіт по зовнішньому калібруванню оптичних сенсорів.

Аналогічно у радіодіапазоні відомі методи зовнішнього калібрування з використанням лісів в басейні ріки Амазонки [21], а також з використанням океанічної поверхні [22]. При оцінюванні роздільної здатності за матеріалами поточної зйомки часто використовують кордон двох типів підстильної поверхні (шосе, просіки, межа море-суша) [8]. Звісно, такі методи не дозволяють досягти точності зовнішнього калібрування за еталонними цілями. До того ж недолік подібних методів калібрування радіометричних характеристик РСА полягає у тому, що вони дозволяють калібрувати тільки нижню частину динамічного діапазону (близько 0 дБ і нижче). Верхня межа динамічного діапазону (насичення приймача РСА), як правило, знаходиться набагато вище 40÷50 дБ завдяки тому, що радіолокатор, зазвичай, сконструйований так, щоб розрізняти ЕПР металевих об'єктів, тому для повного калібрування динамічного діапазону, використовують відбивачі або ретранслятори, призначені суто для калібрування. Відзначимо, що конструювання та виготовлення таких пристроїв є досить дорогим, тому нижче буде розглянута можливість мінімізації витрат на післястартове калібрування.

Щодо калібрування за антропогенними об'єктами, слід зазначити, що цей напрямок теж представлено низкою робіт. Так, існує тенденція (див., наприклад, [23–25]) використання в якості реперів і експлуатаційних

калібрувальних засобів відбивачів параболічних антен наземного базування різного призначення з діаметром дзеркал $25 \div 100$ м та інших типів антен [25]. Крім того, в роботі [26] окрім методів розрахунку характеристик розсіяння об'єктів складної форми розглянуті відбивні характеристики деяких наземних і повітряних об'єктів військової техніки. Такі об'єкти можуть бути використані для калібрування РСА, хоча очевидно, ці роботи були проведені з іншою метою.

Особливий інтерес для зовнішнього калібрування, особливо в плані геометричної корекції знімків, представляють типові металеві будівлі: водонапірні башти, цистерни, опори ліній електропередач. Як правило, на густонаселених територіях таких об'єктів в рамках сцени РЛЗ налічується значна кількість (до 50–55 одиниць і більше), що відповідає найвищим вимогам до кількості реперів навіть в місцевостях з дуже складним рельєфом. В роботі [27] представлені результати вимірювань в безлунній камері, а також розраховані на основі методу електродинамічної подібності ефективні площі розсіяння моделей металевих наземних об'єктів господарського призначення, що використовуються в якості реперів в період експлуатації РСА космічного базування. Досліджено залежність ЕПР від кута ковзання, виду поляризації зондуючого сигналу й азимуту локації. Показано, що об'єкти, моделі яких досліджені, можуть використовуватися не тільки для геометричної корекції знімків, але і для зовнішнього експлуатаційного (польотного) калібрування апаратури РСА.

Також існує напрямок, що припускає калібрування за менш специфічними будівлями, де високі значення ЕПР можуть бути отримані не за рахунок використання металу при виготовленні об'єктів, а за рахунок наявності регулярної структури. Наприклад, в [27] показана можливість використання для зовнішнього радіометричного калібрування РСА шиферних дахів будівель. Аналогічний підхід може бути розширений на будь-який тип покрівельних матеріалів з регулярною структурою. Однак для розв'язання цієї задачі виникає актуальне завдання швидкого пошуку всіх будівель на знімку. Запропонована

далі концепція передбачає зйомку однієї сцени з різних ракурсів з подальшим виділенням всіх антропогенних об'єктів. Ті з них, які мають рівномірну яскравість за всіма ракурсами, можуть бути відібрані в якості робочих еталонів для калібрування з подальшим виїздом робочої групи на місцевість для документування необхідних параметрів цих об'єктів. Таким чином, ключову роль для реалізації такої концепції грає алгоритм швидкого виділення будівель за знімками земної поверхні, який повертає максимальну кількість гіпотез (можливих будівель).

Розпізнавання та класифікація образів в широкому сенсі на цей час є досить добре розвиненим напрямом наукових досліджень. В роботі [28] наведені основні принципи та деякі алгоритми, що використовуються для тематичної обробки багатоспектральних знімків Землі. Хоча радіолокаційні зображення і не є багатоспектральними, розглянуті в монографії [28] методи можуть бути розширені для РЛЗ, оскільки ці методи кластеризації та розпізнавання оперують простором ознак. При такому підході основна складність полягала б в пошуку та виділенні характерних ознак на монохромному зображенні, на основі яких можна здійснювати аналіз образів.

У свою чергу, сучасні технології ДЗЗ постійно вимагають розробки все більш досконалих алгоритмів виявлення антропогенних об'єктів на супутникових знімках. У більшості випадків найбільш продуктивний алгоритм розв'язання задачі заснований на нейронних мережах. Однак, цей спосіб має деякі обмеження, особливо при великому об'ємі оброблюваних даних. Тому до теперішнього часу розроблено кілька способів скорочення об'єму вхідних даних. У випадку монохромних знімків ДЗЗ більша частина інформації про будь-який об'єкт міститься в формі його контуру. Існує ряд алгоритмів виявлення меж об'єкта, серед яких найбільш популярним є детектор кордонів Канні [29]. Як і інші методи, він вимагає вибору порогів бінаризації, що на практиці означає участь оператора в обробці кожного зображення.

Основні типи монохромних продуктів ДЗЗ – радіолокаційні зображення, знімки в інфрачервоному діапазоні й оптичні в панхроматичному режимі.

Найбільш інформативними та перспективними є радіолокаційні зображення, отримані радіолокаторами з синтезованою апертурою, зокрема завдяки можливості побудови тривимірної моделі рельєфу [30]. Їх особливі властивості стали основою для розробки ряду методів виконання завдань, специфічних для РСА, заснованих на вивченні поля фрактальних розмірностей. До таких завдань відносяться визначення характеристик льодового покриву, картографування океанічних течій, пошук мілин та ін. Ці методи докладно розглянуті в [31]. Однак застосування поля фрактальних розмірностей для пошуку будівель навряд чи виявиться досить ефективним тому, що відповідно до запропонованої концепції передбачається виділяти всі будівлі на зображенні незалежно від матеріалу даху та характеру неоднорідностей на ній. Таким чином, єдиним загальним критерієм для всіх будівель є особливості форми контуру.

Розглянемо далі програмні рішення для виявлення будівель на супутникових знімках Землі інших діапазонів електромагнітних хвиль. Розв'язанню цієї задачі присвячено велику кількість робіт, проте всі розроблені методи можна розділити на шість напрямків: пошук граней на стереозображенні [32]; визначення специфічних критеріїв, отриманих із статистичних властивостей градієнтів зображення об'єкта (HOG-дескриптори [33]) або отриманих із особливих точок (SIFT-дескриптори [34]); корекція гіпотез, заснованих на спектральних властивостях об'єктів [35,36]; виявлення кутових точок із подальшим уточненням контурів [37] і пошук прямих країв об'єкта з формуванням гіпотез на їх основі [38].

У найсучасніших ефективних методах використовується кілька описаних критеріїв з подальшим зважуванням [39], проте монохромне монозображення не дозволяє використовувати більшу їх частину для виявлення будівель. Крім того, в більшості наведених робіт відзначається, що алгоритм погано виділяє об'єкти рідкої форми. Іншими словами, якщо в тренувальній вибірці присутні здебільшого споруди традиційної прямокутної форми та зустрічаються Г-подібні об'єкти, але при цьому відсутні будівлі, наприклад,

П-подібної форми, то така будівля з високою імовірністю взагалі не буде виділена алгоритмом.

Для створення принципово нового способу виділення антропогенних об'єктів на монохромному зображенні спробуємо подумки визначити критерії, за якими ці об'єкти знаходить оператор. Для економії часу найпростіше орієнтуватися по дорогах і руслах річок – шукати населені пункти, хоча такий спосіб і не гарантує якісного виявлення всіх будівель на знімку. Більш правильний спосіб схожий з методикою завчасного візуального виявлення об'єктів в небі, якою користуються пілоти цивільної авіації – він полягає в поділі всієї сцени на рівні фрагменти з їх подальшим уважним оглядом по черзі.

При такому підході вважається, що людина реагує на деякі критерії (сигнатури) об'єктів, які їй заздалегідь добре знайомі (в різних положеннях і ракурсах). Зокрема, в роботі [34] розглянуті так звані SIFT-дескриптори, які, як стверджується авторами, мають той самий принцип роботи, що й зорова частка кори головного мозку людини. Відповідно до цього принципу зображення представляється блоками пікселів, по кожному з яких будується гістограма градієнтів зображення. Параметри цих гістограм і є даними для тренування нейронної мережі. Однак, у випадку будівель відзначимо, що багато з них мають досить специфічну форму, особливо в житлових масивах, коли споруди в загальному випадку можна уявити набором прямокутників, що перекриваються. Форма таких будинків залежить від багатьох факторів, таких як роза вітрів, рельєф, карта ґрунтів і зручне розташування пішохідних доріг.

Очевидно, що оператор в подібних випадках керується більш базовими уявленнями, іншими словами – шукає форми, які не відповідають природним об'єктам. Наприклад, форми з прямими краями в природі зустрічаються вкрай рідко, а тим більше з прямими межами, які перетинаються під прямим кутом. Цей підхід розвинений в третьому розділі дисертації. Істотною частиною запропонованого алгоритму є пошук прямих меж об'єктів. Відзначимо, що існують і інші, окрім запропонованого рішення для пошуку прямих меж, таких, наприклад, як перетворення Хафа [40] або Fast Line Finder [41].

У перетворенні Хафа для пошуку прямолінійних меж об'єктів використовується так званий акумулятор – масив гіпотез для всіх можливих прямих на зображенні. У наведеній в [40] концепції пропонується, що будь-яка пряма може бути описана перпендикуляром, опущеним з визначеного кута зображення. Такий перпендикуляр має орієнтацію та довжину. Для того щоб однозначно визначити всі прямі на зображенні необхідно задати всі можливі значення орієнтації та довжини такого перпендикуляра. В результаті обробки зображення цим методом формується двовимірний масив розміром в кількість гіпотез по довжині на кількість гіпотез по орієнтації, який і називається акумулятором. Недолік цього методу в тому, що при великих інтервалах для значень довжини й орієнтації метод стає погано сприйнятливим до прямих, які відповідають положенням перпендикуляра між відліками акумулятора. У свою чергу, при формуванні великого акумулятора з докладним розбиттям потрібен великий обсяг оперативної пам'яті, що не завжди допустимо. Крім того, на реальних знімках земної поверхні часто краї об'єктів, що здаються прямими, на ділі є кривими з великим радіусом вигину, які перетворення Хафа рідко дозволяє визначити.

Альтернативний спосіб – Fast Line Finder, також оперує градієнтами пікселів, але при цьому використовує інший підхід. Цей метод використовує спеціальний ССА алгоритм (Connected Components Algorithm), який дозволяє об'єднувати пікселі з близьким градієнтом в кластери, із яких потім формуються параметри відрізків, що відповідають прямолінійним фрагментам контурів. Для усунення флуктуацій азимута градієнтів пікселів зображення в роботі [41] всі градієнти діляться на вісім груп за напрямком, тобто напрямки округлюються. Це призводить до того, що алгоритм практично не чутливий до положень прямих країв, які відповідають межах діапазонів напрямку градієнта. В роботі [41] ця проблема розв'язана підстроюванням положень кордонів під контекст завдання. Відзначимо, що метою роботи [41] була розробка алгоритму, що дозволяє керувати транспортним засобом, орієнтуючись по межах дороги. Оскільки кожна з шуканих прямих займала більшу частину

зображення, яке оброблялося, ця задача була розв'язана успішно, однак для пошуку прямих меж об'єктів на зображеннях продукції ДЗЗ цей алгоритм погано застосовний. У третьому розділі дисертації запропоновано більш продуктивний для задач ДЗЗ спосіб пошуку прямих меж об'єктів разом з подальшим їх аналізом.

1.3 Калібрування за допомогою ретрансляторів

Окрім роздільної здатності та радіометричних властивостей РСА є також ряд параметрів, які повинні регулярно вимірюватися для контролю правильної роботи РСА [8, 42–46]. До таких завдань належать:

- дослідження діаграми спрямованості антени РСА;
- вимірювання та компенсація систематичних затримок в бортовій системі синхронізації з глобальним часом;
- вимірювання потужності випроміненого імпульсу для оцінки та компенсації часової деградації елементної бази передавача;
- вимірювання поляризаційних характеристик зондуємого сигналу РСА;
- вимірювання фазової похибки (інтерферометричні вимірювання);
- перевірка та валідація геодезичної прив'язки знімків.

Для виконання цих завдань використовують реєструючі приймачі наземного базування, які найчастіше суміщені з активними ретрансляторами (транспондерами). Така реалізація передбачає, що пристрій може бути використано принаймні в двох режимах: в якості приймача з цифровим записом параметрів сигналу, та в якості передавача, який дозволяє використовувати пристрій як еталон цілі із великою ЕПР для РСА.

Відзначимо також, що радіометричне калібрування самих транспондерів або інших калібрувальних засобів з необхідним низьким рівнем невизначеності також є предметом багатьох сучасних досліджень. Так, наприклад, точність калібрування за природною океанічною поверхнею з використанням найефективніших теоретичних моделей складає близько 0,47 дБ [47]. Точність

калібрування за транспондером залежить здебільшого від стабільності підсилювача, тобто як правило, не може бути менша за 0,15 дБ [48]. В той час, як найбільш актуальний метод сьогодення, а саме метод трьох транспондерів, має теоретичну межу невизначеності 0,07–0,08 дБ [49, 50], і при якісній постановці експерименту вона зазвичай складає 0,1 дБ [48]. Такої точності вдалося досягти шляхом вираження ЕПР через відстань між транспондерами, яка може бути виміряна дуже точно. Однак цей метод вимагає, щоб пристрій міг бути використаний як незалежний передавач. Незважаючи на таку вимогу метод трьох транспондерів є найбільш поширеним методом в сучасних дослідженнях [44, 49, 50]. Це зумовлено тим, що для нього не потрібні ні еталонні цілі (які вносять додаткові похибки, пов'язані з резонансними ефектами, неточністю виготовлення й орієнтації еталона), ні окремих вимірювань основних вузлів транспондера (в розібраному стані) [49].

Таким чином, сучасний транспондер повинен мати, принаймні, три режими роботи. Причому режим випромінювання може бути реалізований як режим свіп-генерації по всій робочій смузі частот ретранслятора (якщо вимірювання проводяться в безлунній камері), або в імпульсному режимі для забезпечення можливості виключення відбитих від перешкод сигналів, які знаходяться за межами часового вікна відгуку, що записується (якщо вимірювання проводяться на відкритій місцевості). Це дозволяє в кінцевому рахунку отримати калібрувальні параметри для середньозваженого ЕПР по всьому спектру зонduючого імпульсу РСА [49]. Розглянемо далі основні переваги, недоліки та складнощі конструювання таких пристроїв.

Ретранслятори або транспондери – найбільш технологічний та в ряді випадків просто незамінний інструмент зовнішнього післястартового калібрування, проте він має ряд як переваг, так і недоліків. Наприклад, ТКВ з високою ЕПР складно виготовити досить надійними, несприйнятливими до вітрових навантажень і так, щоб площинність граней не порушувалася під їх власною вагою. В той же час транспондери позбавлені недоліків такого роду. Їх головною перевагою є мінімальний розмір апертури при високих значеннях

відповідного відгуку. Цей фактор робить їх більш застосовними у якості точкової цілі, що дозволяє уникнути при зовнішньому калібруванні деяких небажаних ефектів, розглянутих в другому розділі даної роботи. Також відзначимо, що мінімальний розмір точкової цілі грає дуже важливу роль при розв'язанні задачі прив'язування РЛЗ до геодезичних координат і задачі геометричної корекції знімків. Крім того, транспондер, як правило, має досить точне авторегулювання підсилення. У найбільш вдалих реалізаціях він дозволяє забезпечити радіометричну точність відбитого сигналу на рівні 0,1 дБ навіть при високих значеннях ЕПР близько 70 dBm² [48, 51].

Їх недоліком є досить велика вартість, складність виготовлення та в більшості випадків – затримка відбитого сигналу. Необхідну високу якість елементної бази досить складно забезпечити, тому для виготовлення транспондера нерідко застосовують вузли лабораторних прототипів РСА [44]. Крім цього, в ряді випадків окремі розробки вимагають наявності найбільш важливих для забезпечення точності вузлів, таких, наприклад, як атенюатор, керований напругою [45].

Затримка сигналу обумовлена необхідністю гетеродинування при підсиленні або генерацією перекодованого перевипроміненого сигналу [52]. Це типові технічні рішення для Х-діапазону, які тягнуть за собою і збільшення вартості. Хоча затримка сигналу в більшості випадків і не є критичним фактором, оскільки вона призводить тільки до зміщення відгуку на РЛЗ щодо справжнього положення ретранслятора, відзначимо, що фазове кодування перевипроміненого сигналу транспондера може призводити до появи артефактних сплесків яскравості або засвічення цілого рядка (всі азимути для конкретної дальності). З іншого боку, в ряді випадків фазове кодування перевипроміненого імпульсу може бути зручним інструментом, наприклад, для мітки потрібного відгуку (tagging), особливо у випадках слабого перевипроміненого сигналу [52].

Проте, це не виключає можливості виготовлення якісного ретранслятора, наприклад для S-діапазону, на основі приймача прямого підсилення. У цьому

випадку головна складність полягає в розв'язці приймального й передавального трактів. Так, навіть при мінімізації кількості загальних технічних вузлів для приймального та передавального трактів і використанні двох рознесених антен залишається можливість зворотного зв'язку через вторинне випромінювання від навколишніх об'єктів і елементів корпусу ретранслятора. На рис. 1.2 наведено зовнішній вигляд типового транспондера [53].

Як видно з рисунка, використані дві дзеркальні антени. В інших реалізаціях також можуть бути використані рупорні антени [52]. Для того щоб уникнути самозбудження підсилювача, нерідко також використовують ортогональну поляризацію для приймального та передавального тракту. З нашої точки зору, використання ортогональної лінійної поляризації для більшості завдань погано підходить в силу складнощів врахування зміщення кута орієнтації площини лінійної поляризації випромінювання транспондера разом з її поворотом при проходженні іоносфери за рахунок ефекту Фарадея. Тому найбільш перспективним рішенням є двоканальний ретранслятор прямого підсилення – по каналу на вертикальну та горизонтальну поляризацію. Такий підхід дозволить гарантувати точне значення ЕПР відгуку для радіолокаторів з будь-якою поляризацією, повністю виключити затримку відбитого сигналу, а також проводити найточніші поляриметричні дослідження шляхом синхронного запису сигналів по двох каналах. В умовах наявності всієї необхідної сучасної елементної бази найбільш складним є конструювання чотирьох антен і їх розміщення таким чином, щоб можливість самозбудження



підсилювача була повністю виключена. Про напрацювання в цій галузі й піде мова в четвертому розділі.

Рис. 1.2 ESA-ESTEC активний радіолокаційний транспондер

1.4 Висновки до розділу 1

1. Критичний аналіз наукової та технічної літератури показав, що оскільки РСА є доволі рідкісним і дорогим інструментом ДЗЗ, норми його зовнішнього калібрування носять виключно рекомендаційний характер і можуть суттєво відрізнятися для різних операторів космічного землеогляду. Зовнішнє експлуатаційне калібрування (vicarious calibration) РСА космічного базування розвинене недостатньо порівняно з сенсорами інших типів. З огляду на широке коло задач, які можуть бути розв'язані виключно за допомогою РСА, післястартове калібрування потребує більш розвиненої методичної, алгоритмічної та інструментальної бази. Ключовою вимогою до нових методів післястартового калібрування є простежуваність (traceability) яскравості пікселя на знімку до міжнародної метрологічної системи одиниць СІ.
2. Післястартове (експлуатаційне) калібрування радіолокаторів з використанням значної кількості тригранних кутникових відбивачів є досить витратним, в той час як способи зменшення видатків шляхом використання стаціонарних об'єктів іншого, зокрема господарського призначення, до тепер майже не розглядалися.
3. Доволі широко використовувані для зовнішнього калібрування ретранслятори фактично виготовляються ексклюзивно для кожного космічного апарату. Крім того, розробок ретранслятора для калібрування радіолокаторів в режимі бістатичної зйомки (наприклад TanDEM-X) у відомій літературі не було знайдено. Відтак актуальною є також розробка універсального калібрувального ретранслятора з широкою діаграмою спрямованості.

Таким чином, тема дисертації є актуальною та важливою в практичному відношенні

РОЗДІЛ 2

РОЗШИРЕНИЙ МЕТОД МЕТРОЛОГІЧНОЇ ОЦІНКИ Й АТЕСТАЦІЇ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

В даному розділі узагальнено та систематизовано сучасні методи післястартового експлуатаційного калібрування радіолокаторів з синтезованою апертурою антени, а також запропоновані їх розширені варіанти. Крім того, запропоновані нові параметри РСА, які найбільш повно описують одержувані за їх допомогою радіолокаційні зображення.

Розглянуто класичний та альтернативний способи визначення роздільної здатності продукції дистанційного зондування радіолокаторів з синтезованою апертурою антени, а також проведено їх порівняльний аналіз за результатами обробки РЛЗ. Перевага запропонованого альтернативного методу полягає в тому, що він враховує форму та розміри еквівалентної апертури еталонних відбивачів, що дозволяє використовувати відбивачі різних розмірів і в такий спосіб підвищувати точність вимірювань параметрів і характеристик РСА.

2.1 Попередня обробка вихідних даних

Вихідними даними для розробки викладених нижче методів послужили результати експериментів [15]. Ці результати включають п'ять РЛЗ-знімків, одержаних сенсором TerraSar-X, в комплекті з відповідними метаданими, а також схему розміщення та координати пасивних метрологічних засобів на ділянці підстильної поверхні, яка знімається (контрольно-калібрувальному комплексу). Типовий фрагмент РЛЗ, що відповідає комплексу, а також використана для даного РЛЗ схема розміщення відбивачів наведені на рис. 2.1, а, б – відповідно. На рис. 2.1, в зображені ті самі відбивачі на місцевості в період підготовки до радіолокаційної зйомки з КА.

Відзначимо, що на рис. 2.1, а наведено зображення в логарифмічному масштабі яскравості. Це типовий прийом для спрощення аналізу РЛЗ і для подальшого зіставлення яскравості на знімку з відповідною до неї ЕПР у децибелах. Також на рисунку 2.1, а фіолетовими кружками відзначені цілі, відгуки від яких досить інтенсивні, щоб їх міг розрізнити оператор. Червоними кружками відзначені місця положення відбивачів, відгуки яких невиразні на фоні шумів підстильної поверхні. Червоною лінією окреслено контрольно-калібрувальний комплекс (ККК) і частина прилеглої території для точного вимірювання рівня яскравості та шумів фону. Зеленими квадратами відзначені цілі, які не використовуються для подальшої оцінки характеристик РСА (маркер точки прицілювання, випадкові сплески яскравості та відбивачі з нетиповим для свого ЕПР відгуком – з яскравістю, що відрізняється від очікуваної більше ніж на 50 %). Ця попередня обробка РЛЗ необхідна для підвищення точності вимірювання характеристик підстильної поверхні.

Запропоновані підходи вимагають визначення положення центру відгуку в растрі РЛЗ з точністю до часток пікселя, тому розглянемо можливість уточнення координат центру відгуку на основі яскравості пікселів, які оточують піксель з максимальною яскравістю. Уточнені координати будемо обчислювати відповідно до таких виразів:

$$Row = \sum_{i=r-d}^{r+d} \sum_{j=c-d}^{c+d} i \cdot W_{i,j}, \quad (2.1)$$

$$Col = \sum_{i=r-d}^{r+d} \sum_{j=c-d}^{c+d} j \cdot W_{i,j}, \quad (2.2)$$

$$W_{i,j} = \frac{Rstr_{i,j}}{\sum_{i=r-d}^{r+d} \sum_{j=c-d}^{c+d} Rstr_{i,j}}, \quad (2.3)$$

де **Rstr** – досліджуване зображення, r, c – номер рядка та стовпчика початкового наближення відповідно, i, j – номери рядків і стовпців в межах області корекції відповідно, d – розмір області корекції, тобто околиць найбільш яскравого пікселя відгуку.

Ваги W (2.3) пропорційні до яскравостей відповідних пікселів і формуються так, щоб їх сума (в межах області корекції) завжди дорівнювала одиниці. Таким чином, щоб отримати середньозважене значення координати центру відгуку досить помножити цей масив на відповідні номери рядків або стовпців, а потім підсумувати згідно (2.1) і (2.2).

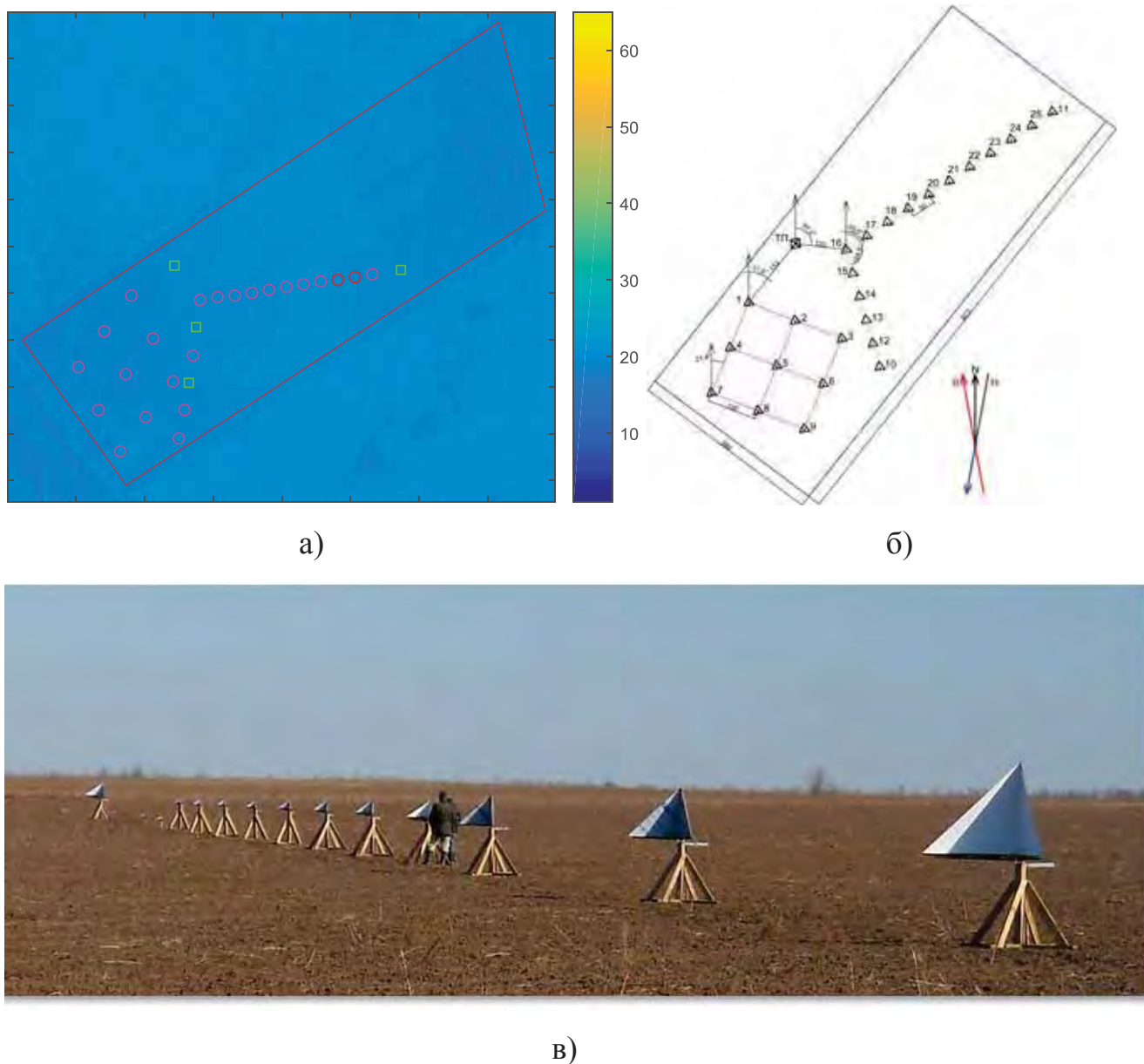


Рис. 2.1 Пасивні метеорологічні засоби на РЛЗ (а), на схемі розміщення (б) і на місцевості (в)

На практиці для більшості типів космічних сенсорів досить враховувати тільки 8 найближчих пікселів ($d = 1$). Якщо адрес цілі в растрі був обраний вірно (найяскравіший піксель), то корегування не перевищить 0,75 пікселя по кожному з вимірів. Розроблений підхід також допускає врахування більшого числа пікселів в тих випадках, коли випадковий сплеск яскравості «затягує» корегування від тусклої цілі в свій бік. У таких випадках можна збільшити область корекції так, щоб поправки, внесені шумами, взаємно компенсувалися ($d = 2-5$).

2.2 Визначення роздільної здатності РСА за радіолокаційним зображенням

Розглянемо докладно класичний підхід до післястартового калібрування РСА за РЛЗ, його особливості та недоліки. Для досліджень були взяті п'ять зображень, аналогічних наведеним на рис. 2.1, а, що містять відгуки від відповідних тригранних кутникових відбивачів, тобто від робочих еталонів з ЕПР, яка відома апріорі. За результатами відгуків на знімках були побудовані залежності роздільної здатності РСА від ЕПР відбивача. Приклади цих залежностей наведені на рис. 2.2. Кожне радіолокаційне зображення має у комплекті відповідний *.xml - файл з метаданими (супровідними параметрами). Всі необхідні для аналізу дані, включаючи заявлені та фактичні, наведені в таблиці 2.1. Відзначимо, що використані РЛЗ мають рівень обробки Level 1b, що цілком типово для продукції, що надається більшістю операторів ДЗЗ. Статус Level 1b - product передбачає, що дане РЛЗ вже геометрично скоректоване та являє собою вид місцевості зверху. При цьому точні значення розмірів пікселя в межах ККК були знайдені за фактичними відстанями між відбивачами. Таким чином, далі будемо розглядати роздільну здатність за поперечною дальністю та за азимутотом (уздовж сліду траси), вимірювану в метрах.

Отримані залежності будувалися для РЛЗ за відбивачами, квадрат рівня сигналу яких перевищує квадрат середнього рівня яскравості підстильної поверхні не менше ніж в 50 разів, як запропоновано в [8]. Рівні яскравості для кожного доступного на знімку робочого еталона наведені на рис. 2.2 для зручності в частках від максимальної яскравості знімка. Вони позначені квадратами. Крім відгуків з недостатньо великим відношенням сигнал / шум також були виключені відбивачі з потенційно помилковим рівнем яскравості (вони відзначені в таблиці 2.1). Відмітки роздільної здатності всіх виключених з дослідження відбивачів позначені на рис. 2.2 знаком "o".

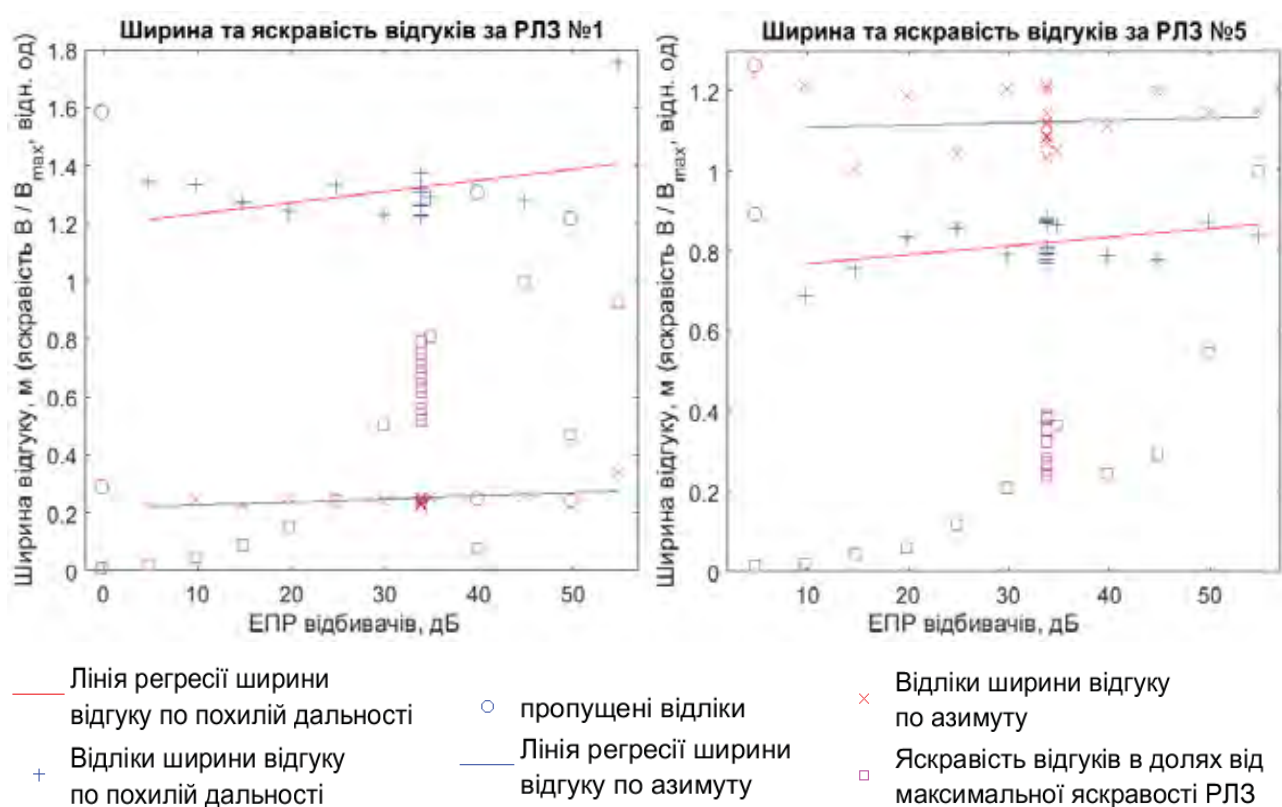


Рис. 2.2 Залежності ширини відгуку на точкову ціль за двома вимірами та яскравості відгуків на РЛЗ від ЕПР відповідних відбивачів, отримані класичним способом [8]

Таблиця 2.1.

Роздільна здатність за класичним способом [8]
(ширина відгуку на точкову ціль) PCA TerraSar-X

№ знімка	Режим	Роздільна здатність:				Коефіцієнт кореляції між роздільною здатністю й ЕПР, м/дБ		Кут падіння електромагнітної хвилі, град.	Виключені ТКВ з ЕПР, дБ:
		За поперечною дальністю, м		За азимутом, м					
		Заяв-лена	Фак-тична середня	Заяв-лена	Фак-тична середня	За поперечною дальністю	За азимутом		
1	ST	1,303	1,312	0,23	0,249	$3,863 \cdot 10^{-3}$	$1,074 \cdot 10^{-3}$	26,79	49,8; 39,8
2	ST	0,764	0,711	0,23	0,257	$4,323 \cdot 10^{-4}$	$-2,597 \cdot 10^{-4}$	50,39	33,8; 39,8
3	ST	0,696	0,738	0,23	0,223	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$5,132 \cdot 10^{-5}$	57,77	39,8
4	HS	1,338	1,407	1,1	1,135	$2,318 \cdot 10^{-3}$	$6,373 \cdot 10^{-4}$	26,08	39,8
5	HS	0,768	0,819	1,1	1,122	$2,19 \cdot 10^{-3}$	$5,878 \cdot 10^{-4}$	49,98	—

З рисунків видно, що є зв'язок (позитивна кореляція) ЕПР і ширини відгуку на точкову ціль. Це легко пояснити тим, що з ростом ЕПР відбивача збільшується і площа його еквівалентної апертури. Згідно [10], еквівалентна апертура в максимумі діаграми зворотного розсіювання має форму рівностороннього шестикутника зі стороною в одну третину від гіпотенузи грані відбивача. Шляхом нескладних перетворень легко показати, що максимальна ширина еквівалентної апертури (по протилежних кутах) дорівнює:

$$W_{EqA} = \frac{2\sqrt{2} \cdot a}{3}, \quad (2.4)$$

де a – довжина грані (катета) кутникового відбивача.

Так, найменший з робочих відбивач з ЕПР = 4,8 дБ має ширину еквівалентної апертури 0,153 м, в той час як найбільший з використаних відбивачів з ЕПР = 54,8 дБ і довжиною ребра 2,88 м має ширину еквівалентної апертури відповідно 2,72 м. При розмірах пікселя РЛЗ менше метра на даній місцевості, цей фактор і робить визначальний вплив на неоднозначність ширини відгуку на точкову ціль. Для більш детального вивчення цього явища

по кожному знімку була проведена лінійна регресія робочих відгуків з обчисленням коефіцієнтів росту (тангенсів кутів нахилу) прямої, які наведені у відповідній графі таблиці 2.1. З наведених даних видно, що коефіцієнти позитивні в дев'яти випадках з десяти.

Оскільки в літературі, присвяченій зовнішньому калібруванню РСА, рекомендації щодо вибору умовно точкової цілі, як правило, зводяться до забезпечення необхідного відношення сигнал / шум, очевидно необхідно встановити конкретний розмір еквівалентної апертури, або (що видається більш затребуваним) доповнити метод таким чином, щоб роздільна здатність не залежала від ширини еквівалентної апертури використовуваного відбивача.

В рамках виконання цього завдання розглянемо запропоноване доповнення до методу визначення роздільної здатності, що дозволяє покращити його точність. Введемо декілька понять для зручності розгляду концепції, яка пропонується. Будемо вважати, що існує гіпотетичне вихідне зображення (**SrsImg**), якому відповідає розмите зображення, яке отримано безпосередньо з КА (**ResImg**). Тоді ці зображення пов'язані через операцію двовимірного згортання $\text{ResImg} = (\text{SrsImg} * \mathbf{K})$. Коли відомі обидва зображення, можна визначити ядро «умовного розмиття» **K**. Це ядро еквівалентне до відгуку на точкову ціль, або принаймні на ціль, розмір якої менший за піксель, розташовану в його центрі. Очевидно отримати відгук на таку точкову ціль в натурних умовах досить проблематично навіть з використанням дорогих транспондерів, тому що невідомо заздалегідь, де на підстильній поверхні виявляться проекції меж пікселів. Ширину відгуку, виміряну за ядром згортання, назвемо істинною роздільною здатністю. Безсумнівна перевага такого підходу полягає в тому, що ядро буде мати практично однакову ширину за рівнем 0,707 максимальної амплітуди сигналу як у випадку, коли відбивач знаходиться в центрі пікселя РЛЗ, так і у випадку його попадання на межу пікселів. Крім того, ширина ядра практично не змінюється по мірі росту розміру еквівалентної апертури відбивача.

Розглянемо спосіб отримання вихідного зображення **SrsImg**. Знаючи положення центру еквівалентної апертури, її геометричні розміри та розміри пікселя РЛЗ, нескладно побудувати цю апертуру поверх растра для подальшого обчислення для кожного пікселя його частини, що заповнена апертурою.

Для цього, перш за все, визначимо кути еквівалентної апертури ТКВ (шестикутника). Оскільки для більшості ТКВ розміри апертури різні, зручно спочатку знайти координати кутів шестикутника з одиничною стороною та центром на початку координат. Тут і далі розглядаємо випадок, коли розділення за похилою дальністю обчислюється за центральним рядком зображення відгуку, інакше кажучи, приймаємо, що КА летить уздовж осі Y відносно зображення, що формується (вгору для висхідного витка та вниз для низхідного). Оскільки гіпотенуза нижньої межі ТКВ завжди паралельна до поверхні Землі, нижній край відповідної шестикутної апертури повинен бути паралельний до осі Y зображення. Виходячи з цього, нескладно отримати координати кутів відносно центру:

$$\mathbf{X}_H = \left\{ \sqrt{3}/2, 0, -\sqrt{3}/2, -\sqrt{3}/2, 0, \sqrt{3}/2 \right\}, \quad (2.5a)$$

$$\mathbf{Y}_H = \left\{ 1/2, 1, 1/2, -1/2, -1, -1/2 \right\}. \quad (2.5b)$$

Далі необхідно усі координати помножити на розмір сторони шестикутника (в метрах), який може бути обчислений з ЕПР відбивача шляхом підстановки (1.2) в (2.4) та ділення навпіл:

$$L_H = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt[4]{\frac{3\lambda^2\sigma}{4\pi}}, \quad (2.6)$$

де λ – довжина хвилі зондуючого сигналу в метрах (для даного експерименту $\lambda = 3,1$ см [54]), σ – ЕПР відбивача в квадратних метрах. Для розрахунку ЕПР в децибелах останню нескладно виразити з (1.1).

Далі врахуємо зміщення апертури з центру координат в центр зображення відгуку, а також розміри сторін пікселів. З урахуванням того, що в кожному експерименті відбивачі зорієнтовані на КА в момент зйомки, при корекції

нахилу поверхні, що знімається відносно КА, еквівалентна апертура відбивача розтягується в площині похилої дальності (тобто по вісі X). Таким чином, вирази для координат відповідного кута еквівалентної апертури (шестикутника) на знімку, вимірюваних в частках пікселів, будуть наступні:

$$X_i = \frac{X_{Hi} \cdot L_H}{\sin \gamma_{inc} \cdot PixW} + X_{CP}, \quad (2.7a)$$

$$Y_i = \frac{Y_{Hi} \cdot L_H}{PixH} + Y_{CP}, \quad (2.7b)$$

де X_i , Y_i – координати кутів апертури в растрі (в пікселях), X_{CP} , Y_{CP} – координати центру відгуку в даному фрагменті зображення. $PixW$ – ширина пікселя (уздовж X) в метрах, $PixH$ – висота пікселя (уздовж Y) в метрах. γ_{inc} – кут падіння електромагнітної хвилі на відбивач, який відлічується від горизонту.

За отриманими точкам можна побудувати шестикутник, який відповідає еквівалентній апертурі ТКВ в растрі РЛЗ. Отримана фігура в растрі дозволяє обчислити частку пікселя, зайняту апертурою, для кожного пікселя вихідного зображення. Отримане зображення K_s підлягає подальшому нормуванню:

$$SrsImg_{i,j} = K_{Si,j} \cdot \frac{\sum_i \sum_j ResImg_{i,j} - Noise}{\sum_i \sum_j K_{Si,j}}, \quad (2.8)$$

де K_s – растр зображення еквівалентної апертури (яскравість від 0 до 1), $Noise$ – середній рівень яскравості підстильної поверхні.

Таким чином забезпечується незмінність сумарної яскравості (енергії) відгуку вихідного зображення **SrsImg** по відношенню до розмитого зображення **ResImg**. Приклади сформованих вихідних зображень показані на рис. 2.3, а, г.

Розглянемо другий етап – визначення ядра згортання. Він зводиться до розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), описаних квадратною матрицею $n \times n$, де n – кількість елементів в ядрі. Сформулювати математичний вираз для формування такої СЛАР не представляється можливим, тому для розуміння алгоритму її побудови розглянемо процес

згортання як такий. Ядро двовимірної згортки – це, як правило, прямокутний масив коефіцієнтів з максимальним значенням в центральному елементі. Прийmemo для нашого випадку розмір ядра рівним розмірам **SrsImg** і **ResImg**. Для обчислення значення деякого пікселя розмитого зображення використовують фрагмент вихідного зображення, що відповідає за розмірами ядру розмиття (згортання). Ядро, як правило, має непарну кількість рядків значень, як і непарну кількість стовпців. Тому, якщо в поточній ітерації шукається значення розмитого зображення в пікселі за адресою i,j , то необхідно вибрати фрагмент вихідного зображення **SrsImg** з центром в пікселі з тією ж адресою, інакше кажучи, вибираємо область (фрейм), «покриту» ядром в його поточному положенні. На практиці найчастіше сума коефіцієнтів, записаних в ядрі, дорівнює одиниці (нормоване ядро). Тому, коли коефіцієнти ядра поелементно перемножуються кожен з відповідним пікселем вихідного зображення, то фактично визначаються зважені рівні сигналу, які будуть перенесені з кожного сусіднього пікселя (з області, покритої ядром) в поточний піксель з адресою i,j результуючого зображення **ResImg**. Таким чином, підсумувавши всі ці значення, отримаємо яскравість результуючого зображення в пікселі за адресою i,j . При цьому вважається, що за межами фрагмента зображення з відгуком розташовані тільки пікселі з нульовою яскравістю.

Відповідно, при формуванні необхідної для пошуку ядра СЛАР вважаємо, що вектор невідомих **Core** – це елементи ядра, перетворені в вектор-стовпець, вільний член – це **ResImg**, аналогічно перетворений в вектор-стовпець, а матриця коефіцієнтів **M** формується рядок за рядком для кожного значення **ResImg**. Це відбувається шляхом копіювання значень з **SrsImg** стовпчик за стовпчиком в межах положення ядра, яке відповідає даному пікселю **ResImg**, тобто вільному члену для поточного рядка матриці **M**. Коли матриця коефіцієнтів сформована, можна записати вираз для пошуку ядра у вигляді:

$$\mathbf{Core} = \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{SrsImg}, \quad (2.9)$$

де **Core** – розіменоване (перетворене в вектор-стовпець) ядро, **M** – матриця коефіцієнтів.

Отримане ядро після копіювання в растр стовпчик за стовпчиком, можна оцінити по його ширині, аналогічно оцінці ширини відгуку на точкову ціль, з тією відмінністю, що середня яскравість фону близька або дорівнює нулю. Приклади отриманих ядер згортки показані на рис. 2.3, б, д, а відповідні їм розмиті зображення, отримані з КА, на рис. 2.3, в, є.

Єдиним істотним недоліком такого підходу є критичність до алгоритмів автофокусування РЛЗ. Як видно на рис. 2.3, є, еквівалентна апертура відбивача за розміром більша відповідного їй відгуку, що призводить до поганої обумовленості матриці $\mathbf{M}$ і, як наслідок, до високої нев'язки розв'язку. Далі такі випадки будуть називатися погано обумовленими цілями. Величина нев'язки також залежить від відношення сигнал / шум і від розміру фрагмента зображення з відгуком. Тому в найбільш детальних режимах (наприклад Staring SpotLight), коли розміри пікселя менші за метр, цей метод працює тільки у випадку невеликих цілей, тому що відгуки з високою

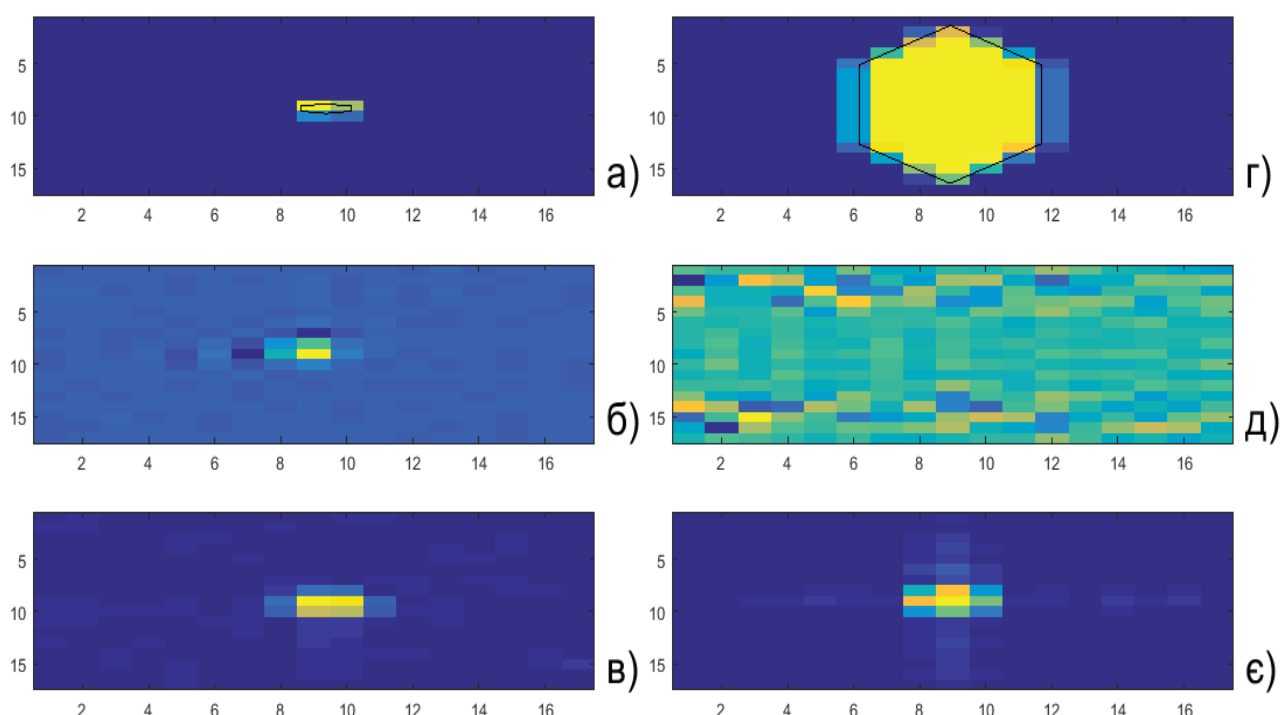


Рис. 2.3 Пошук ядер згортання на прикладі двох цілей:(а–в) – «добре обумовлена» ціль, (г–є) – «погано обумовлена» ціль, (а, г) – вихідне зображення **SrsImg** і відповідна їй еквівалентна апертура, (б, д) – знайдене ядро розмиття **Core**, (в,є) – розмите зображення **ResImg**, отримане з КА

нев'язкою відкидаються. У менш детальних режимах (наприклад High Resolution SpotLight), коли розміри пікселя порядку метра, метод дозволяє працювати з великими цілями, рівень відбитого сигналу яких досягає 40 дБ. Всі отримані результати зведені в таблицю 2.2. Для порівняння з класичним підходом залежності ширини відгуку від ЕПР відбивача наведені на рис. 2.4.

З таблиць 2.1 і 2.2 видно, що ширина відгуку за поперечною дальністю, розрахована запропонованим методом, менша, ніж обчислена за допомогою класичного методу, а ширина відгуку за азимутом також ще й істотно менша, ніж заявлена в метаданих знімка. Очевидно це пов'язано з тим, що при приймальних льотних випробуваннях КА, організованих оператором, були використані пристрої з конкретним (далеко не нульовим) розміром апертури, хоча згідно зі звітом [16], для більшості режимів КА TerraSar-X фактична ширина відгуку виявляється дещо менша за розрахункову.

По всій видимості, ймовірне потрапляння використаних еталонних цілей на кордон пікселів є причиною систематичної похибки при багаторазових вимірюваннях. Цей ефект, як правило, більш яскраво виражений при визначенні ширини відгуку за азимутом, тому що йому відповідає менша сторона пікселя. Крім того, спостерігається від'ємна кореляція ширини відгуку з ЕПР цілі, особливо у випадках з малою ЕПР близько 10 дБ і менше. На наш погляд, це пояснюється високим відносним рівнем шумів підстильної поверхні. Більш того, для випадків, коли вся енергія відгуку поміщається в одному пікселі вихідного зображення, знайдена форма ядра повторює форму розмитого зображення з точністю до дзеркального відображення. Очевидно це й послужило другою причиною завищення значень ширини відгуку для цілей з низькою ЕПР, тому що ширина відгуку, знайдена за розмитим (і зашумленим) зображенням, як правило, вища.

Таблиця 2.2

Модифікована роздільна здатність PCA TerraSar-X за отриманими знімками

№ знімка	Режим	Роздільна здатність:				Коефіцієнт кореляції між роздільною здатністю й ЕПР, м/дБ		Кут падіння електромагнітної хвилі, град.	Виключені ТКВ з ЕПР, дБ:
		За поперечною дальністю, м		За азимутом, м					
		Заявлена	Фактична середня	Заявлена	Фактична середня	За поперечною дальністю	За азимутом		
1	ST	1,303	1,251	0,23	0,192	-2,102·10 ⁻³	-9,013·10 ⁻⁴	26,79	Всі окрім 24,8–9,8
2	ST	0,764	0,673	0,23	0,218	-3,364·10 ⁻³	-4,838·10 ⁻³	50,39	Всі окрім 24,8–9,8
3	ST	0,696	0,704	0,23	0,190	4,618·10 ⁻⁴	-4,242·10 ⁻³	57,77	Всі окрім 24,8–14,8
4	HS	1,338	1,166	1,1	1,030	-6,532·10 ⁻³	-4,81·10 ⁻³	26,08	54,8–49,8; 39,8
5	HS	0,768	0,674	1,1	1,014	-3,293·10 ⁻³	-4,127·10 ⁻³	49,98	54,8–44,8

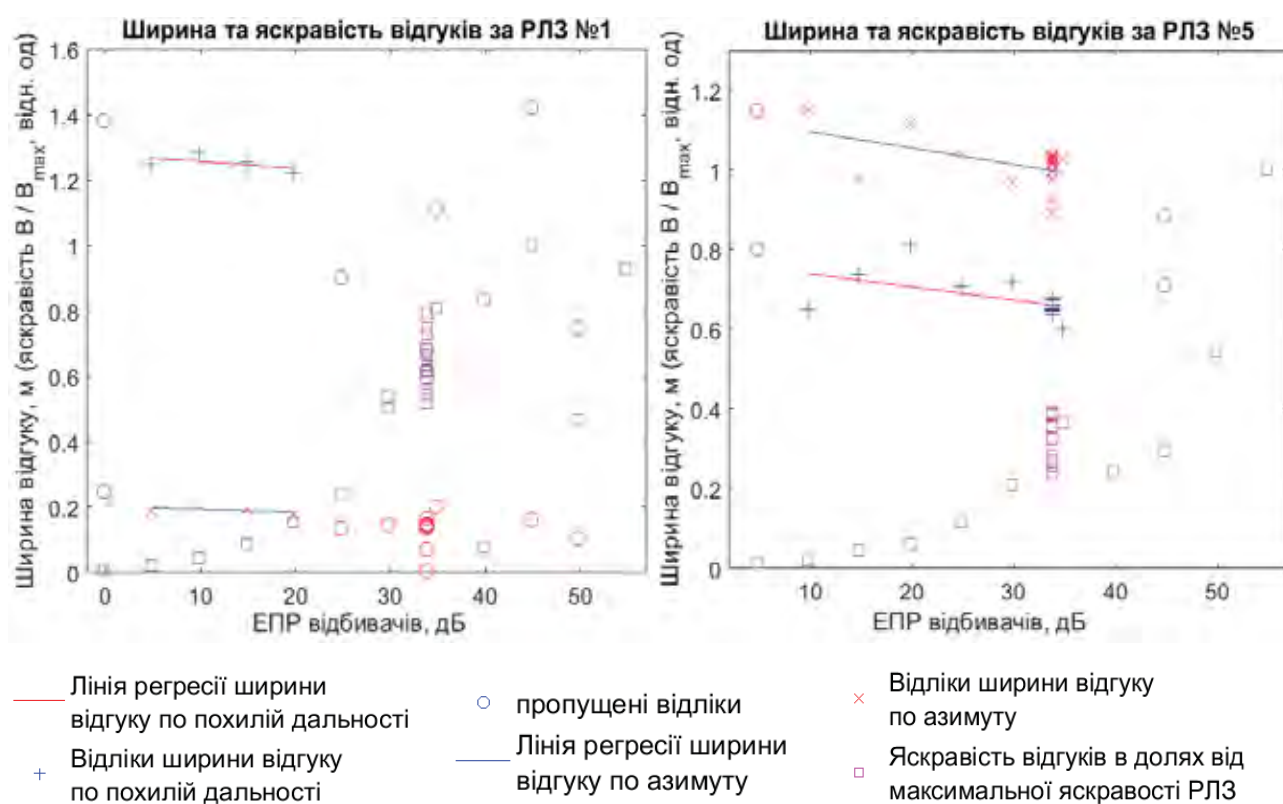


Рис. 2.4 Залежності ширини відгуку на точкову ціль у двох вимірах, які отримані запропонованим способом, і яскравості відгуків на РЛЗ від ЕПР відповідних відбивачів

З метою порівняння з класичним методом був проведений підрахунок стандартної невизначеності типу А (U_a) [55] для роздільної здатності кожного знімка як за азимутом, так і за дальністю. Всі результати зведені в таблицю 2.3. З неї видно, що запропонований спосіб може давати більш високу невизначеність за рахунок виключення цілей з високою нев'язкою розв'язку відповідних їм СЛАР, що призводить до зменшення кількості вимірювань. З цієї ж причини результати альтернативного методу за першими трьома знімками можна вважати не показовими, тому що в них використовуються не більше п'яти відбивачів з різною ЕПР. У той же час для запропонованого способу (в порівнянні з класичним) отримані менші значення невизначеності для однакової вибірки цілей (придатної для запропонованого методу), особливо на четвертому та п'ятому знімках. Таким чином, запропонований метод дозволяє знизити невизначеність ширини відгуку за поперечною дальністю та за азимутом для четвертого знімка на 27 % і 13 %, а для п'ятого – на 8 % і 13 %.

Таблиця 2.3

Невизначеності для модифікованого і класичного методів
визначення роздільної здатності

№ знімку	Кількість ТКВ	U_a класичного методу, м		U_a для запропонованого методу, м		Кількість ТКВ	U_a класичного методу за цілями запропонованого, м		Ширина відгуку на точкову ціль класичного методу за цілями запропонованого, м		Розмір пікселя, м	
		Поперечна дальність	Азимут	Поперечна дальність	Азимут		Поперечна дальність	Азимут	Поперечна дальність	Азимут	Вишина	Ширина
1	20	0,026	0,005	0,012	0,007	4	0,024	0,004	1,298	0,242	0,181	0,946
2	20	0,008	0,004	0,017	0,019	5	0,021	0,004	0,691	0,27	0,186	0,521
3	20	0,008	0,003	0,003	0,015	4	0,017	0,006	0,746	0,22	0,164	0,548
4	20	0,017	0,017	0,015	0,016	17	0,019	0,018	1,404	1,133	0,875	1,040
5	21	0,011	0,014	0,012	0,015	17	0,013	0,017	0,819	1,115	0,863	0,604

2.3 Радіометричні властивості радіолокаційного зображення

Крім роздільної здатності для ряду практичних застосувань є важливим точне визначення параметрів чутливості РСА як для конкретного РЛЗ, так і сенсора в цілому. Основні роботи встановлюють, принаймні, три критерії для опису параметрів чутливості РСА для даного РЛЗ: радіометрична роздільна здатність, динамічний діапазон і лінійність передавальної функції [8, 17].

Власний рівень шумів, як правило, вимірюють за рівнем яскравості на областях РЛЗ, відповідних рівній водній гладі, або радіолокаційним тіням великих об'єктів. Динамічний діапазон є різниця між нижньою та верхньою межею чутливості ЕПР в децибелах у випадку, коли на знімку присутні відбивачі з різною ЕПР в межах, що заздалегідь перекривають динамічний діапазон РСА. Інакше кажучи, динамічний діапазон – це різниця між рівнем власних шумів (нижньою межею чутливості) та порогом насичення (верхньою межею чутливості).

Одна з актуальних проблем полягає в тому, що домогтися ідеально рівної водної гладі під відкритим небом в дійсності не представляється можливим, як і спорудити або знайти достатньо велику будівлю, яка формувала б на знімку досить велику радіолокаційну тінь для точної оцінки рівня шумів. Крім того, на практиці, як поріг насичення, найчастіше беруть найбільший ЕПР відбивача з міри, що в дійсності не завжди відповідає реальному порогу насичення РСА.

Радіометричне розділення в строгому формулюванні залежить від рівня сукупного впливу на зображення власних шумів системи, бічних і задніх областей діаграми спрямованості та цілого ряду чинників, що вносять неоднозначність в рівень сигналу на зображенні. Тут важливо відзначити, що для кожного конкретного експерименту рівень шумів може бути свій і при цьому не можна однозначно встановити: яка частина шуму обумовлена конструктивами РСА, а яка зовнішніми факторами, такими як стан іоносфери, нерівність тестової поверхні, що відбиває (наприклад, при вимірюванні рівня шуму по водній поверхні), або дифракція на крайках складних об'єктів при

вимірюванні по радіолокаційним тіням. Ми вважаємо, що з практичної точки зору кінцевому споживачеві важливі більш наочні характеристики РСА, які дозволять швидко оцінити можливість застосування того чи іншого сенсора для розв'язання конкретної тематичної задачі. Тому замість радіометричного розділення розглянемо коефіцієнт пропорційності яскравості й ЕПР, тобто значення ЕПР (в дБ), відповідне одній одиниці яскравості.

Відзначимо, що відповідно до метаданих використаних знімків, їх специфікацією [56] передбачена можливість обчислення ЕПР з яскравості цілі за формулою:

$$\sigma_0 = \left(k_s \langle |DN|^2 \rangle - NEBN \right) \sin \gamma_{inc}, \quad (2.10)$$

де σ_0 – передбачувана ЕПР цілі в м², k_s – радіометричний калібрувальний коефіцієнт, зазначений в метаданих, як «absCalFactor», DN (Digital Number) – величина яскравості на знімку, $NEBN$ (Noise Equivalent Beta Naught) – рівень шуму для даної частини знімка, тут використаний середній рівень шуму, зазначений в метаданих як, «averageNoiseRecordAzimuthSpacing», γ_{inc} – кут падіння електромагнітної хвилі на ціль.

Щоб уникнути неоднозначності термінів, незважаючи на те, що вихідна яскравість РЛЗ може бути порівняна з ЕПР, будемо все ж говорити про неї саме як про яскравість, з тим, щоб перевірити якість наведених у [56] калібрувальних коефіцієнтів. Тому далі будемо вимірювати її в умовних одиницях яскравості (у.о.я.) або у випадку логарифмічної шкали яскравості – в умовних логарифмічних одиницях яскравості (у.л.о.я.). Виразимо очікувані рівні яскравості для наявних відбивачів з відомою ЕПР:

$$DN[\text{у.о.я.}] = \sqrt{\frac{\sigma_0 + NEBN \sin \gamma_{inc}}{k_s \sin \gamma_{inc}}}. \quad (2.11)$$

Тепер, за допомогою (1.1) для зручності порівняння приведемо даний вираз до ЕПР в децибелах за шкалою ЕПР і до у.л.о.я за шкалою яскравості:

$$DN[\text{у.л.о.я}] = 10 \lg \sqrt{\frac{10^{\sigma[\partial B]/10} + NEBN \sin \gamma_{inc}}{k_s \sin \gamma_{inc}}} . \quad (2.12)$$

На рис. 2.5, а представлені позначки яскравості по кожному з досліджених зображень. Відзначимо, що для того, щоб шкала яскравості та фактична відповідна їй ЕПР (в децибелах) співвідносилися лінійно (принаймні в середині динамічного діапазону), тут і далі під яскравістю розуміється десять десяткових логарифмів від яскравості цілей в у.о.я на вихідному РЛЗ. На рис. 2.5, б квадратами відзначені очікувані рівні яскравості а крапками фактичні значення яскравості для відбивачів на РЛЗ №1. З рисунка видно, що запропонована в [56] модель передбачає наявність лише лінійної, або близької до лінійної залежності між яскравістю в логарифмічних одиницях на РЛЗ і відповідною їй ЕПР в децибелах. Хоч така залежність характеризує лінійну частину динамічного діапазону, нижче буде розглянуто альтернативний підхід, що дозволяє охарактеризувати нелінійні властивості функції залежності яскравості на РЛЗ від ЕПР.

На наведеній залежності добре видно відбивачі з нехарактерною яскравістю відгуку, які також наведені в таблиці 2.1. Для дослідження радіометричних характеристик сенсора оптимальним буде виключити ці відбивачі з вибірки. Відзначимо також, що відбивачів з ЕПР, що дорівнює 33,8 дБ, на знімку є 11, проте на рис. 2.5 цьому ЕПР відповідає лише одна відмітка із середньою яскравістю всіх 11-ти ТКВ.

Також за відмітками чітко видно, що в загальному випадку найбільш точно характер залежності яскравості цілі від ЕПР можна описати за допомогою сигмоїди (логістичної функції). Візьмемо її за основу для апроксимуючої моделі. У найпростішому наближенні сигмоїда описується так [57]:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} . \quad (2.13)$$

Для того щоб апроксимувати отримані дані моделлю такого типу, необхідно ввести чотири параметри задачі, а саме – зміщення та масштабуючий коефіцієнт по осі абсцис і ті ж параметри для осі ординат. Нагадаємо, що осі абсцис відповідає ЕПР відбивачів в дБ, а осі ординат відповідна їм яскравість на знімках в у.л.о.я. Таким чином, математична модель для апроксимації залежності яскравості від ЕПР наступна:

$$S(x) = Shft_{Br} + \frac{Scl_{Br}}{1 + \exp\left(-\frac{x - Shft_{RCS}}{Scl_{RCS}}\right)}, \quad (2.14)$$

де Scl_{Br} , Scl_{RCS} – масштабуючі коефіцієнти по яскравості та по ЕПР відповідно, а $Shft_{Br}$, $Shft_{RCS}$ – аналогічно показники зсувів середини сигмоїди відносно початку координат по яскравості та по ЕПР, відповідно. Приклад апроксимації наведено на рис. 2.5, б.

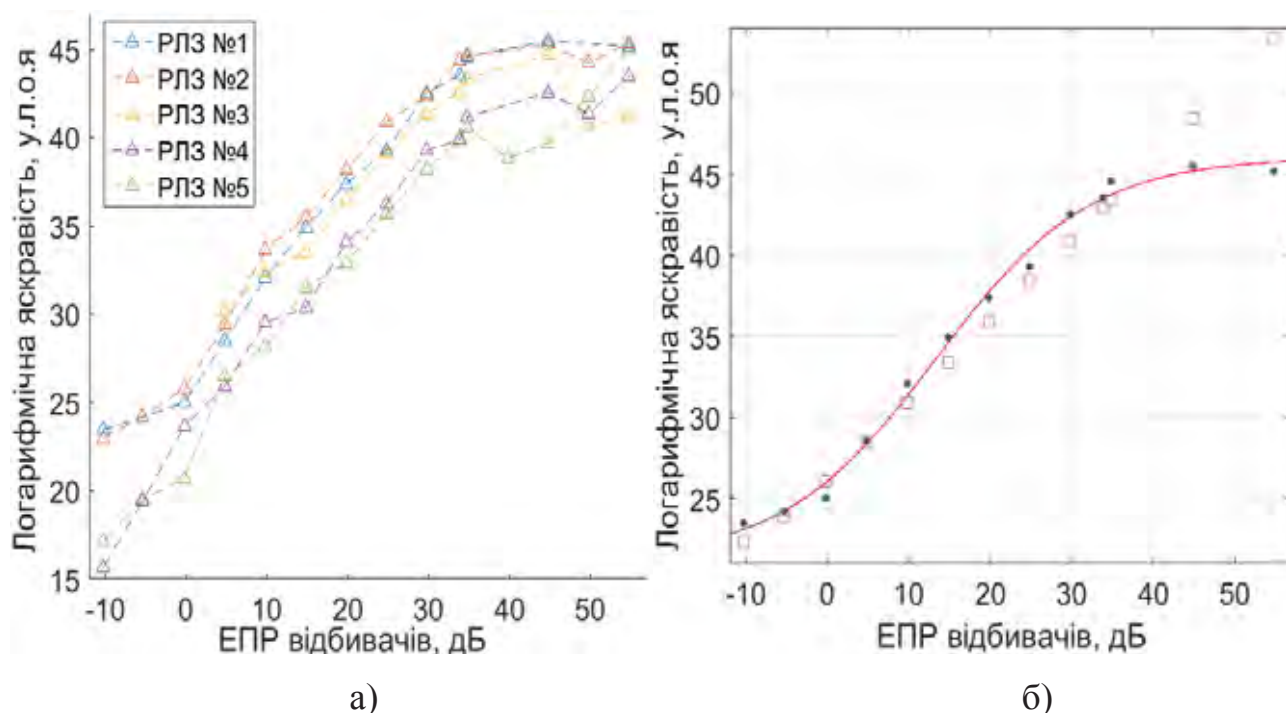


Рис. 2.5 Залежність яскравості відгуку від ЕПР відбивача для всіх п'яти РЛЗ (а) та для РЛЗ №1 з апроксимацією (б)

З фізичної точки зору очевидно, що малі значення похідної кривої (2.14) у верхній частині динамічного діапазону викликані насиченням елементів тракту сенсора, в той час як пологий характер кривої в нижній частині динамічного діапазону очевидно обумовлений шумами та яскравістю підстильної поверхні. Розробники РСА в [8] встановлюють поріг питомої ЕПР (ПЕПР) для фону в $-30\text{дБ} / \text{м}^2$ для експериментів такого роду, однак на практиці домогтися цього вкрай складно, особливо на площах близько 20 тис. кв. м, як у наведеному експерименті. Однак вважається, що при фоні з необхідною ПЕПР крива буде все одно мати сигмоїдальний характер (в нижній частині динамічного діапазону) за рахунок власних шумів сенсора.

Далі необхідно отримати з параметрів моделі більш функціональні, зручні для кінцевого споживача параметри, які дозволять порівнювати характеристики та режими роботи РСА між собою, а також підбирати режим зйомки та тип продукту для конкретних прикладних задач. Для простоти будемо розглядати спрощену кусково-лінійну модель апроксимуючої функції, отриману безпосередньо з параметрів сигмоїди. Введемо параметри, які будуть відповідати нижній та верхній межах динамічного діапазону РСА для кусково-лінійної моделі, а також коефіцієнт пропорційності між ЕПР і яскравістю в логарифмічних одиницях. Приклад спрощеної моделі наведено на рис. 2.6.

Для початку необхідно отримати рівняння похилої прямої, що відповідає лінійній залежності між яскравістю й ЕПР. Нехай пряма – це дотична в точці максимальної величини похідної сигмоїди (середині динамічного діапазону):

$$y(x) = Shft_{Br} + \frac{Scl_{Br}}{2} + S'(Shft_{RCS}) \cdot (x - Shft_{RCS}). \quad (2.15)$$

Тут $S'(Shft_{RCS})$ – похідна сигмоїди в точці $Shft_{RCS}$. Для того, щоб її знайти, спершу визначимо саму похідну виразу (2.14):

$$S'(x) = -Scl_{Br} \left(\frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{x - Shft_{RCS}}{Scl_{RCS}}\right)} \right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{x - Shft_{RCS}}{Scl_{RCS}}\right) \cdot \left(-\frac{1}{Scl_{RCS}}\right). \quad (2.16)$$

Далі, щоб знайти похідну в точці $Shft_{RCS}$ підставимо її в вираз (2.16) замість x і спростимо вираз:

$$S'(Shft_{RCS}) = -Scl_{Br} \left(\frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{0}{Scl_{RCS}}\right)} \right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{0}{Scl_{RCS}}\right) \cdot \left(-\frac{1}{Scl_{RCS}}\right);$$

$$S'(Shft_{RCS}) = \frac{Scl_{Br}}{4Scl_{RCS}} = k, \quad (2.17)$$

де k – шуканий коефіцієнт пропорційності лінійної ділянки, який встановлює залежність яскравості в логарифмічних одиницях (у.л.о.я.) від ЕПР, вираженої в децибелах.

Також нескладно встановити, що яскравості, які відповідають нижній і верхній межах динамічного діапазону (горизонтальні асимптоти сигмоїди) (рис. 2.6), відповідно дорівнюють:

$$LS = Shft_{Br}, \quad (2.18a)$$

$$HS = Shft_{Br} + Scl_{Br}. \quad (2.18b)$$

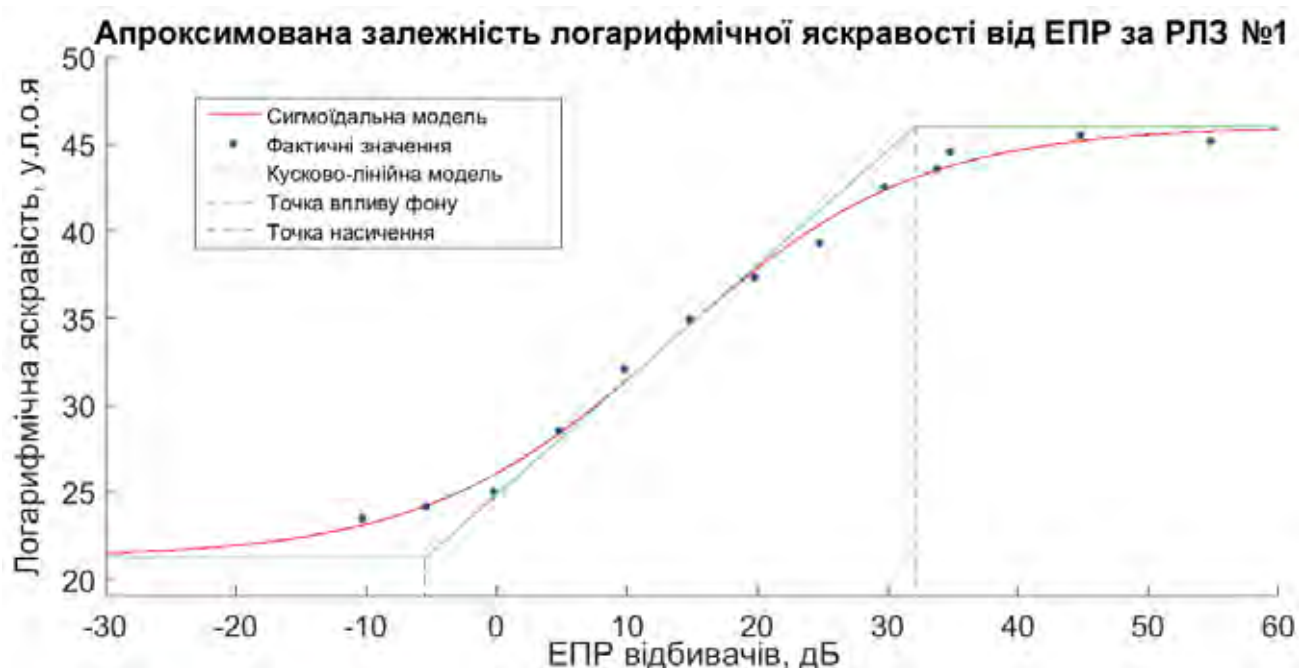


Рис. 2.6 Формування спрощеної кусково-лінійної моделі кривої радіометричної чутливості для знімка №1

Приймемо замість застосовуваних раніше меж динамічного діапазону РСА [8] в якості явних однозначних критеріїв, що визначають характеристики чутливості РСА – точку насичення та точку впливу фону, які відповідають верхній та нижній межах динамічного діапазону за кусково-лінійною моделлю. Для знаходження цих параметрів динамічного діапазону по ЕПР в дБ (по осі абсцис) відповідно до запропонованого методу необхідно визначити точки перетину цих асимптот і прямої лінійної залежності. Оскільки ординати точок вже відомі, для знаходження абсциси досить підставити LS і HS з (2.18а, б) замість y в (2.15) і вирішити отримані рівняння. Вирішимо їх для точки впливу фону:

$$Shft_{Br} = Shft_{Br} + \frac{Scl_{Br}}{2} + \frac{Scl_{Br}}{4Scl_{RCS}} \cdot (x - Shft_{RCS}) ;$$

$$\frac{Scl_{Br}}{2} + \frac{Scl_{Br}}{4Scl_{RCS}} \cdot (x - Shft_{RCS}) = 0 .$$

Вважаємо, що $Scl_{Br} \neq 0$, що відповідає коректним вхідним даним, тоді

$$\frac{1}{2} + \frac{x - Shft_{RCS}}{4Scl_{RCS}} = 0 ;$$

$$x - Shft_{RCS} = -\frac{4Scl_{RCS}}{2} ;$$

$$x = Shft_{RCS} - 2Scl_{RCS} = L_{RCS} [дБ], \quad (2.19)$$

де L_{RCS} – шуканий параметр динамічного діапазону в дБ (точка впливу фону).

Далі вирішимо рівняння для точки насичення динамічного діапазону:

$$Shft_{Br} + Scl_{Br} = Shft_{Br} + \frac{Scl_{Br}}{2} + \frac{Scl_{Br}}{4Scl_{RCS}} \cdot (x - Shft_{RCS}) ;$$

$$\frac{1}{2} + \frac{x - Shft_{RCS}}{4Scl_{RCS}} = 1 ;$$

$$x = Shft_{RCS} + 2Scl_{RCS} = H_{RCS} [дБ], \quad (2.20)$$

де H_{RCS} – шукана точка насичення динамічного діапазону в дБ. Зауважимо, що визначені таким чином величини не є фактичними межами динамічного

діапазону РСА, однак дозволяють найбільш точно оцінити придатність конкретного режиму даного РСА для конкретних цілей при заданих умовах зйомки.

Повний перелік параметрів апроксимації залежності яскравості ТКВ на РЛЗ від ЕПР ТКВ сигмоїдальною моделлю (2.14) для всіх п'яти тестових зображень, а також отримані з них запропоновані радіометричні характеристики, наведені в таблиці 2.4. Якість апроксимації для кожного знімка описано коренем з середньоквадратичної похибки (Root Mean Squared Error – RMSE). Це типовий показник якості моделі [58], обчислений відповідно до формули:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - m}}, \quad (2.21)$$

де n – загальна кількість вимірювань (всі відліки з однаковими ЕПР враховуються як один середній), m – кількість параметрів моделі (використана модель (2.14) має лише чотири параметри), y_i – фактична яскравість чергового вимірювання, $\hat{y}_i$ – модельне значення яскравості чергового вимірювання.

Таблиця 2.4

Параметри апроксимації та відповідні радіометричні характеристики РЛЗ
за яскравостями, взятими з центральних пікселів відгуків

№ знімка	Параметри апроксимуючої моделі					Кількість точок	Параметри динамічного діапазону РСА		
	$Shft_{RCS}$	$Shft_{Br}$	Scl_{RCS}	Scl_{Br}	RMSE		$L_{RCS}, \text{дБ}$	$H_{RCS}, \text{дБ}$	k
1	13,34	21,24	9,4	24,79	0,682	13	-5,47	32,14	0,66
2	10,33	20,29	9,34	25,27	0,684	14	-8,36	29,01	0,68
3	19,75	30,42	4,46	12,17	1,365	11	10,83	28,67	0,68
4	0	0,61	16,87	44,37	0,896	14	-33,73	33,73	0,66
5	2,87	2,94	17,99	42,54	1,285	15	-33,11	38,84	0,59

Також можна використовувати параметр R^2 або R^2_{adj} [59]. Ці параметри більше підходять для порівняльної оцінки якості апроксимації відгуків за допомогою сигмоїдальної моделі для різних сенсорів, оскільки вони не прив'язані до масштабів осі ординат, тобто до логарифмічної яскравості.

Розглянемо результати, отримані з використанням запропонованої моделі. З таблиці видно істотний розкид параметрів на різних знімках, особливо точок впливу фону. Для докладного аналізу даних розглянемо вихідні вимірювання та відповідні апроксимуючі залежності для чотирьох знімків, що лишилися – вони наведені на рис. 2.7 (позначення аналогічні рис. 2.6). Важливим аспектом калібрування динамічного діапазону по запропонованому методу є повне перекриття динамічного діапазону відбивачами з різною ЕПР. На наявних знімках для даної довжини хвилі ($\lambda = 3,1$ см) найменший відбивач має ЕПР $\sigma = -10,2$ дБ, що може виявитися недостатнім для дослідження нелінійних залежностей яскравості в ЕПР в нижній частині динамічного діапазону. Зауважимо також, що перші три знімки, параметри динамічних діапазонів яких наведені в таблиці, отримані в найбільш детальному режимі Staring SpotLight. При цьому на РЛЗ №3 відсутні (знаходяться за межами знімка) відбивачі з ЕПР меншою 4,8 дБ. Очевидно це і призвело до істотного падіння якості апроксимації, що виражено високим $RMSE$, та відмінності знайденої точки впливу фону L_{RCS} на РЛЗ №3. В іншому перші три знімки дають близькі результати.

Останні два знімки виконані в менш детальному режимі High Resolution SpotLight. Цікаво відзначити, що отримані для них точки впливу фону L_{RCS} досить добре збігаються, хоча ці значення не можна вважати показовими, тому що нижня гілка отриманої сигмоїди ніяк не виражена вимірами, точки не мають характер пологого спаду.

В якості додаткового механізму контролю результатів, отриманих згідно запропонованого метода, вважатимемо за необхідні (але не достатні) умови достовірності отриманих параметрів динамічного діапазону наявність у вибірці відбивачів з ЕПР більшою за H_{RCS} і з ЕПР меншою за L_{RCS} для точок насичення

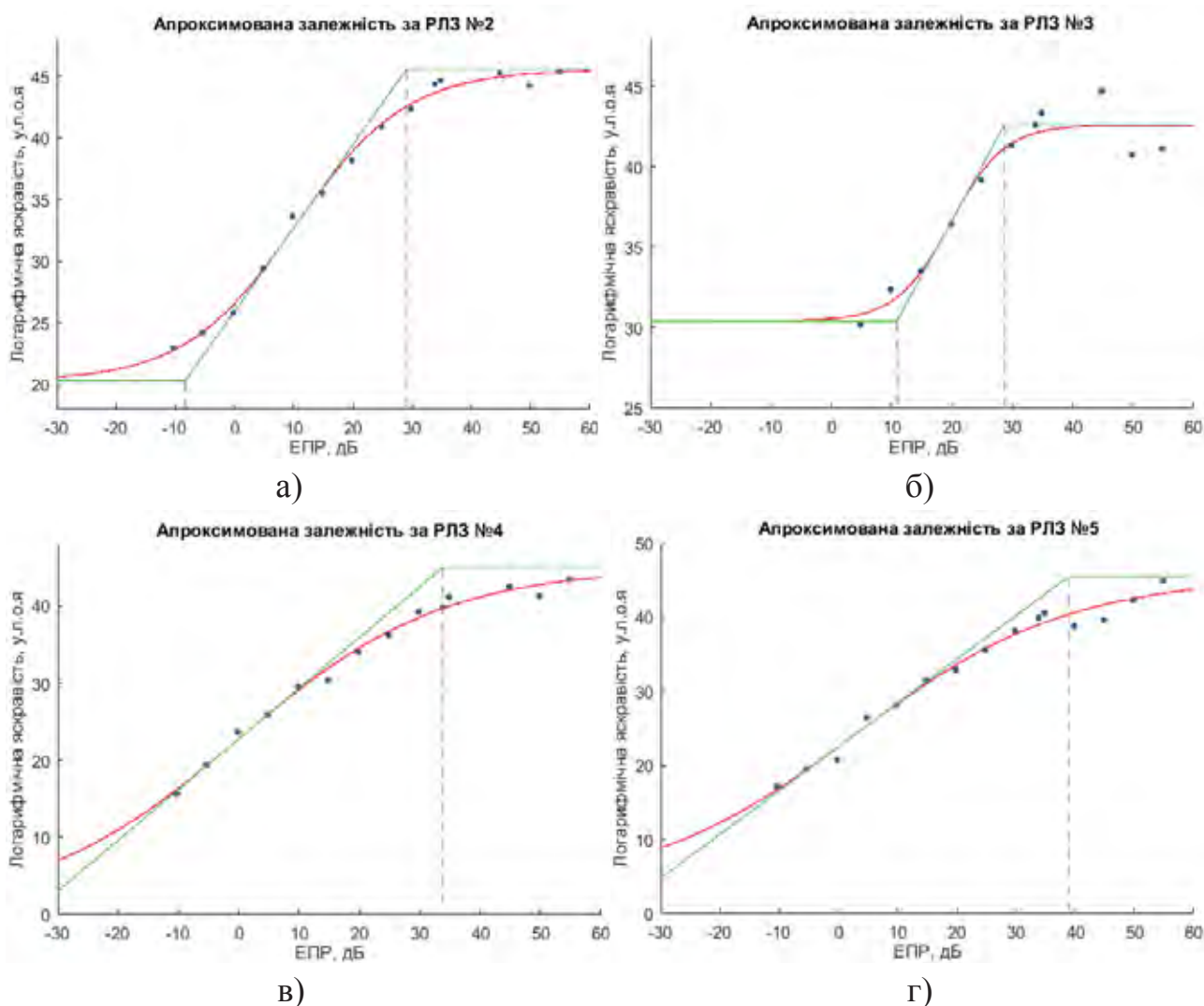


Рис. 2.7 Формування спрощеної кусково-лінійної моделі кривої радіометричної чутливості для знімків №№2–5 (а–г, відповідно)

та впливу фону, відповідно. За цими вимогами нижні межі динамічного діапазону можна вважати визначеними достовірно лише для перших двох знімків, оскільки на РЛЗ №3 відсутні відбивачі з ЕПР меншою за 4,8 дБ. Для порівняння з наступними варіантами врахування яскравості відгуку відзначимо, що сумарний RMSE для даної таблиці становить 4,912.

Таким чином, концепція сигмоїдальної апроксимації дозволяє отримати кілька зручних параметрів, які досить повно характеризують придатність того чи іншого режиму сенсора для виконання конкретних завдань. Однак параметр якості такої апроксимації RMSE, як видно з табл. 2.4, значно відрізняється від знімка до знімка. Це найбільшою мірою обумовлено випадковими коливаннями

яскравості для деяких відбивачів, таких, наприклад, як ТКВ області насичення динамічного діапазону для РЛЗ №3 та №5 (рис. 2.6, б, г, відповідно).

Очевидно це пов'язано з ефектом, розглянутим в розділі 2.2, який полягає в тому, що відгук, центр якого припадає на межу пікселів, не тільки має велику ширину, але й меншу яскравість, за рахунок того, що енергія відгуку виявляється розподіленою на два або більше пікселів. Для компенсації цього ефекту нижче будуть додатково запропоновані кілька варіантів обчислення яскравості кожного відгуку, однак, перш за все, необхідно визначити для яких вхідних даних застосування субпіксельної поправки (2.1) – (2.3) виявиться найбільш ефективним.

У таблиці 2.5 наведені параметри апроксимації для варіанту запропонованого методу, при якому яскравості з знімка отримані з урахуванням сусідніх пікселів в лінійному наближенні, тобто яскравість відгуку обчислена як сума яскравості центрального пікселя та двох додаткових значень: частки яскравості верхнього (нижнього) пікселя та частки яскравості лівого (правого) пікселя. Ці добавки найчастіше від'ємні та відповідні їм частки яскравості отримані безпосередньо з субпіксельної поправки, обчисленої з попереднім

Таблиця 2.5

Параметри апроксимації та відповідні радіометричні характеристики РЛЗ за яскравостями, узятими в лінійному наближенні з сусідніми пікселями пропорційно до субпіксельної поправки, обчисленої з яскравостей в у.л.о.я.

№ знімка	Параметри апроксимуючої моделі					Кількість точок	Параметри динамічного діапазону РСА		
	$Shft_{RCS}$	$Shft_{Br}$	Scl_{RCS}	Scl_{Br}	RMSE		$L_{RCS, \text{дБ}}$	$H_{RCS, \text{дБ}}$	k
1	13,54	21,29	9,41	24,70	0,660	13	-5,28	32,37	0,66
2	10,46	20,37	9,29	25,12	0,693	14	-8,12	29,03	0,68
3	19,89	30,42	4,39	12,16	1,381	11	11,11	28,67	0,69
4	0,00	0,54	16,99	44,43	0,959	14	-33,99	33,99	0,65
5	2,69	2,73	18,17	42,72	1,280	15	-33,65	39,03	0,59

логарифмуванням яскравості РЛЗ. Так, наприклад, якщо скоригований центр відгуку зрушився по одній з координат на половину пікселя, то добавка яскравості складатиме половину від різниці яскравості центрального та сусіднього пікселів.

З таблиці видно, що значення параметрів апроксимації істотно не змінилися. При цьому точність апроксимації в порівнянні з базовим варіантом (стовпчик RMSE в табл. 2.4) покращилася тільки для першого й останнього знімка, в той час як для трьох знімків, що лишилися, точність помітно знизилася. Порівняємо отриманий результат з аналогічними обчисленнями для субпіксельної поправки, обчисленої безпосередньо з яскравості РЛЗ без логарифмування. Ці результати наведені в табл. 2.6.

З таблиці видно, що якісно сигмоїдальна апроксимація в порівнянні з вихідним варіантом істотно не змінилася, як і в попередньому випадку, однак можна помітити, що в порівнянні з табл. 2.5 тільки РЛЗ №2 та №3 відповідають гірші RMSE, в той час як інші знімки оброблені більш вдало. Сумарний RMSE в таблицях 2.5 та 2.6 практично однаковий і становить 4,973 та 5,006, відповідно, що навіть гірше, ніж вихідний варіант.

Таблиця 2.6

Параметри апроксимації та відповідні радіометричні характеристики РЛЗ за яскравостями, узятими в лінійному наближенні з сусідніми пікселями пропорційно поправці, обчисленої безпосередньо з яскравості вихідного зображення

№ знімка	Параметри апроксимуючої моделі					Кількість точок	Параметри динамічного діапазону PCA		
	$Shft_{RCS}$	$Shft_{Br}$	Scl_{RCS}	Scl_{Br}	RMSE		$L_{RCS, \partial B}$	$H_{RCS, \partial B}$	k
1	14,16	21,43	9,49	24,33	0,572	13	-4,82	33,14	0,64
2	10,85	20,62	9,08	24,51	0,749	14	-7,32	29,02	0,68
3	20,29	30,35	4,22	12,01	1,389	11	11,85	28,73	0,71
4	0,00	0,36	17,43	44,54	1,034	14	-34,87	34,87	0,64
5	2,14	2,36	18,47	42,72	1,262	15	-34,80	39,09	0,58

Очевидно, кращому підходу відповідають великі субпіксельні поправки. Передбачалося, що в логарифмічному масштабі яскравості центрального та сусіднього пікселя будуть ближчі, і за рахунок цього величина поправки буде більша, що повинно привести до зниження розкиду вхідних даних. Отримані результати свідчать про протилежне. Це пов'язано з тим, що на РЛЗ в логарифмічному масштабі рівню насичення відповідає яскравість 42–45 у.л.о.я., при цьому фон має яскравість близько 10–20 у.л.о.я, в той час як на вихідному зображенні рівню насичення відповідають яскравості близько 1800–1950 у.о.я., а фон має типову яскравість 40–150 у.о.я. Тому при субпіксельній корекції центру відгуку за вихідними яскравостями фон практично не впливає на кінцевий результат.

Далі розглянемо варіант запропонованого методу, при якому для визначення яскравості відгуку використовується апроксимація гаусіаною за центральним рядком і центральним стовпчиком, аналогічно до підходу, запропонованого в [8] для визначення ширини відгуку на точкову ціль. Канонічний вираз для функції Гауса, наведений в [60], має вигляд:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_G \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_G^2}}, \quad (2.22)$$

де μ – зміщення центру гаусіани відносно початку координат, σ_G – параметр ширини гаусіани (далі сигма-параметр).

Ця функція широко застосовується при статистичному аналізі даних. Оскільки значення цієї функції в точці означає густину ймовірності, дана формула має важливу властивість, яка полягає в тому, що інтеграл в нескінченних межах завжди дорівнює одиниці при будь-яких параметрах σ_G і μ . У контексті запропонованого методу це означає, що необхідно ввести множник для масштабування такої кривої. Його початкове наближення легко отримати, підсумувавши всі значення яскравостей, що апроксимуються (за вирахуванням середньої яскравості фону). Середня яскравість фону *Noise*, при цьому може бути обчислена заздалегідь (див. розділ 2.2) і врахована в запропонованій

моделі. З урахуванням викладеного, вираз для рядкової (стовпчикової) апроксимації відгуку має наступний вигляд:

$$G_{2D}(x) = Noise + \frac{E}{\sigma_G \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma_G^2}\right), \quad (2.23)$$

де *Noise* – середній рівень яскравості підстильної поверхні, *E* – «енергія» відгуку.

Апроксимація проводилася вбудованими засобами пакета MatLab, а саме Curve Fitting Toolbox. В якості вхідних даних було використано однакову кількість відліків як для вертикальної, так і для горизонтальної апроксимації. Оскільки максимум інтенсивності відгуку, як правило, належить одному центральному пікселю, для всіх відгуків використовується область в $1+2 \cdot Fr_{HlfGap}$, де Fr_{HlfGap} – це «половинний проміжок» фрейму, кількість пікселів від центрального до крайнього. Для даного експерименту він дорівнює восьми. Таким чином, для кожної апроксимації було використано 17 відліків. Вихідне значення яскравості відгуку бралось як середнє між максимумом рядкової та стовпчикової гаусіани.

Для отримання виразу для максимуму гаусіани можна знехтувати зміщенням μ , тоді максимум функції буде знаходитись в точці $x = 0$. При цьому аргумент експоненти в (2.23) дорівнює нулю, а сама експонента – одиниці. Також відзначимо, що відповідно до висновків, що зроблені при порівнянні табл. 2.5 і 2.6, апроксимації підлягають вихідні значення яскравості РЛЗ, а отримане в результаті значення максимуму відгуку буде логарифмуватись для зіставлення з ЕПР в дБ. Так вдається мінімізувати вплив шуму та випадкових стрибків яскравості підстильної поверхні. В результаті, вираз для яскравості відгуку (максимуму апроксимуючої моделі) за будь-якою апроксимацією (як рядковою, так і стовпчиковою) матиме вигляд:

$$B_{G_{2D}} = 10 \lg \left(Noise + \frac{E}{\sigma_G \sqrt{2\pi}} \right). \quad (2.24)$$

Таким чином, у запропонованій моделі є чотири параметри для апроксимації кожного відгуку, початкові значення яких обчислюються в наступний спосіб:

Noise – попередньо обчислений для всього знімка, хоча його локальні значення можуть дещо відрізнятися.

E – сума значень відгуку, що апроксимується, з кожного пікселя якого віднімається початкове значення *Noise*.

μ – досить точно обчислюється при субпіксельній корекції центру відгуку.

$\sigma_G = 0.5$, що як правило відповідає типовій ширині відгуку в один піксель (за рівнем половини від максимальної яскравості).

Також для більш точного визначення оптимальних параметрів моделі необхідно обґрунтовано задати межі для її параметрів так, щоб їх діапазони зміни були найменшими, але при цьому включали в себе значення для всіх можливих відгуків. Встановимо *Noise* змінюваним в межах від 0 до середнього значення яскравості вхідних даних, а *E* в межах від 0 до суми значень вхідних даних. З урахуванням того, що субпіксельна корекція центру відгуку дає досить точне його початкове положення, для визначення оптимальних меж зміни μ довелося провести серію експериментів, в ході яких граничні зміщення задавалися від $\pm 0,5$ до $\pm 0,01$ пікселя. Було встановлено, що найкращий сумарний RMSE по всіх п'яти знімкам був отриманий для зміщення $\mu \pm 0,08$ пікселя.

Розглянемо окремо визначення меж для σ -параметра гаусіани.

У ряді випадків, особливо при відносно високому рівні шумів, апроксимуючий алгоритм знаходить оптимальний розв'язок у вигляді практично прямої лінії, що в принципі не може відповідати фактичному відгуку, якщо вхідні дані коректні. Оскільки апроксимуючий алгоритм працює за принципом мінімізації середньоквадратичного відхилення (СКВ) по точках, дані можуть бути апроксимовані такою лінією в двох випадках: якщо σ -параметр гаусіани настільки малий, що вся її значима частина поміщається між відліками, і, якщо σ -параметр гаусіани навпаки настільки великий, що її

пологий максимум включає в себе всі відліки, які апроксимуються. Для розв'язання цієї задачі необхідно визначити область допустимих значень для σ -параметра.

Почнемо з нижньої межі. Сформулюємо формальну умову для мінімального значення σ_G . Прийmemo, що в крайньому випадку в центральному пікселі відгуку сконцентровано не більше 95 % енергії відгуку (його горизонтального або вертикального перетину). Тоді з (2.23) можна сформулювати нерівність для мінімального значення σ -параметра з межею $Lvl = 0.95$. Зауважимо також, що яскравість фону та множник енергії відгуку можуть бути опущені, а відстань до межі центрального пікселя можна задати як $a = \pm 0.5$ за умови, що зміщення центру відгуку μ буде нульовим:

$$\frac{1}{\sigma_G \sqrt{2\pi}} \int_{-a}^a e^{-\frac{x^2}{2\sigma_G^2}} dx \leq Lvl. \quad (2.25)$$

Використавши [61] знайдемо первісну та підставимо межі інтегрування:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{a}{\sigma_G \sqrt{2}} \right) - 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{-a}{\sigma_G \sqrt{2}} \right) \right) &\leq Lvl; \\ \operatorname{erf} \left(\frac{a}{\sigma_G \sqrt{2}} \right) &\leq Lvl. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Далі виразимо σ_G :

$$\sigma_G \geq \frac{a}{\sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1} Lvl}. \quad (2.27)$$

Також необхідно сформулювати правило й для верхньої межі σ_G . Прийmemo, що в крайньому випадку в межах рядка (або стовпця) сконцентровано не менше 95 % енергії перетину відгуку. Очевидно, вираз буде ідентичним із єдиним зауваженням, що зміниться знак нерівності та межа інтегрування. Таким чином, умова для верхньої межі σ -параметра для двовимірної апроксимації має вигляд:

$$\sigma_G \leq \frac{Fr_{HlfGap}}{\sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1} Lvl}. \quad (2.28)$$

З урахуванням всіх наведених вимог була розрахована сигмоїдальна залежність для п'яти досліджуваних РЛЗ, параметри якої наведені в таблиці 2.7. З таблиці видно, що якість сигмоїдальної моделі, в цілому, стала нижче в порівнянні навіть з вихідним варіантом (табл. 2.4). При цьому сумарний RMSE по всіх знімках підвищився до 5,286. Це пов'язано з тим, що СКВ, як мінімізований в процесі апроксимації параметр, обчислюється тільки в точках, що відповідають центрам пікселів. При цьому, чим далі максимум моделі від центру пікселя, тим менше обумовленим виявляється значення моделі в максимумі, оскільки основний вклад в СКВ вносять два сусідніх (до максимуму моделі) відліки. Так, якщо фактичний максимум відгуку опиняється на межі двох пікселів, то його інтенсивність в максимумі буде залежати не від енергії відгуку E , а від того, на скільки швидко відгук спадає до країв. З урахуванням того, що в експерименті багато відгуків шириною в один піксель, це призводить до завищених значень інтенсивності максимуму відгуку для ТКВ з найменшими ЕПР. Для розв'язання цієї задачі було запропоновано проводити інтерполяцію вхідних даних аналогічно до [8].

Таблиця 2.7

Параметри апроксимації та відповідні радіометричні характеристики РЛЗ за яскравостями, узятими як середній максимум відгуку, апроксимованого гаусіаною за центральними рядком і стовпцем

№ знімка	Параметри апроксимуючої моделі					Кількість точок	Параметри динамічного діапазону РСА		
	$Shft_{RCS}$	$Shft_{Br}$	Scl_{RCS}	Scl_{Br}	RMSE		$L_{RCS, dB}$	$H_{RCS, dB}$	k
1	13,30	21,92	9,39	24,52	0,787	13	-5,47	32,08	0,65
2	11,45	21,38	9,10	24,76	0,736	14	-6,74	29,64	0,68
3	19,73	30,54	4,46	12,50	1,507	11	10,81	28,64	0,70
4	13,92	18,22	12,01	26,34	0,754	14	-10,10	37,94	0,55
5	14,40	17,24	12,41	27,27	1,502	15	-10,43	39,23	0,55

MatLab має вбудовані засоби попередньої обробки вхідних даних, в тому числі функції для інтерполяції декількома способами. Спосіб "nearest" присвоює інтерпольованим відлікам значення найближчого вихідного відліку. Це формує інтерпольовані дані ступінчастої форми, що дозволяє досить ефективно боротися з описаним вище ефектом. Спосіб "linear" формує проміжні відліки в лінійному наближенні до сусідніх вихідних відліків – також досить ефективний підхід. Способи інтерполяції "spline" та "cubic" формують проміжні відліки за допомогою сплайнів і поліномів третього ступеня відповідно. Такий підхід вважається досить перспективним, хоча ці методи не показали очікуваних високих результатів.

Також можливо встановити кількість проміжних відліків для процедури інтерполяції. Ця кількість завжди на один менша за кількість інтервалів, що задається, яка в свою чергу завжди кратна до двох в цілому ступені, і в даному експерименті змінювалася від 2^1 до 2^5 . З усіх режимів найменший сумарний RMSE за всіма зображеннями показав режим лінійної інтерполяції з 31-ю проміжною точкою, хоча 7 проміжних точок показали практично ідентичний результат. Яскравості відгуків також обчислювалися з усередненням варіантів апроксимації за центральними рядком і стовпцем. Параметри сигмоїдальної апроксимації в цьому режимі зведені в таблицю 2.8.

Таблиця 2.8

Параметри апроксимації та відповідні радіометричні характеристики РЛЗ за яскравостями, отриманими за допомогою рядкової та стовпчикової апроксимацій відгуку з попередньою лінійною інтерполяцією на 2^5 інтервалів

№ знімка	Параметри апроксимуючої моделі					Кількість точок	Параметри динамічного діапазону PCA		
	$Shft_{RCS}$	$Shft_{Br}$	Scl_{RCS}	Scl_{Br}	RMSE		$L_{RCS}, \text{дБ}$	$H_{RCS}, \text{дБ}$	k
1	13,07	20,63	9,74	25,41	0,656	13	-6,41	32,55	0,65
2	9,67	18,84	9,84	26,79	0,701	14	-10,00	29,34	0,68
3	19,89	30,13	4,39	12,35	1,484	11	11,12	28,66	0,7
4	13,91	17,67	11,52	26,02	0,690	14	-9,12	36,95	0,57
5	11,23	12,97	14,35	31,41	1,349	15	-17,48	39,94	0,55

З таблиці видно, що в порівнянні з вихідним варіантом (табл. 2.4) якість апроксимації сигмоїдою помітно краща тільки для РЛЗ №1 і №4, в той час, як для інших РЛЗ вона незначно знизилася. Зауважимо також, що сумарний RMSE зменшився з 4,912 до 4,879.

Спробуємо далі розвинути підхід з апроксимацією відгуків і обробляти вже двовимірні масиви (17×17 пікселів). Це повинно помітно ускладнити математичну модель, але при цьому і квадратично збільшити кількість вхідних даних для апроксимації відгуку. Прийнемо модель, як функцію Гауса по кожному з вимірів. За аналогією з (2.23) вона матиме вигляд:

$$G_{3D}(x, y) = Noise + \frac{E}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) \exp\left(-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right), \quad (2.29)$$

де $Noise$ і E – шум і «енергія» відгуку, відповідно, як у випадку одновимірної моделі, μ_x , μ_y – зміщення центру (максимуму) двовимірної гаусіани по осі x і по осі y , відповідно. σ_x , σ_y – сигма-параметри x та y проекції двовимірної Гаусіани, відповідно.

Вираз для яскравості відгуку для такої моделі може бути отримано аналогічно (2.24) з формули (2.29) для двовимірної функції Гауса:

$$B_{G_{3D}} = 10 \lg \left(Noise + \frac{E}{\sigma_x\sigma_y\sqrt{2\pi}} \right). \quad (2.30)$$

Таким чином, модель має шість параметрів. Далі необхідно визначити для них межі змін і початкові значення. Межі та початкові значення для $Noise$ і E залишаться такі ж, як і для випадку одновимірної моделі, з єдиною обмовкою – обчислення стартової та максимальної потенційної енергії відгуку потребує вже подвійного підсумування (по рядках і по стовпцях). Граничні зміщення μ_x і μ_y мають ідентичні один одному межі зміни, які також були підібрані експериментальним шляхом і рівні $\pm 0,08$ пікселя. При цьому залежність сумарного RMSE від меж змін зміщення двовимірної гаусіани виявилася більш яскраво вираженою, ніж для одновимірного випадку.

Межі сигма-параметрів σ_x і σ_y також ідентичні й отримані з таких міркувань. Нехай за аналогією з (2.28) в крайньому випадку в центральному пікселі відгуку сконцентровано не більше 95 % енергії всього відгуку. Оскільки піксель має однаковий розмір як по осі x , так і по осі y , будемо вважати, що $\sigma_x = \sigma_y$. Тоді з (2.29) можна сформулювати нерівність для визначення мінімального значення σ -параметра з межею $Lvl = 0.95$, яка матиме вигляд:

$$\frac{1}{2\pi\sigma_x^2} \int_{-a}^a \int_{-a}^a e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_x^2}} dx dy \leq Lvl. \quad (2.31)$$

Для кожного інтеграла отримаємо первісні аналогічно (2.26):

$$\begin{aligned} \operatorname{erf}\left(\frac{a}{\sigma_x\sqrt{2}}\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{a}{\sigma_x\sqrt{2}}\right) &\leq Lvl; \\ \operatorname{erf}\left(\frac{a}{\sigma_x\sqrt{2}}\right) &\leq \sqrt{Lvl}. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Цей вираз ідентичний (2.26) з точністю до $\sqrt{Lvl}$. Далі визначимо σ_x :

$$\sigma_x \geq \frac{a}{\sqrt{2}\operatorname{erf}^{-1}\sqrt{Lvl}}. \quad (2.33)$$

Також необхідно сформулювати правило і для верхньої межі σ_x . Приймемо, що в крайньому випадку в межах фрейму сконцентровано не менше 95 % енергії відгуку. За аналогією з (2.28) з (2.33) отримаємо умову:

$$\sigma_x \leq \frac{Fr_{HlfGap}}{\sqrt{2}\operatorname{erf}^{-1}\sqrt{Lvl}}. \quad (2.34)$$

Початкове значення σ_x також дорівнює σ_y і становить $\sigma_G = 0,5$, що приблизно відповідає ширині відгуку в один піксель (за рівнем половини амплітуди відгуку) для кожного з перетинів двовимірної моделі.

Крім того, для даного варіанту апроксимації двовимірного відгуку також був проведений ряд експериментів для пошуку оптимального режиму інтерполяції. Були випробувані всі чотири описаних способи при аналогічному

розбитті від 2^1 до 2^5 проміжних інтервалів. Оптимальним виявився режим "linear" з 31-ю проміжною точкою між кожною парою основних відліків.

Його сумарний RMSE за всіма п'ятьма знімками склав 5,056, що трохи вище базового варіанту, хоча при цьому точність сигмоїдальної апроксимації для першого та четвертого знімка вища, ніж для найкращого варіанта (з апроксимацією відгуків гаусіаною по рядку та стовпцю – табл. 2.8). Причина цього результату в тому, що на цілях з низькою ЕПР кожен відгук містить більше пікселів з яскравостями фонового шуму, тому алгоритм, що апроксимує відгук, знаходить оптимальними такі параметри моделі, при яких енергія відгуку E дорівнює нулю, а рівень шуму $Noise$ забезпечує мінімальне СКВ для всіх відліків. Всі параметри сигмоїдальних моделей з апроксимацією двовимірних відгуків наведені в таблиці 2.9.

Таким чином, можна зробити висновок, що найбільш ефективними з усіх розглянутих способів є: спосіб з апроксимацією відгуків гаусіаною за центральними рядком і стовпцем, спосіб без апроксимації та спосіб з апроксимацією двовимірних відгуків двовимірною функцією Гауса.

Таблиця 2.9

Параметри апроксимації та відповідні радіометричні характеристики РЛЗ за яскравостями, отриманими за допомогою двовимірної апроксимації відгуку з попередньою лінійною інтерполяцією на 2^2 інтервалів

№ знімка	Параметри апроксимуючої моделі					Кількість точок	Параметри динамічного діапазону РСА		
	$Shft_{RCS}$	$Shft_{Br}$	Scl_{RCS}	Scl_{Br}	RMSE		$L_{RCS}, \text{дБ}$	$H_{RCS}, \text{дБ}$	k
1	12,58	19,99	10,11	26,07	0,629	13	-7,65	32,80	0,64
2	8,66	17,10	10,49	28,67	0,797	14	-12,32	29,64	0,68
3	19,91	29,88	4,40	12,41	1,566	11	11,11	28,71	0,71
4	15,62	19,16	10,92	24,34	0,667	14	-6,22	37,47	0,56
5	14,15	16,07	13,12	27,96	1,397	15	-12,09	40,39	0,53

2.4 Висновки до розділу 2

1. Запропоновано новий спосіб визначення роздільної здатності РСА космічного базування за радіолокаційним зображенням підстильної поверхні. Його сутність полягає у вимірюванні ширини відгуку на точкову ціль не за зображенням цілі, як у найбільш поширеному методі, а за знайденим ядром зворотного згортання. Перевага способу полягає в свободі вибору розміру еталонного відбивача та в більш високій точності. Єдине обмеження для найбільш детальних режимів роботи РСА полягає в необхідності отримати доступ до параметрів алгоритму автофокусування. Крім того, цей спосіб дозволяє при вимірюванні роздільної здатності РСА здійснити перехід від одного або кількох дорогих транспондерів до великої кількості тригранних кутникових відбивачів. Це, в свою чергу, дозволяє не тільки збільшувати точність вимірювань шляхом усереднення, а і проводити вимірювання для різних ділянок знімка та при різних супутніх умовах. У порівнянні з найбільш поширеним методом [8], запропонований спосіб визначення ширини відгуку на точкову ціль забезпечує в середньому на 18 % меншу невизначеність за поперечною дальністю та на 13 % за азимутом. Даний метод впроваджено при наземному забезпеченні космічної системи 710 КС (додаток Б).
2. Запропоновані нові параметри радіометричних характеристик РСА, що мають практичну цінність при виборі конкретного космічного сенсора та його режиму роботи для розв'язання конкретних тематичних задач: точка насичення приймача РСА, точка впливу фону, коефіцієнт пропорційності лінійної ділянки передатної функції.
3. Запропоновано практичний спосіб визначення цих параметрів з космічних знімків Землі. В його основу покладено сигмоїдальну математичну модель залежності яскравості відгуку на РЛЗ від фактичної ЕПР використаної для цього цілі. Для реалізації цього способу досліджені моделі апроксимації відгуків від тригранних кутникових відбивачів для отримання точнішого значення їх яскравості. Даний метод дозволяє забезпечити простежуваність

яскравості пікселя на знімку до метрологічних одиниць ЕПР (м^2 або дБ) із заданою невизначеністю в нижній і середній частині динамічного діапазону сенсора. В результаті обробки п'яти РЛЗ, отриманих сенсором TerraSar-X з метаданими, що додаються, найбільш ефективними виявилися три способи:

- З апроксимацією відгуку функцією Гауса за центральними рядком і центральним стовпцем. Цей спосіб доцільно використовувати для випадків високих фонових шумів.
- Без апроксимації відгуку (базовий варіант). Цей спосіб доцільно використовувати у випадках, коли відносний рівень фону невідомий, або значно відрізняється від знімка до знімка.
- З апроксимацією двовимірного відгуку двовимірною функцією Гауса. Цей спосіб доцільно використовувати для даних з низьким рівнем фонових шумів.

Результати досліджень, відображених у розділі 2, доповідалися на конференціях [15, 62–69] і опубліковані в статтях [18, 70–75].

РОЗДІЛ 3

ВИКОРИСТАННЯ БУДІВЕЛЬ ДЛЯ ЗОВНІШНЬОГО ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО КАЛІБРУВАННЯ РАДІОЛОКАТОРІВ, АЛГОРИТМ ПОШУКУ БУДІВЕЛЬ НА МОНОХРОМНИХ СУПУТНИКОВИХ ЗОБРАЖЕННЯХ

В даному розділі показана можливість використання для зовнішнього експлуатаційного калібрування РСА космічного базування наземних антропогенних об'єктів. Представлені напрацювання по використанню металевих будівель господарського призначення в якості реперів для геометричної корекції (прив'язки) знімків, а також дослідження з використання для радіометричного калібрування покрівельних матеріалів з регулярною структурою (зокрема покрівельного шиферу).

Для швидкого виявлення всіх об'єктів, придатних для експлуатаційного калібрування космічних РСА, розроблений новий метод поетапної обробки зображень для виявлення будівель на чорно-білих космічних знімках дистанційного зондування Землі в різних діапазонах електромагнітних хвиль. Метод заснований на використанні особливостей форми більшості антропогенних об'єктів, які полягають в тому, що їх межі є прямі лінії, розташовані під прямим кутом одна до одної. Представлення зображення як роздільних масивів величини та напрямку градієнта яскравості дозволяє виявляти об'єкти як у випадку білих об'єктів на чорному фоні, так і у випадку чорних на білому. Розроблений двовимірний адаптивний фільтр зображення дозволяє виявити прямі краї об'єкта, навіть якщо фрагмент зображення має низький контраст і високий рівень шумів. Подальша обробка тільки списку відрізків, на відміну від обробки всього растрового зображення, дозволяє істотно скоротити час обробки. В результаті отримуємо обмежений набір об'єктів, форма яких близька до антропогенних. Запропонований метод може бути використаний в якості алгоритму сегментації зображення та формування

на основі сегментів гіпотез для подальшого розпізнавання за допомогою нейронних мереж. Метод також продуктивний як засіб автоматизації та підвищення ефективності підготовки оператором тренувальної вибірки зображень для нейронної мережі.

3.1 Геометрична прив'язка радіолокаційних знімків за допомогою об'єктів господарського призначення

Для підвищення точності та забезпечення співставлення даних радіолокації високої роздільної здатності з аерокосмічних носіїв, отриманих в різні часові проміжки та при різних погодних умовах, а також для технічного забезпечення нормативної бази ДЗЗ, розглянемо можливості використання в якості реперів і засобів калібрування сенсорів в процесі їх експлуатації об'єктів господарської діяльності людини. Це дозволяє забезпечити задану точність кінцевих результатів обробки даних для представлення їх споживачеві. Докладно розглянемо можливості використання в такій якості двох видів господарських об'єктів – вертикальних металевих водонапірних веж і розташованих горизонтально майже циліндричних ємностей (цистерн) – резервуарів води іригаційних систем і контейнерів для зберігання хімічних добрив, географічна прив'язка яких здійснюється в наземних умовах із застосуванням високоточного GPS-приймача.

На рис. 3.1 представлені фрагменти радіолокаційних знімків РСА (S-діапазону, елемент розділу близько 1м, кут ковзання близько 30°), що містять радіолокаційні сигнали від дзеркальної антени Ø100м (а), водонапірної вежі (б) а також цистерн іригаційної системи, розташованих перпендикулярно сліду траси КА (в) і під кутом до траси (г). Як видно, всі вони досить надійно ідентифікуються на РЛЗ.

Оскільки організація великої кількості льотних експериментів вкрай нерентабельна, дослідження проводилися в лабораторії над моделями з застосуванням методу електродинамічної подібності.

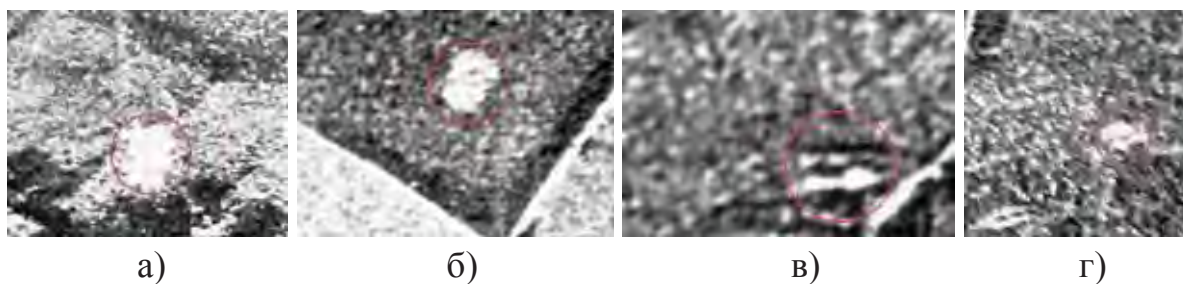


Рис. 3.1 РЛЗ металевих об'єктів господарського призначення

Експерименти проведені на моделях наземних об'єктів господарського призначення, поодиноких (віддаленість від інших об'єктів і дерев – не менше $5l$, де l – максимальний лінійний розмір досліджуваного об'єкта) на території Скрипаївського підсупутникового полігону кафедри прикладної електродинаміки факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна та прилеглих до нього територіях. Досліджувалися ефективні поверхні розсіяння моделей двох видів широко поширених металевих наземних об'єктів – водонапірної вежі та цистерни. Типовий зовнішній вигляд одного з них – металевої водонапірної вежі показаний на рис. 3.2. Її висота становить 14 м, діаметри нижнього та верхнього циліндрів рівні 2 і 3,5 м, а висоти, відповідно, 10 і 4 м. Діаметр і довжина другого досліджуваного об'єкта – цистерни складають 2 м і 6 м, відповідно. Форма її близька до форми циліндра.



Рис. 3.2 Типовий вид наземного об'єкта «водонапірна вежа»

Експерименти проводилися в безлунній камері з коефіцієнтом безлуння -40дБ методом електродинамічної подібності [76]. В експерименті використовувалися серійні генератори стандартних сигналів і пірамідальні рупорні антени з однаковою шириною головної пелюстки діаграми спрямованості в Е- та Н-площинах спостереження.

Як відомо [76], використання методу електродинамічної подібності вимагає виконання наступних вимог: пропорційне зменшенню розмірів об'єкта зменшення довжини хвилі та шорсткості моделі й підстильної поверхні, незмінність діелектричної та магнітної проникності об'єкта й підстильної поверхні як на натурній частоті, так і на частоті моделі; збільшення електричної провідності моделі пропорційно масштабному множнику.

Після вимірювання геометричних параметрів об'єктів були виготовлені їх зменшені моделі. У безлунній камері вимірювалися ЕПР моделей під різними кутами огляду та при різних типах поляризації. В зв'язку з високою провідністю використаного в моделі металу (алюміній) остання вимога принципу електродинамічної подібності не враховувалась.

Для проведення модельного експерименту була обрана довжина хвилі 9 мм як модельний аналог довжини хвилі радіолокатора, що дорівнює 9 см. У якості підстильних поверхонь були обрані ґрунти, що поширені на території полігону: суглинок і лісовий опідзолений ґрунт. Діелектричні характеристики ґрунтів на довжині хвилі 9 см в умовах різної вологості були виміряні *in situ* радіометричним методом [77] і наведені в табл. 3.1. Як модельний аналог ґрунтів для експерименту були взяті дві марки електротехнічного скла з комплексними діелектричними проникностями, близькими до вимірюваних характеристик ґрунтів [78] і параметрами шорсткості, що не перевищують 0,05 мм. Магнітна проникність ґрунтів і скла дорівнює одиниці.

Таблиця 3.1.

Комплексна діелектрична проникність підстильних поверхонь

Вид поверхні		Вологість 1 %	Вологість 20 %
Ґрунти	Суглинок	3,72 - i 0,35	17,08 - i 0,88
	Лісовий підзол	3,94 - i 0,27	14,76 - i 0,73
Електротехнічне скло [78]		C5-1	C77 -1
		3,80 - i 0,03	13,00 - i 0,13

Виміряні модулі коефіцієнтів розсіяння ґрунтів і їх модельних аналогів в залежності від кута зондування при двох типах поляризації – вертикальній і горизонтальній. Вимірювання коефіцієнтів розсіяння ґрунтів проводилось на довжині хвилі 9 см, електротехнічне скло досліджувалися на довжині хвилі 9 мм під кутами зондування 30° і 75° від горизонталі при вертикальній і горизонтальній поляризації. Результати експериментів наведені в табл. 3.2. Кути обрані як граничні випадки для сканування місцевості орбітальним РСА. Передбачається, що оскільки в досліджуваних моделях відсутні періодичні структури, коефіцієнти розсіяння при проміжних кутах місця не будуть істотно меншими, ніж у граничних випадках.

Як видно, величина модулів коефіцієнтів відбиття електротехнічного скла С5-1 під обома кутами зондування та на обох поляризаціях близькі до таких для сухих ґрунтів, а скло марки С77-1 в цьому відношенні може служити аналогом досліджуваних ґрунтів із вологістю 20 %. На вертикальній поляризації при куті зондування 30° коефіцієнт відбиття сухих ґрунтів і скла С5-1 близький до нуля. Коефіцієнти відбиття при інших кутах зондування й орієнтаціях площини поляризації електромагнітної хвилі для скла С5-1 і сухих ґрунтів також дуже близькі. На горизонтальній поляризації модулі коефіцієнтів відбиття вологих ґрунтів і скла С77-1 при тому ж куті зондування близькі до 0,8.

Таблиця 3.2.

Модуль коефіцієнта відбиття ґрунтіві електротехнічних стекл

Вид поверхні		Вологість 1 %				Вологість 20 %			
Поляризація		Вертикальна		Горизонтальна		Вертикальна		Горизонтальна	
Кут місця		30°	75°	30°	75°	30°	75°	30°	75°
Ґрунти	Суглинок	0,01	0,25	0,52	0,28	0,32	0,62	0,79	0,62
	Лісовий підзол	0,01	0,25	0,52	0,30	0,25	0,57	0,75	0,57
Електротехнічне скло		С5-1				С77-1			
		0,002	0,28	0,53	0,30	0,29	0,60	0,76	0,58

При куті зондування 75° модулі коефіцієнтів відбиття на вертикальній і горизонтальній поляризації близькі до 0,6 для вологих ґрунтів. Таким чином, вибір саме цих кутів зондування для експериментального дослідження не тільки перекриває практично весь діапазон використовуваних на практиці кутів, але й дає можливість найбільш повно розглянути вплив на результат експерименту типу поляризації зондувального сигналу. Наведені в табл. 3.2 результати вимірювань в межах похибки експерименту збігаються з отриманими розрахунковими даними для модуля коефіцієнтів відбиття півпростору з відповідними електродинамічними характеристиками та даними літератури [27].

При вимірюванні ЕПР принципом електродинамічної подібності передбачаються корекційні коефіцієнти для значень, що виміряні на зменшеній моделі та відповідних їм фактичних ЕПР реальних об'єктів. Це обумовлено тим, що ЕПР залежить, головним чином, від форми та провідності покриття досліджуваного об'єкта. При цьому залежність ЕПР від довжини хвилі (у формулах для об'єктів простої форми та відбивачів) існує тільки для обчислення дифракційних ефектів. Відзначимо також, що на практиці використовуються відбивачі апертурного типу, що мають певну еквівалентну апертуру. Двовимірність еквівалентної апертури є причиною того, що формули для ЕПР об'єктів простої геометричної форми [79] завжди включають квадрат довжини хвилі, оскільки множник має бути врахований для кожного виміру. Таким чином, для даного експерименту коригувальний коефіцієнт для ЕПР вимірюваного в m^2 склав 10^2 рази, де 10 – масштабний коефіцієнт, тобто відношення довжин хвиль для ЕПР натурних об'єктів, що мають бути знайдені, та ЕПР їх моделей.

Калібрування обладнання було проведено з використанням набору кутникових відбивачів. Похибка вимірювання ефективної площі розсіяння на $\lambda = 9\text{мм}$ становила $0,1\text{ м}^2$, що відповідає 10 м^2 для реальних об'єктів. Ефективна площа розсіяння моделей цистерн у вільному просторі складала $0,4\text{ м}^2$, що відповідає ефективній поверхні розсіяння самого об'єкта, яка

дорівнює 40 м^2 (16,02 дБ). ЕПР моделі вежі та самої вежі становили, відповідно, 1,2 і 120 м^2 (20,79 дБ).

На діелектричний плоский лист круглої форми з електротехнічного скла радіусом 2,8 м по аналогії з Top-hat reflector [80] поміщалася модель досліджуваного металевих об'єкта. Для обох видів моделей досліджувалася залежність від азимутального кута зондування.

Незважаючи на наявність дрібних металевих деталей (модель сходів, громовідводи) для моделі водонапірної вежі під жодним з кутів зондування результати не залежали від азимутального кута зондування.

Для моделі цистерни під кутами зондування, близькими до 30° і 75° від горизонту, спостерігалися відмінності в ЕПР на 1–2 порядки в залежності від азимутального кута зондування, який відрховується від осі циліндра. Дані результатів зондування під кутом 30° наведені в табл. 3.3, результати зондування під кутом 75° зведені до таблиці 3.4.

Оскільки експеримент був поставлений з метою дослідити придатність деяких металевих об'єктів господарського призначення для використання в якості реперів для геометричної корекції знімків, необхідності докладного вимірювання діаграми зворотного розсіювання не існувало. Необхідно, однак, дослідити можливість виявлення цих об'єктів на РЛЗ з різних ракурсів. З цієї причини вихідними даними експерименту з дослідження азимутальної діаграми зворотного розсіювання цистерни послужили ЕПР з ракурсів «бік» і «торець».

Таблиця 3.3.

ЕПР (м^2) досліджуваних об'єктів при куті зондування 30° від горизонту

Ґрунт	Цистерна				Водонапірна вежа	
	горизонтальна поляризація		вертикальна поляризація		горизонтальна поляризація	вертикальна поляризація
	бік	торець	бік	торець		
сухий	990	10	20	10	2000	3700
вологий	2500	10	630	10	2000	3700

Таблиця 3.4.

ЕПР (м²) досліджуваних об'єктів при куті зондування 75° від горизонту

Ґрунт	Цистерна				Водонапірна вежа	
	горизонтальна поляризація		вертикальна поляризація		горизонтальна поляризація	вертикальна поляризація
	бік	торець	бік	торець		
сухий	1800	10	60	10	3840	3990
вологий	3050	250	870	90	3840	3990

Фактично ці величини являють собою усереднені показники в діапазонах азимутальних кутів "бік": 90 ± 10 град. і "торець": 0 ± 10 град.

Усереднення всіх даних експерименту проводилося за двадцятьма рознесеними в часі замірами. За рахунок цього всі спостережувані від позиції до позиції зміни ЕПР статистично достовірні. Видно, що ЕПР об'єкта «водонапірна вежа» не залежить від вологості ґрунту, проте змінюється в залежності від типу поляризації зонduючого сигналу та кута зондування.

Результати проведених експериментів збігаються з даними розрахунків для циліндра кінцевої довжини [81] та даними для об'єктів іншого призначення, близьких за формою до досліджуваних [27].

Стійка висока ЕПР і відсутність в межах похибки експерименту залежності ЕПР водонапірної вежі від вологості ґрунту, на якій вона розташована, дає підстави розглядати такий об'єкт як надійний репер для зовнішнього експлуатаційного калібрування радіолокаторів з високою роздільною здатністю в період їх експлуатації на орбіті.

Внаслідок змін відношення δ/λ , де δ – характерні лінійні розміри нерівностей поверхні об'єкта, ЕПР в значній мірі залежить від довжини хвилі. Іншими словами, значення ЕПР досліджуваних наземних об'єктів близькі лише в такому діапазоні довжин хвиль, де відношення δ/λ для об'єкта та підстильної поверхні, так само як і діелектричні характеристики підстильної поверхні, істотно не відрізняються один від одного. Внаслідок малої варіабельності зазначених величин в межах похибки експерименту результати вимірювань

можуть бути поширені на піддіапазон А діапазону S. Для інших частот зонduючого сигналу необхідно проводити додаткові модельні експерименти.

Таким чином, типові водонапірні вежі в умовах експлуатації космічних засобів ДЗЗ високої роздільної здатності в радіодіапазоні застосовні як репери, тоді як цистерни доцільно використовувати лише за відсутності достатньої кількості більш придатних об'єктів і тільки у випадках їх розташування таким чином, щоб вони були перпендикулярні до напрямку зондування.

Застосування розглянутих наземних об'єктів для топографічного прив'язування даних ДЗЗ і експлуатаційного калібрування апаратури зручно завдяки порівняльно простому експериментальному визначенню їх ЕПР методами, досить добре апробованими на практиці. Це дозволяє істотно зменшити обсяги натурних польотних експериментів. Крім того, значна кількість розглянутих елементів в рамках однієї сцени, що часто має місце на практиці, дозволяє домогтися високої точності кінцевого продукту ДЗЗ, необхідної для його практичного використання.

3.2 Калібрування радіометричних характеристик РСА за допомогою типових покрівельних матеріалів

Продукція засобів ДЗЗ радіолокаційного діапазону, зокрема РСА, використовується для розв'язання низки прикладних задач як військового, так і цивільного призначення. Відзначимо, що оброблювані зображення об'єктів в рамках розв'язання цих задач поділяють на кілька типів, виходячи з їх розміру відносно елемента розділення РЛЗ. Така класифікація визначена в [8] наступним чином:

Точкові цілі – цілі, лінійні та кутові розміри яких значно менші за елемент розділення радіолокатора на місцевості. Зазвичай це малорозмірні об'єкти (опори ліній електропередач, дрібні судна на воді, автомобілі тощо), які спостерігаються в режимах низького розділення РСА.

Групові цілі – співмірні з елементом розділення радіолокатора, або займають кілька елементів: будівлі, великі кораблі, мости, або об'єкти техніки, які спостерігаються в детальних режимах високого просторового розділення РСА (близько 1 м).

Розподілені цілі (площинні, лінійні) – займають багато елементів розділення та зазвичай характеризуються однорідністю властивостей локального статистичного розподілу яскравості. До них відносяться, наприклад, сільськогосподарські угіддя, лісові масиви, схвильована морська поверхня, а також великі неоднорідності на однорідній поверхні (кільватерні сліди, плями забруднень та ін.). Розподілені об'єкти, в свою чергу, поділяють на лінійно-протяжні та площинні об'єкти. Якщо ширина об'єкта менша за роздільну здатність радіолокатора, то такий об'єкт відносять до лінійно-протяжних (кабелі, огорожі, дороги та ін.). Якщо ж і ширина і довжина об'єкта перевищують роздільну здатність радіолокатора, то такі об'єкти називають площинними. У літературі часто під розподіленими цілями розуміються саме площинні об'єкти.

Найбільша кількість прикладних задач пов'язана саме з аналізом площинних об'єктів. Для таких об'єктів не зовсім коректно застосовувати поняття ефективної площі розсіювання, тому що в цьому випадку більш доречно говорити або про ЕПР, що припадає на одиницю площі, або про коефіцієнт відбиття. Згідно [8], така величина являє собою питому ефективну площу розсіювання (ПЕПР) – відношення ЕПР елемента розділення на місцевості до його геометричної площі:

$$\sigma^0 = \sigma / [\rho_x \rho_y], \quad (3.1)$$

де ρ_x, ρ_y – лінійна роздільна здатність радіолокатора на місцевості вздовж і поперек сліду траси КА в метрах відповідно.

Розподілені об'єкти значної площі складають більшу частину підстильної поверхні (акваторії морів і океанів, ліси, агроценози тощо), та точна оцінка

значень їх абсолютних і відносних ПЕПР, а також її метрологічний контроль є важливою складовою розв'язання багатьох тематичних задач.

У свою чергу для зовнішнього експлуатаційного калібрування ПЕПР необхідні еталонні відбивачі великих розмірів, особливо для режимів, відмінних від детального та прожекторного. В рамках досліджень недорогих способів зовнішнього метрологічного контролю сенсорів РСА [82], нами були запропоновані недорогі та технологічні матеріали для виготовлення спеціальних тестових майданчиків розміром 5х5 м по 10 шт. в наборі (мірі). Такий підхід дозволяє проводити калібрувальні вимірювання з найвищою точністю, проте на практиці є досить дорогим. Відзначимо, що в [82] в якості дешевого доступного матеріалу з високою ПЕПР пропонується покрівельний шифер хвилястої форми. Підбір матеріалу для цієї мети насправді не тривіальна задача, однак накопичений досвід і зразки РЛЗ ряду радіолокаторів дозволили звести вибір до кількох варіантів.

Для калібрування радіометричних властивостей РСА S-діапазону нами був запропонований шифер марки СВ 40/150 (ГОСТ 30340-95). Такий вибір обумовлений високою яскравістю таких дахів на РЛЗ, зокрема на знімках одного з перших РСА космічного базування. За даними першого РЛЗ РСА «Меч-КУ» (рис. 3.3): через наявність брегівського розсіяння [8] шифер на

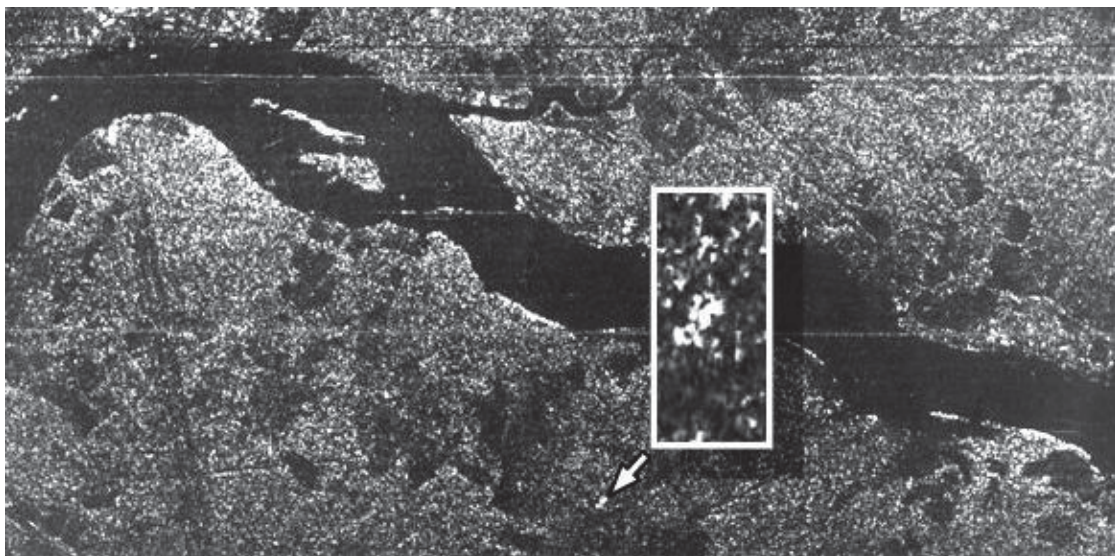


Рис. 3.3 Фрагмент першого РЛЗ РСА «Меч-КУ» (збільшено РЛЗ декількох будівель з шиферними дахами)

дах, що потрапили на РЛЗ деяких будівель, забезпечував високі значення їх радіолокаційної яскравості – аж до рівня насичення РСА. Крім того, на більш сучасних сенсорах, зокрема RADARSAT-2 (С-діапазон), шифер покрівлі також забезпечує досить високу яскравість зображення (рис. 3.4, а).

Також важливо відзначити велику залежність яскравості відгуку від шиферу від поляризації зонduючого сигналу. На рис. 3.4, б, в наведені РЛЗ будівель з шиферним дахом для висхідних і низхідних витків відповідно. З рисунків видно, що ЕПР шиферу за неузгодженою поляризацією зменшується до рівня фону. Орієнтування хвиль шиферу відповідно до поляризації зонduючого сигналу навряд чи можливе, тому що при проходженні іоносфери площина лінійної поляризації сигналу з огляду на ефект Фарадея [83, 84], як правило, виявляється поверненою на величину, точне значення якої не може бути відомо заздалегідь. Однак за наявності великої кількості шиферних дахів з відомою орієнтацією та геометрією можна визначити орієнтацію площини поляризації електромагнітної хвилі, що падає на поверхню Землі.

Таким чином, як для підвищення точності зовнішнього калібрування РСА, так і для скорочення видатків на його післястартове калібрування, доцільно використовувати дахи будівель в місцях, де є досить велика кількість дахів з відповідних матеріалів. Однак для коректного зіставлення яскравості відбитого сигналу з фактичною ПЕПР шиферу необхідно точно знати залежність рівня зворотного розсіювання від кутового положення матеріалу відносно падаючого променя.



Рис. 3.4 РЛЗ сучасних радіолокаторів, на яких зображені будівлі з шиферною покрівлею

Спочатку розглянемо теоретичні роботи в цій галузі [85]. Як відомо, згідно з принципом Гюйгенса, кожна точка опроміненої поверхні розсіює сигнали в усі боки з однаковою амплітудою. У випадку однопозиційної радіолокації дослідженню підлягають тільки промені, відбиті назад в напрямку падаючої хвилі. Згідно [8], сигнал, що прийнятий однопозиційною РЛС, в найбільш загальному випадку, можна визначити у вигляді інтегральної суми радіосигналів зворотного розсіяння від точок всієї опроміненої поверхні в межах елемента розділення (пікселя) з урахуванням розподілу їх амплітуд і фаз:

$$\dot{E}_r = \iint_{\rho_X, \rho_Y} \dot{E}(X, Y) e^{-j\varphi(X, Y)} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(Y \sin \gamma_i - h(X, Y) \cdot \cos \gamma_i)} dXdY \quad (3.2)$$

У випадку шиферу з хвилястою структурою механізм відбиття можна стисло описати так: при певних кутах опромінення різниця набігу фази від двох сусідніх хвиль шиферу кратна довжині хвилі зондуєчого сигналу, що є причиною інтерференції двох точкових джерел і таким чином зумовлює максимуми та мінімуми діаграми зворотного розсіяння. В роботі [8] з цих міркувань отримано просте співвідношення, що зв'язує довжину періоду в перерізі шиферу, кут падіння (відбиття) радіосигналу та довжину хвилі радіолокатора:

$$\Lambda = \frac{n\lambda}{2 \sin \gamma_i} \quad (3.3)$$

де Λ – довжина періоду (крок) хвилі шиферу, n – номер субгармоніки (кількість довжин хвиль, що набігають на різниці відстаней до опромінювача від двох сусідніх хвиль шиферу).

Для відомих довжини хвилі радіолокатора та шиферу з (3.3) нескладно отримати співвідношення, що дозволяє обчислити екстремуми діаграми зворотного розсіяння фрагмента шиферу для подальшого експерименту:

$$\gamma_i = \arcsin \frac{n\lambda}{2\Lambda} \quad (3.4)$$

Обидві наведені моделі не враховують крайові ефекти та часткове самозатінення шиферу при великих кутах падіння. Крім того, типовий азбестоцементний шифер має відбивні властивості, що далекі від таких для металів, тому необхідно також враховувати поглинання та вторинне розсіяння. Також відзначимо, що шифер складається з азбесту та цементу, які мають різну діелектричну проникність (азбест $\epsilon' \approx 10$, цемент $\epsilon' \approx 2-4.5$ [86]). Азбест при цьому має волокнисту структуру. Зважаючи на це розробка строгої моделі зворотного розсіяння азбестоцементного шиферу, яка не потребує великої кількості обчислювальних ресурсів, є важкодосяжною. Тому в рамках виконаних нами робіт з дослідження зворотного розсіяння шиферу основна увага була спрямована на експеримент.

Для оцінки динамічного діапазону РСА S-діапазону в експерименті досліджено залежність моностатичної ЕПР гофрованих матеріалів господарського призначення. Вимірювання проводилися за допомогою стандартного панорамного вимірювача КСХН з коаксіальними спрямованими відгалужувачами на частоті 3,15 ГГц. Як приймально-передавальна антена використовувався широкосмуговий рупор П6-23А. Заміри проводилися як для випадку, коли площа сканування променя була перпендикулярна утворюючим поверхні гофрованого матеріалу (рис. 3.5, а), так і для випадку, коли промінь сканував уздовж утворюючих поверхні (рис. 3.5, б). В обох випадках вимірювання проводилися при горизонтальній E_H і вертикальній E_V поляризації падаючого поля. Зразки розташовувалися на відстані дальньої зони від використовуваного рупора ($R_{д.з.} = 14$ м). Повна схема вимірювань наведена на рис. 3.5.

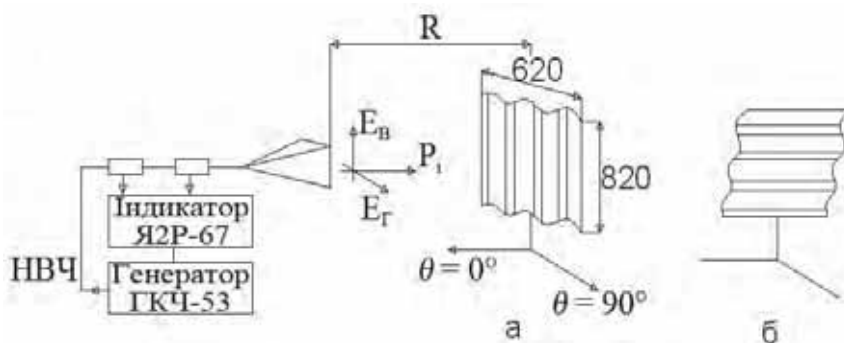


Рис. 3.5 Схема вимірювань

В експерименті був використаний шифер марки СВ 40/150. Повна висота шиферу цієї марки становить 45,8 мм, при товщині шиферної пластини 5,8 мм, довжина періоду $\Lambda = 150$ мм [87]. Стандартний лист такого шиферу має вісім хвиль і розмір відповідно 175см $\times$ 113см. З одного боку шиферного листа хвиля має меншу висоту – 32 мм (для перекриття). Використаний нами експериментальний зразок мав розмір 82 см $\times$ 62 см (що відповідає чотирьом повним хвилям шиферу), при цьому фрагмент не містив зменшеної хвилі.

На рис. 3.6, 3.7 наведена залежність рівня відбитої від листа шиферу потужності електромагнітної хвилі, нормованої на потужність падаючої хвилі, яка виражена в децибелах. Куту $\theta = 0^\circ$ відповідає нормальне падіння хвиль на лист. З рис. 3.6 видно, що максимальна ЕПР має місце у випадку нормального падіння променя на лист. Для випадку, коли промінь сканує вздовж утворюючих хвиль шиферу (рис. 3.5, б), максимальна ЕПР спостерігається також при нормальному падінні променя на лист. При відхиленні променя на 8° від нормалі у випадку Е-поляризації (вид поляризації визначається вектором поля, який лежить в площині сканування) ЕПР зменшується до мінімуму, що становить -5,8 дБ від максимального значення, а потім зростає до рівня -3 дБ і має незначні коливання до кінця сектору кутів сканування.

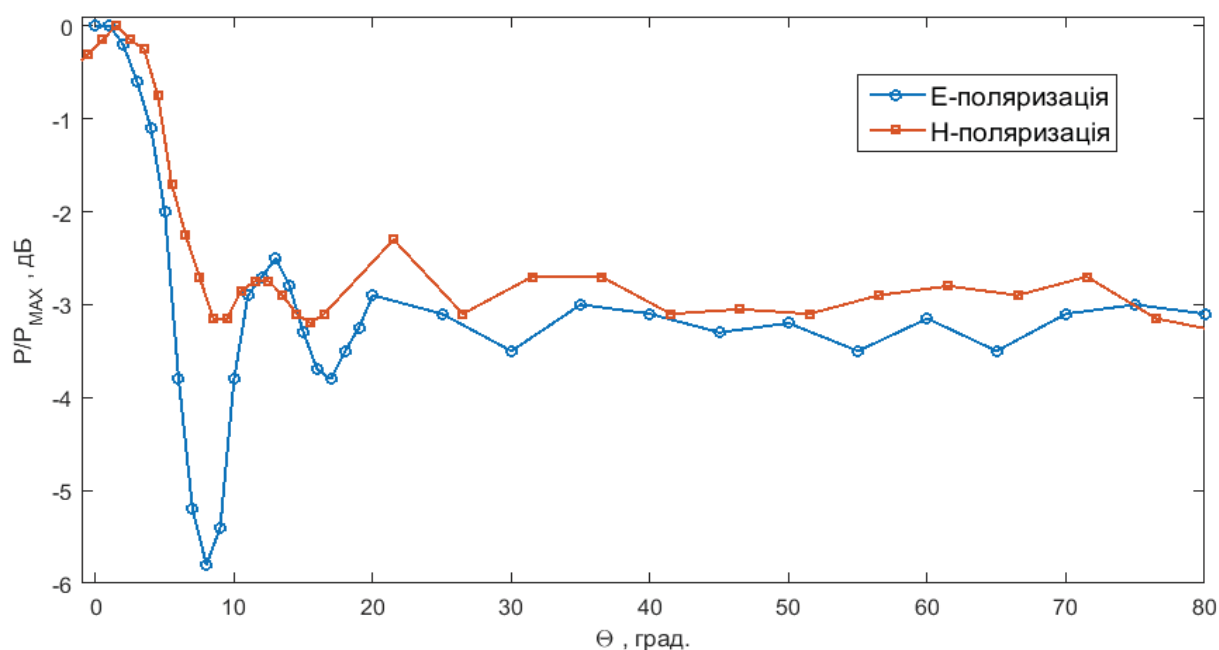


Рис. 3.6 Діаграми зворотного розсіяння від листа шиферу в площині, паралельній утворюючим хвиль шиферу

На рис. 3.7 представлена аналогічна залежність ЕПР для випадку сканування в площині, що перпендикулярна до утворюючих хвиль шиферу (рис. 3.5, а). У цьому випадку спостерігаються три максимуми ЕПР: перший, максимальний (0 дБ) – при куті $40,5^\circ$ від нормалі, другий (на рівні -0,8 дБ для Н-поляризації і -4,7 дБ для Е-поляризації) при куті 18° від нормалі та в напрямку нормалі – на рівні -3 дБ.

Також на рис. 3.7 відзначені кути падіння, отримані за (3.4), які відповідають орієнтаціям теоретичних максимумів діаграми зворотного розсіяння (цілі n), і теоретичних мінімумів (напівцілі n). З рисунка чітко видно, що експериментальні максимуми та мінімуми відбитої хвилі при кутах більших 50° від нормалі помітно зміщені, причому тим сильніше, чим більші ці кути. Вочевидь це зумовлено частковим самозатіненням шиферу та, як наслідок, зменшенням амплітуд синфазних і протифазних відбитих від сусідніх хвиль шиферу електромагнітних хвиль.

Таким чином, шляхом зміни відносних площ шиферу на пікселі та простою механічною варіацією кутів нахилу листів шиферу можна домогтися практично повного перекриття динамічного діапазону РСА при обох лінійних

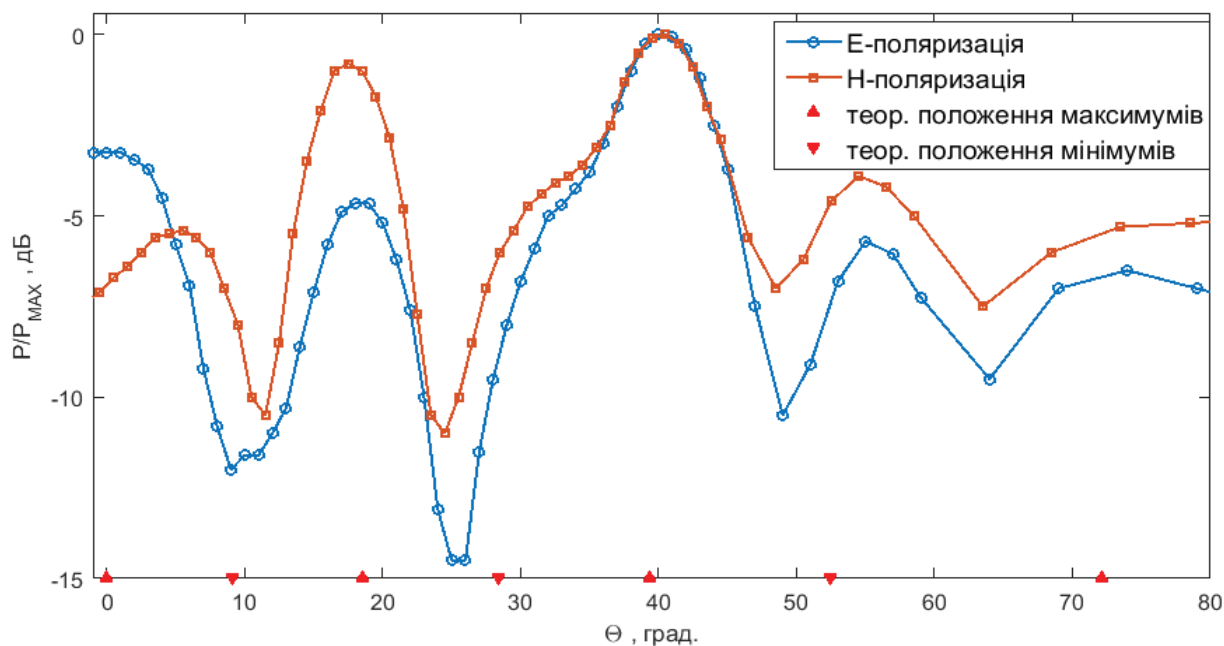


Рис. 3.7 Діаграми зворотного розсіяння від листа шиферу в площині, перпендикулярній до утворюючих хвиль шиферу

поляризаціях радіохвиль. Відзначимо, що запропонований метод може бути легко розширений для використання будь-яких інших покрівельних матеріалів будівель, які надійно виділяються на РЛЗ, одержаних у відповідному діапазоні електромагнітних хвиль.

Крім того, оскільки в запропонованому підході одним з ключових моментів є кількість підходящих дахів в межах однієї сцени, існує необхідність в розробці алгоритму обробки знімків для швидкого визначення всіх можливих антропогенних об'єктів. За допомогою такого алгоритму можливо по знімках однієї і тієї ж місцевості з різних ракурсів зіставити виявлені споруди та виділити ті, які однаково добре розрізняються на всіх знімках. Отриманий таким чином перелік об'єктів може бути досліджений: визначена конструкція, використані покрівельні матеріали, їх положення відносно горизонту, орієнтація за сторонами світу.

Каталог таких антропогенних об'єктів може бути використаний для зовнішнього експлуатаційного калібрування радіометричних характеристик РСА інших діапазонів довжин хвиль.

3.3 Алгоритм пошуку споруд на монохромних супутникових зображеннях

Для реалізації концепції зовнішнього експлуатаційного калібрування РСА космічного базування з використанням великої кількості антропогенних об'єктів, що була викладена вище, нами був розроблений новітній алгоритм пошуку всіх можливих антропогенних об'єктів на монохромному ортотрансформованому зображенні земної поверхні. Основні типи монохромних продуктів ДЗЗ: радіолокаційні зображення, знімки в інфрачервоному діапазоні й оптичні в панхроматичному режимі.

Найбільш зручними для початкового етапу розробки алгоритму пошуку об'єктів є знімки Землі в інфрачервоному діапазоні. Об'єкти на таких зображеннях не мають тіней, а рівень шуму, як правило, невеликий. Самі ж об'єкти, що представляють інтерес для зовнішнього калібрування, наприклад,

дахи будівель, мають контур, що складається, як правило, з прямих ліній, які попарно паралельні одна до одної, або ж перетинаються під прямим кутом. Під подібний опис підпадає більша частина антропогенних об'єктів як таких, тому на основі цієї властивості нами розроблена базова версія алгоритму для визначення координат в растрі монохромного зображення можливих будівель і споруд.

Оскільки будівлі та споруди можуть мати різну форму, єдиним критерієм їх достовірного виявлення є наявність прямих меж і прямих кутів між ними. Однак прямі краї, як правило, виглядають такими тільки візуально, на реальних космічних знімках вони часто представлені кривими з великим радіусом вигину або ламаними відрізками. Ступінь нерівності залежить від ряду факторів, пов'язаних з особливостями бортової апаратури, а також з рівнем і просторовими характеристиками шумів. Таким чином, задача зводиться до розробки найбільш ефективного алгоритму пошуку прямих країв об'єктів і прямих кутів між ними, який більш стійкий до похибок контуру та формує максимальну кількість гіпотез при мінімальному часі обробки зображення.

В якості вихідних даних взята велика вибірка інфрачервоних знімків ДЗЗ [88], в якій кожен знімок має розмір $16\,000 \times 576$ пікселів. Для верифікації методу для кожного зображення використовувалися апріорно відомі координати одиночних будівель. Значущою характерною особливістю зображень в ІЧ-діапазоні є те, що в різних випадках будівлі відображені по-різному. Іншими словами, об'єкт може бути видно як білий на темному фоні або як темний на білому, іноді навіть на одному знімку – в залежності від режиму освітлення й особливостей самого об'єкта. Ця та інші особливості вимагали послідовної розробки ряду програмних функцій, які описані нижче.

3.3.1 Попередня обробка зображень

На початковому етапі на більшості зображень була виявлена зміщена гістограма яскравості, де значення сигналу поза межами динамічного діапазону сенсора відображається на протилежному боці шкали яскравості. З метою підвищення якості автоматичної обробки знімків була розроблена програмна функція автоматичного зміщення гістограми яскравостей. Відзначимо, що схожі можливості реалізовані в бібліотеці з відкритим вихідним кодом OpenCV [89]. Однак, для більш повного контролю обробки зображень була розроблена більш гнучка процедура. Вона складається з трьох основних етапів: знаходження положення максимуму гістограми, отримання положення середньозваженого максимуму гістограми за шкалою яскравості та додавання до зображення різниці між середньозваженим центром гістограми та середньою яскравістю даної шкали яскравості. Яскравість виміряна в умовних одиницях яскравості (у.о.я.), для набору даних [88] вона знаходиться в межах від 0 до 65535 у.о.я. Тут вихідна (зміщена) гістограма, є «замкненим» масивом, тобто в процесі формування вихідних зображень їх гістограми зміщалися з переповненням регістрів яскравості пікселів зображення. Це призвело до відображення гістограми з області за межами динамічного діапазону яскравості в область, де яскравість близька до нуля.

Після цього зображення піддається автоматичному розтягненню гістограми. По суті ця процедура має той самий сенс, що й автоконтраст. Всі три гістограми наведені на рис. 3.8. Як видно з рисунка, на відміну від класичного варіанта, гістограма всіх зображень з вибірки [88] складається зі смуг, що пояснюється малою кількістю рівнів і нелінійною чутливістю бортового сенсора.

При розтягуванні гістограми мається на увазі, що чим більша кількість пікселів в групі з однаковою яскравістю, тим більша кількість вихідних даних представлена цією групою і, відповідно, тим більшій площі сцени вона

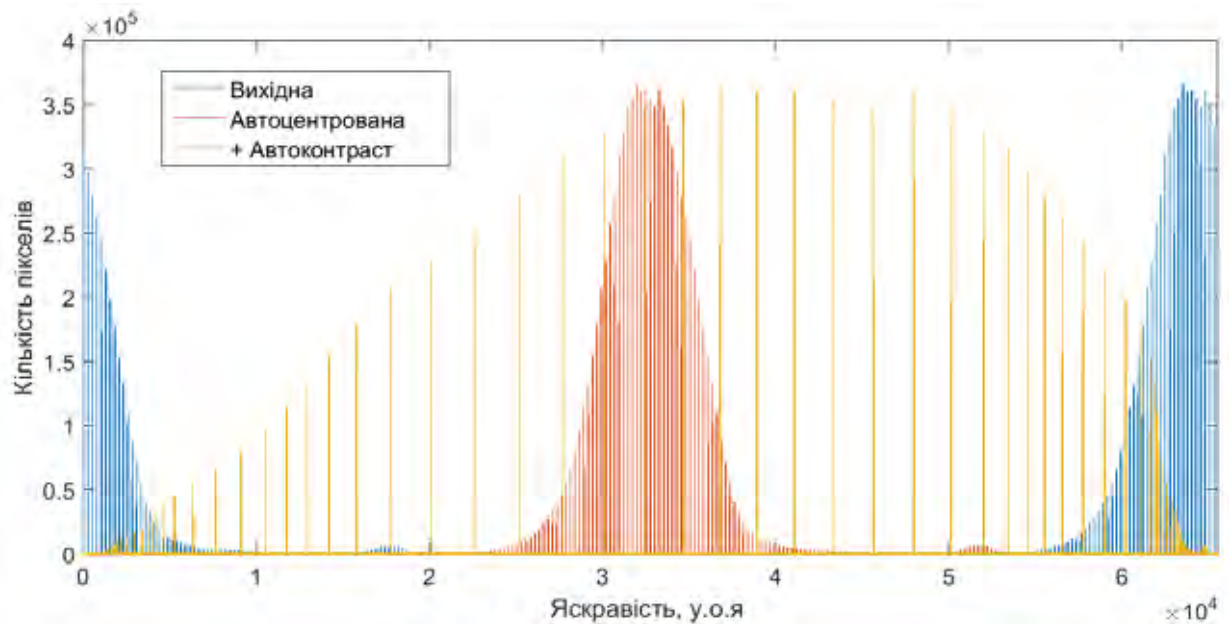


Рис. 3.8 Гістограми розподілу яскравості тестового зображення на всіх етапах попередньої обробки

відповідає, отже, тим більший контраст необхідно надати цій ділянці шкали яскравості. Тому розтягування було застосовано, головним чином, до ділянок гістограми, яким відповідає більша кількість пікселів. Інакше кажучи, в першому наближенні передатна функція являє собою кумулятивну суму значень гістограми яскравості, нормовану на відношення кількості пікселів в зображенні до максимального значення шкали яскравості (рис. 3.9). Те, що гістограма складається зі смуг, призводить до того, що така передаточна функція є ступінчастою.

Відзначимо, що розтягування гістограми в області її максимуму відбувається за рахунок зменшення відстані між смугами, висота яких менша за половину рівня максимуму. Оскільки зображення після автоматичного контрастування визначено цілозначними рівнями яскравості (як і вихідне), важливо, щоб сусідні смуги на гістограмі після обробки не зливалися в одну. Таке явище цілком можливо при використанні ступінчастої передавальної функції у випадках, коли інтенсивні (високі) смуги розташовані поблизу слабких (низьких). Тому використана гістограма за 128-ма рівнями яскравості з інтерпольованими проміжними значеннями (рис. 3.9).

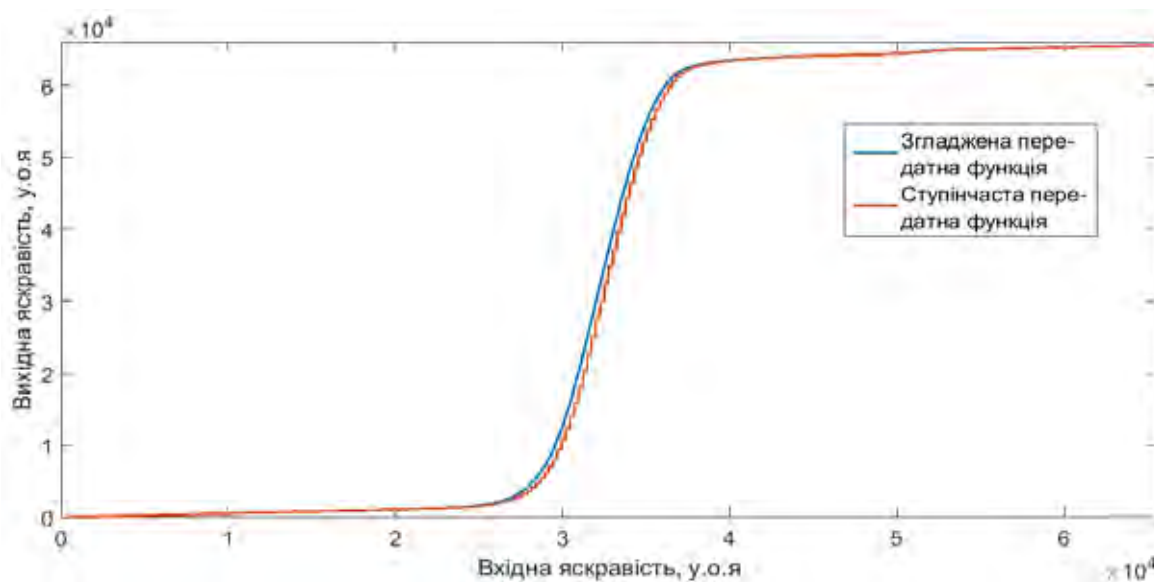


Рис. 3.9 Варіанти передатної функції при автоматичному контрастуванні

Технічно передаточна функція була реалізована у вигляді таблиці, де адреса відповідає аргументу, а значення – новій яскравості пікселів. Для будь-якого зображення ця функція була обчислена за її гістограмою, але у всіх випадках вона виглядала як сигмоїда з малим значенням похідної на краях і великим – по центру динамічного діапазону. Для дво- та тримодових гістограм були обчислені відповідно двох- і триступінчаті передатні функції без використання додаткових програмних рішень.

На рис. 3.10 наведено фрагмент зображення з об'єктом, що має бути виділений, розміром 120×200 пікселів на всіх етапах попередньої обробки: а) вихідне зображення; б) зображення після автоматичного зміщення гістограми; в) зображення з автоматичним зміщенням і розтягуванням гістограми.

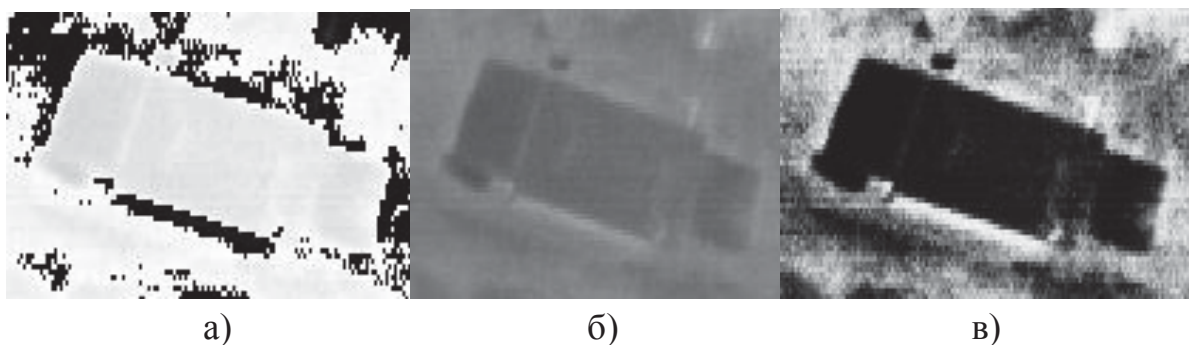


Рис. 3.10 Фрагменти тестового зображення на всіх етапах попередньої обробки

3.3.2 Розмиття та визначення похідної зображення за координатами

Розглянемо далі розділення зображення підстильної поверхні на шари величини та напрямку градієнта яскравості зображення. В якості попередньої обробки зображення найчастіше, перш за все, використовується фільтрація за Гаусом, що має той же сенс, що і згортання з ядром у вигляді двовимірної функції Гауса. Це необхідно для зниження рівня шуму, який найчастіше представлений сплесками яскравості з високими просторовими частотами. Правильний вибір сигма-параметра для цієї фільтрації забезпечує компроміс між рівнем шуму та деталізацією зображення. Далі, як правило, застосовують ядро Собеля або Превітт [41, 90] для пошуку похідних за аргументами X та Y окремо.

Об'єднаємо ці обидва етапи. Передбачається, що всі зображення з оброблюваного набору мають, принаймні, близький масштаб і характеристики шуму. Виходячи з цих властивостей, користувач має вибрати розмір ядра для диференціювання, а також ваги відстаней від центрального елемента в цьому ядрі. Сенс згортання для обчислення похідної в тому, щоб використовувати не тільки елементи, що знаходяться в одному рядку (стовпці) з пікселем, для якого обчислюється похідна, а й інші сусідні пікселі, як наприклад, при використанні оператора Собеля або Превітт. Різниця ж полягає в тому, що вибране ядро може бути 5×5 , 7×7 або більше пікселів. Елементи такого ядра визначені в такий спосіб:

$$\mathbf{K}_{i,j} = \cos \left[\arctg \left(\frac{c-j}{c-i} \right) \right] \cdot W \left(\sqrt{(c-j)^2 + (c-i)^2} \right), \quad (3.5)$$

де $c = (s-1)/2$ – адреса центрального елемента ядра; s – розмір ядра; W – кусково-лінійна функція залежності ваги від відстані до центрального елемента ядра, яка задається користувачем; $i \in (c, s]$ – номери рядків ядра; $j \in [1, s]$ – номери стовпчиків ядра.

Для того щоб виключити можливі випадки ділення на нуль, вираз (3.5) застосовується для значень $i > c$. Елементи центрального рядка в такому ядрі завжди дорівнюють нулю, а область значень $i < c$ будується дзеркально за допомогою копіювання вже наявних значень з від'ємним знаком.

Оскільки ядро (як і растр) в більшості програмних пакетів представляється у вигляді таблиці, будемо вважати, що в межах ядра перший вимір (X) відповідає напрямку росту порядкового номера стовпчика (вправо), а другий вимір (Y) відповідає зменшенню порядкового номера рядка (вгору). Формула (3.5) і наступні отримані саме для такого варіанту системи координат.

Загальний вигляд ядра для похідної по Y , що складається з дев'яти пікселів з вагами в $\{1, 3, 3, 1\}$ для відстаней від центру $\{1, 2, 3, 4\}$, наведено на рис 3.11, а. Остання точка функції W , що відповідає максимальній відстані в $s/\sqrt{2}$, дорівнює нулю, якщо інше не визначено користувачем. Оскільки нами запропоновано новий варіант диференціюючого ядра, важливо забезпечити рівнозначність передачі градієнтів зображення в усіх напрямках. Для того щоб це перевірити, візьмемо модуль від ядра для кожного виміру (X та Y) при однакових параметрах. Така поверхня буде демонструвати розподіл ваг в ядрі, які визначають кінцеве значення похідної за X та за Y . Зауважимо, що з рештою з них для будь-якого пікселя обчислюються напрямки та величина градієнта. Для цього використовується теорема Піфагора. Таким чином, якщо корінь від суми квадратів цих двох поверхонь (поелементно) виявиться фігурою обертання з профілем, що визначається функцією W , можна вважати, що всі можливі напрямки градієнтів у вхідних даних рівнозначні.

У формулі (3.5) є дві основні складові – множник, який описує напрямки з центру ядра на поточний елемент відносно вектора, уздовж якого обчислюється похідна (косинус із аргументом), і множник, що залежить від відстані до центру ядра (W – кусково-лінійна функція від відстані до центра ядра).

Вид модуля ядра K , який наочно демонструє ваги його елементів при обчисленні похідної по X (уздовж рядків), наведено на рис. 3.11, б. Щоб отримати ядро для похідної по Y (уздовж стовпців), досить транспонувати

отримане з виразу (3.5) ядро. Аналогічно для оцінки ваг кожного елемента при формуванні похідної уздовж стовпців, тобто за Y , можна взяти модуль від отриманого ядра. Корінь від суми квадратів ваг при обчисленні похідних по обох напрямках приведений на рис. 3.11, в.

Також при виведенні формули величини градієнта після нескладних перетворень з (3.5) можна перекоонатися, що сума множників, які відповідають за напрямок, утворює основну тригонометричну тотожність. Таким чином, сума ваг за кожним елементом ядра визначається тільки кусково-лінійною функцією залежності ваги від відстані W , що підтверджується вісьовою симетрією фігури на рис. 3.11, в.

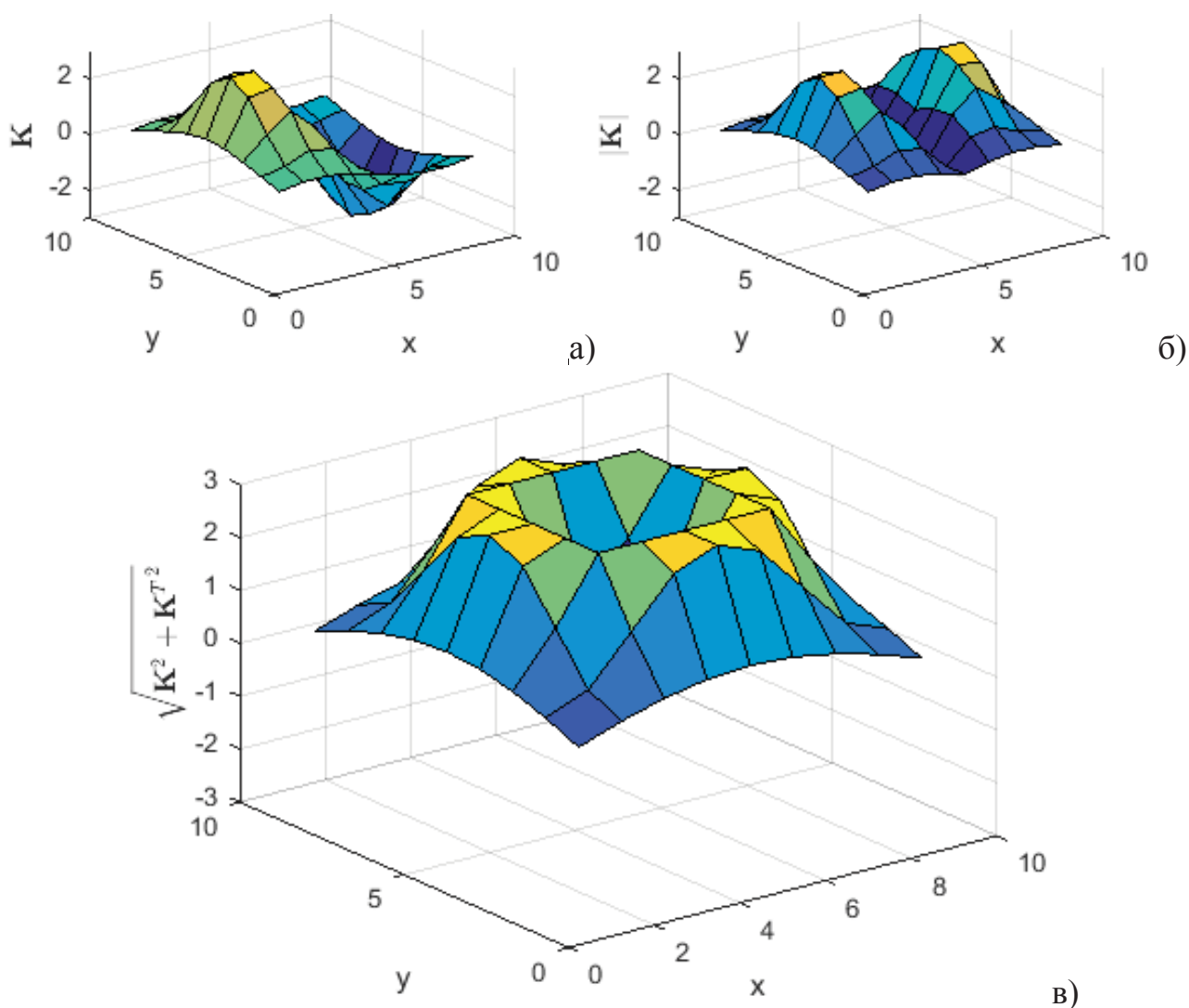


Рис. 3.11 Диференціююче ядро для взяття похідної уздовж рядків (а), відносні ваги кожного елемента ядра при обчисленні похідної за X (б) і суми модулів похідних уздовж стовпців та уздовж рядків (в)

Відзначимо також, що множник, який відповідає за напрямок, в окремому випадку, коли диференціальне ядро має розмір масиву 3×3 елементи, являє собою оператор Собеля.

Можливість вибору ваг просторових частот на етапі визначення диференціального ядра дозволяє обійтися без попередньої фільтрації за Гаусом. Крім того, фільтр Гауса визначено одним параметром, підбираючи який можна вибрати потрібну просторову частоту зрізу. На відміну від традиційної фільтрації, безпосередній вибір відповідних ваг для просторових частот додатково надає можливість вибору типу та форми фільтра.

З практичної ж точки зору, коли, наприклад, відомо, що найменший об'єкт, який потрібно виявити, має ширину близько десяти пікселів, легко взяти п'ятипиксельне ядро та шляхом двох–трьох послідовних ітерацій підібрати такі відповідні ваги просторових частот, що фільтр утворить найбільшу величину градієнта на межах досліджуваного об'єкта. Нами були взяті ваги 1 і 3 для одно- та двопиксельних відстаней від центру ядра відповідно.

Формування **dx**- і **dy**-шарів дозволяє обчислити векторну діаграму локальних градієнтів зображення для кожного пікселя, яка показана на рис. 3.12. Для подальших етапів обробки зручно використовувати шари величини та напрямку градієнта замість **dx** і **dy**. Це легко зробити за допомогою добре відомих рівнянь перетворення з декартової системи координат в полярну. Далі замість вихідного зображення **Image** будуть використовуватися шар величин градієнта **F** і шар напрямків градієнта зображення **θ** .

У такому випадку контур об'єкта визначається лінією максимального градієнта зображення. Очевидно, що для будь-якого пікселя лінія максимального градієнта перпендикулярна до відповідного градієнт-вектора цього пікселя. Ця властивість буде дуже корисною для наступного етапу адаптивної фільтрації.

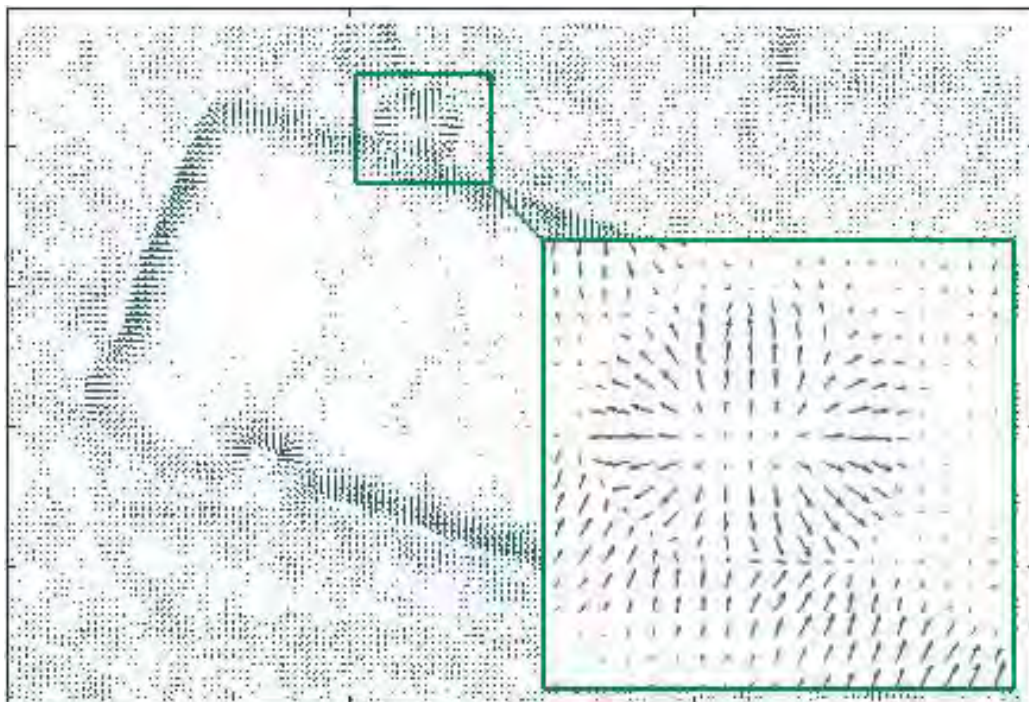


Рис. 3.12 Векторна діаграма локальних градієнтів об'єкта, що має бути знайдений

3.3.3 Адаптивний фільтр

Після корекції контрасту та подальшого диференціювання зображення передається в спеціальний фільтр. Розроблений нами двовимірний адаптивний динамічний фільтр виділяє прямі лінії градієнтів, а також лінії градієнтів з великим радіусом згину. На вхід фільтра подаються два масиви, рівні за розміром вхідному зображенню – масиви значень величин градієнтів зображення F і напрямків градієнтів зображення θ для кожного пікселя вихідного зображення.

Адаптивний фільтр зображення був розроблений у двох варіантах. Розглянемо спершу базовий варіант, який працює за наступною схемою. Для кожного пікселя незалежно розраховується відповідне ядро згортання (фільтр), виходячи з азимута градієнта поточного пікселя. Наприклад, у випадку нульового азимута ядро визначається як функція Гауса для першого виміру та як константа для другого. Щоб повернути поверхню, що описана двовимірною функцією, на кут θ відносно початку координат, потрібно виразити її в

полярній системі координат, відняти необхідний кут і повернути назад до декартової системи координат. Оскільки описана вище функція залежить тільки від одного виміру, зручно винести поєднання якобіанів до окремого виразу:

$$\mathbf{x}_{i,j} = \sqrt{(c-i)^2 + (c-j)^2} \cdot \cos \left[\arctg \left(\frac{c-i}{c-j} \right) - \theta \right], \quad (3.6)$$

де $\mathbf{x}_{i,j}$ – значення X -координати на повернутій на кут θ координатній площині в точках, що відповідають цілим значенням положень рядка i та стовпчика j в ядрі фільтра; $c = (s+1)/2$ – адреса центра ядра (як за рядками, так і за стовпчиками); s – розмір ядра.

Для повороту використовуються безпосередньо значення напрямків градієнтів $\theta_{row,col}$, оскільки при нульовому повороті (градієнт зображення направлений уздовж координати X) X -переріз має форму функції Гауса, а вздовж Y розташована лінія максимальних значень ядра. При цьому лінія максимальних значень ядра припадає на сусідні (вище та нижче) пікселі зображення, які лежать на поточній лінії градієнта (перпендикулярно напрямку градієнта в поточному пікселі). Отже, якщо поточний піксель є частиною прямої лінії градієнта зображення, тобто контуру об'єкта, то максимальні значення ядра відповідатимуть пікселям, які мають однаковий напрямок градієнта та можуть належати тій самій лінії градієнта. Ця властивість зберігається при будь-якому повороті ядра. Таким чином, базовий варіант ядра адаптивного фільтра визначений виразом:

$$\mathbf{B}_{i,j} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{\mathbf{x}_{i,j}^2}{2\sigma^2} \right), \quad (3.7)$$

де σ – параметр функції Гауса.

На рис. 3.13, а представлені шар фрагмента вихідного зображення та відповідне центральному пікселю фрагмента базове ядро розміром 11×11 пікселів з σ -параметром, що дорівнює одиниці. З рисунка видно, що такий динамічний фільтр буде найбільш ефективно виділяти прямі межі об'єктів, або ж контури з досить великим радіусом вигину.

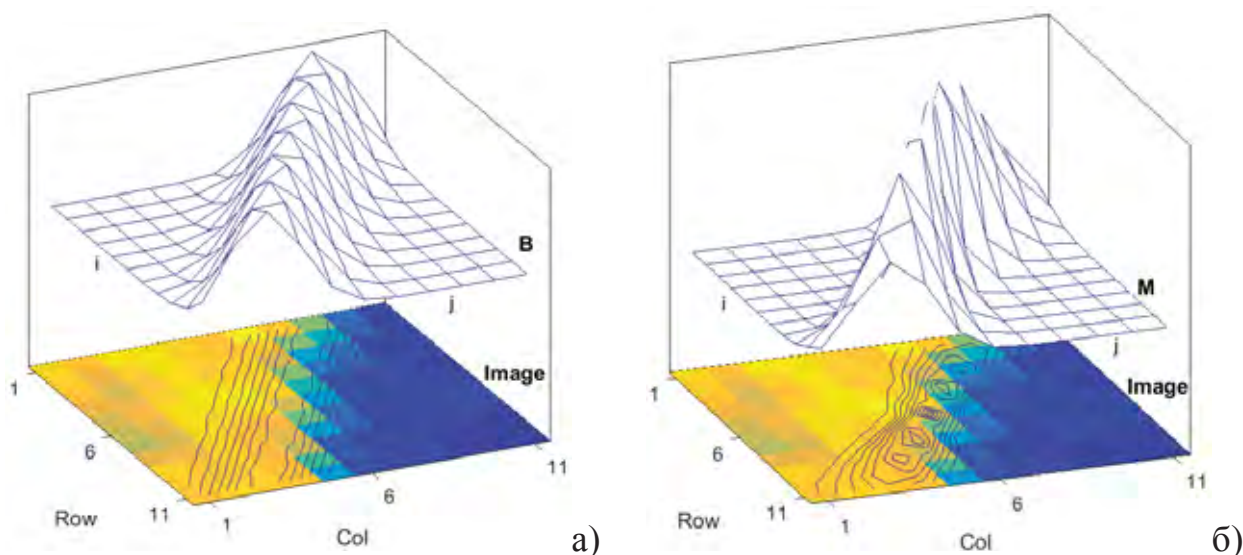


Рис. 3.13 Фрагмент зображення прямої лінії градієнта та відповідне центральному пікселю базове ядро адаптивного фільтра (а) і модифіковане ядро (б)

Для побудови модифікованого ядра використано ті ж самі принципи. Однак, на більшості знімків при детальному розгляді антропогенних об'єктів можна виявити, що вони частіше за все мають ламані краї (а не рівні), що додатково впливає на флуктуації азимута локального градієнта окрім шумів. Внаслідок цього максимальні значення ядра частіше за все не збігаються з фактичною прямою лінією максимальних градієнтів, тобто з кромкою об'єкта, окрім ближніх до центру ядра пікселів. Для зменшення впливу флуктуацій азимута на ядро базового адаптивного фільтра єдиний спосіб полягає в збільшенні σ -параметра ядра. Це робить фільтр в цілому більш чутливим до плавних змін яскравості зображення, ніж до різких, що небажано.

Зазвичай, подібні ефекти мають бути придушені на етапі попередньої обробки зображення за допомогою фільтрації (або в нашому випадку поєднаної з диференціюванням процедури), однак на практиці є необхідність звести «розмивання» зображення до мінімуму, тому що невеликі об'єкти (споруди) при цьому втрачають прямі кути та майже не відрізняються від природних об'єктів випадкової близької до круглої форми. Тому з практичної точки зору очевидно, що більш ефективним виявиться використання більш складного ядра

адаптивного фільтра, модифікованого таким чином, щоб враховувати ближні значення локальних градієнтів з більшою вагою, і в той самий час віддалені значення локальних градієнтів з більшим σ -параметром Гаусіани, тобто її шириною. Таким чином, елементи модифікованого ядра можуть бути визначені виразом:

$$\mathbf{M}_{i,j} = \cos\left(\frac{2R}{s}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\mathbf{x}_{i,j}^2}{2(\sigma + RK_\sigma)^2}\right), \quad (3.8)$$

де K_σ – коефіцієнт зростання параметра σ , s – розмір ядра, R – відстань від кожного елемента до центра ядра (визначається на етапі обчислення $\mathbf{x}_{i,j}$):

$$R = \sqrt{(c-i)^2 + (c-j)^2}. \quad (3.9)$$

У порівнянні з попереднім варіантом змінилося наступне. По-перше, нормуючий множник $1/\sigma\sqrt{2\pi}$ був виключений, оскільки для всього зображення використовується один і той же σ -параметр. Замість нього введений інший нормуючий множник, який надав лінії максимальних значень ядра вид косинусоїди, що залежить від відстані до центрального пікселя з періодом, що дорівнює π . На рис. 3.13, б видно косинусоподібний спад ваг на краях модифікованого ядра адаптивного фільтра. По-друге, в моделі ядра використовується коефіцієнт, що збільшує локальний σ -параметр по мірі віддалення від центру ядра. У варіанті, що наведений на рис. 3.13, б, він дорівнює $K_\sigma = 0,12$, при тому що основний σ -параметр зменшився в порівнянні з попереднім варіантом до 0,35.

Запропоновані перетворення дозволили домогтися бажаного зменшення чутливості фільтра до флуктуацій азимута градієнта зображення, а також зробити його більш чутливим до різких перепадів яскравості.

Далі розглянемо докладніше сам процес фільтрації з отриманим ядром. У класичному варіанті фільтрація – це процес застосування встановленого виразу (ядра) до всіх елементів масиву даних за принципом зміщеного вікна. У нашому ж випадку вхідних масивів два: шар напрямків градієнтів θ та масив

модулів градієнтів **R**. Для отримання кінцевого результату фільтрації для кожного пікселя використовується шар модуля градієнта, в той час як шар напрямків використовується лише для обчислення різниці напрямків градієнта між поточним пікселем і кожним з навколишніх пікселів, що знаходяться в межах положення вікна фільтра:

$$\mathbf{AzDiff}_{i,j} = \left| \theta_{row+i-c, col+j-c} - \theta_{row, col} \right|, \quad (3.10)$$

де row, col – номер рядка та стовпчика поточного пікселя, для якого обчислюється відповідне значення сигналу на виході фільтра, $i, j \in [1, s]$ – номери рядків і стовпчиків (вікна фільтра) елементів підмножини різниці напрямків градієнтів **AzDiff** поточного положення ядра, $c = (s+1)/2$ – адреса центру ядра в його локальних координатах, s – розмір ядра.

Відзначимо, що з отриманої підмножини різниць напрямків градієнта вибираються значення, що перевищують π , з тим, щоб відняти з них 2π і взяти модуль. Це необхідно для коректної оцінки різниці азимутів у випадках, коли перший близький до 2π , а другий до 0, і навпаки.

При визначенні кінцевого значення поточного пікселя зображення – результату адаптивної фільтрації приймемо, що він обернено пропорційний до отриманих різниць напрямків градієнтів пікселів (з урахуванням ваг, що визначаються ядром фільтра), але прямо пропорційний до величин піксельних градієнтів. Таким чином, в першому наближенні можна визначити вираз для поточного пікселя – результату адаптивної фільтрації у вигляді:

$$\mathbf{AdF_I}_{row, col} = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s \mathbf{M}_{i,j} \frac{\mathbf{F}_{row+i-c, col+j-c}}{\mathbf{AzDiff}_{i,j}}, \quad (3.11)$$

де **F** – шар величини піксельних градієнтів.

В такому найпростішому варіанті визначальний внесок до суми (3.11) будуть вносити тільки деякі пікселі, які близькі до поточного, та для яких різниця напрямків градієнтів **AzDiff** близька до нуля. Крім того, такий вираз критичний до випадків ділення на нуль. Для виключення цих недоліків запропоновано альтернативний варіант:

$$\mathbf{AdF_II}_{row,col} = 1 / \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s \mathbf{M}_{i,j} \frac{\mathbf{AzDiff}_{i,j}}{\mathbf{F}_{row+i-c,col+j-c}}. \quad (3.12)$$

Результат роботи фільтра (3.12) представлений на рис. 3.14, б. При такій реалізації випадки ділення на нуль на реальних даних практично не зустрічаються, однак залишається теоретична можливість того, що в зображенні може зустрітися градієнт нульової величини. Крім того, для практичної реалізації досить корисною виявилася б можливість контролювати відношення ступеня впливу на кінцевий результат фільтрації шару величини градієнтів $\mathbf{F}$ і підмножини різниці напрямків $\mathbf{AzDiff}$. Простішим варіантом буде ввести до виразу два нові параметри – перший визначатиме мінімальне з можливих значення знаменника, а другий являтиме собою безпосередній коефіцієнт для різницево азимутальної складової $\mathbf{AzDiff}$:

$$\mathbf{AdF_III}_{row,col} = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s \mathbf{M}_{i,j} \frac{\mathbf{F}_{row+i-c,col+j-c}}{AD + AW \cdot \mathbf{AzDiff}_{i,j}}, \quad (3.13)$$

де AD – глибина (ступінь) обробки, AW – вага азимутальної складової.

Параметр AD необхідний для виключення можливості ділення на нуль. Як правило $AD < 1$ й у випадках, коли $\mathbf{AzDiff}_{i,j}$ дорівнює нулю, поточний елемент результуючого масиву стає рівним $1/AD$ -кратній величині градієнта $\mathbf{F}$ для цього пікселя. В результаті кластери пікселів з різницею азимутів градієнтів, яка близька до нуля, набувають додаткової яскравості пропорційно до модуля градієнта для цих пікселів, а області з великою різницею азимутів градієнтів навпаки втрачають яскравість. Важливо визначити поріг $\mathbf{AzDiff}$, при якому в результуючий масив просто копіюється значення з $\mathbf{F}$. Очевидно його можна отримати, якщо прирівняти знаменник в (3.13) до одиниці:

$$\mathbf{AzDiff}_{TH} = \frac{1 - AD}{AW}. \quad (3.14)$$

Таким чином, в дійсності на найбільший розкид напрямків градієнтів, при якому градієнти вважатимуться співнаправленими, впливають обидва параметри, як і на фактичну вагу підмножини різниці напрямків $\mathbf{AzDiff}$.

У той же час, якщо AD дорівняти нулю (а AW одиниці), то рівняння стане еквівалентно виразу (3.11), і граничний розкид, при якому градієнти вважатимуться співнаправленими, виявиться спрямованим до нуля, але максимально можливе значення – до нескінченності.

AW , в свою чергу, визначає вагу різницево-азимутальної складової фільтра **AzDiff** відносно до величини градієнта **F**. Хоча в дійсності фактична вага **AzDiff** дорівнює відношенню AW/AD . Це стане очевидно, якщо винести $1/AD$ з-під знака суми:

$$\mathbf{AdF_IV}_{row,col} = \frac{1}{AD} \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s \mathbf{M}_{i,j} \frac{\mathbf{F}_{row+i-c,col+j-c}}{1 + \frac{AW}{AD} \cdot \mathbf{AzDiff}_{i,j}}. \quad (3.15)$$

Оскільки в решті решт на виході фільтра важливі відносні значення, коефіцієнтом $1/AD$ для практичної реалізації можна знехтувати. Таким чином, остаточний вираз має таку форму:

$$\mathbf{AdF}_{row,col} = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s \mathbf{M}_{i,j} \frac{\mathbf{F}_{row+i-c,col+j-c}}{1 + W \cdot \mathbf{AzDiff}_{i,j}}, \quad (3.16)$$

де $W = AW/AD$ – узагальнена вага азимутальної складової (якщо $W = 0$ – враховуються тільки величини градієнтів яскравості). Оскільки дріб в (3.16) не може прийняти значення більше за градієнт **F** (для поточного пікселя), **AzDiff_{TH}** дорівнює нулю, тобто практично всі пікселі затінитимуться, однак на кінцевий результат це не впливає, оскільки **AdF** описується тільки відносними значеннями яскравості зображення. При цьому величина піксельного градієнта зображення **F** зменшується в два рази при різниці напрямків градієнтів пікселів в $1/W$ радіан.

Результат роботи фільтра (3.16) представлений на рис. 3.14, в. Переваги фільтрації в цілому можна оцінити, порівнявши її з фрагментом шару модуля градієнтів (рис. 3.14, а). З рисунка видно, що в дійсності підсвічені прямолінійні області співнаправлених градієнтів, а також області градієнтів з великим радіусом вигину. При цьому непараметризована фільтрація (рис. 3.14, б) формує досить тонкі та переривчасті лінії, що незручно для подальшої обробки.

Параметр узагальненої ваги W можна підбирати виходячи з візуального контролю фільтрованого зображення – воно має бути максимально контрастним, але не зернистим. Для будівлі представленій на рис. 3.14, в параметр $W = 16$. Оптимальна узагальнена вага залежить від рівня флуктуацій азимуту градієнтів, тому після переналаштування фільтра попереднього розмиття W -параметр необхідно підбирати заново. Також з рис. 3.14, в видно, що параметризований фільтр (3.16) передає плавні градієнти (широкі смуги) товстими лініями, що й потрібно для подальшої обробки зображення, оскільки на наступному етапі формування відрізків контуру потрібна максимально доступна кількість пікселів, які відповідають за кожен з прямолінійних градієнтів (Line-support Region).

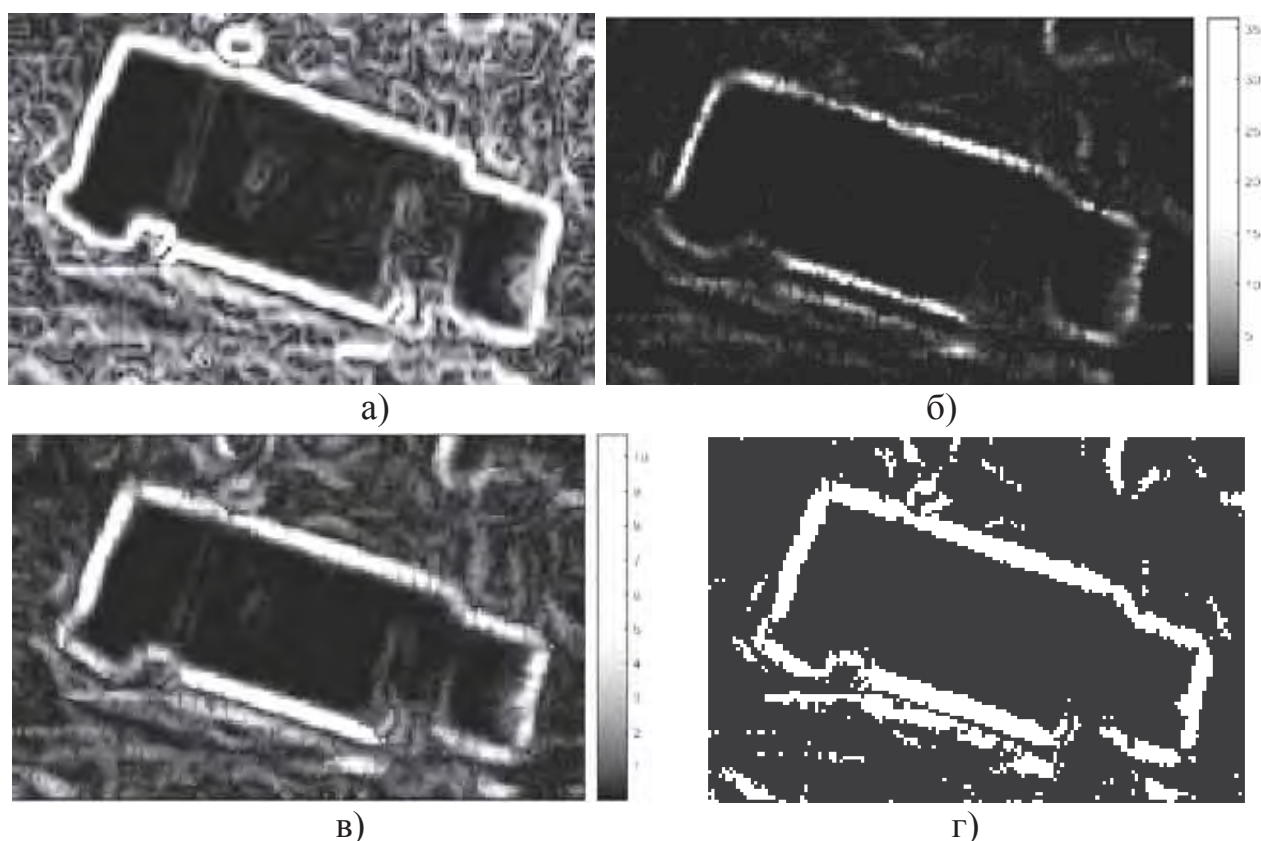


Рис. 3.14 Масив F , абсолютні значення градієнта тестового зображення (а), результат непараметризованої адаптивної фільтрації тестового зображення (б), результат параметризованої адаптивної фільтрації (в) і біт-маска, яка отримана за результатами адаптивної фільтрації (г)

3.3.4 Визначення лінійних фрагментів контуру

Традиційно контур знаходять як кластери пов'язаних пікселів на бітовій масці. Як правило, контур визначається лінією товщиною в один піксель. В більшості сучасних методів виявлення прямих країв, наприклад, у перетворенні Хафа [40], на вхід приймається контур, визначений методом Канні [30]. Однак, відповідно до прийнятої нами концепції щодо розв'язання цієї задачі, потрібно виділити тільки частини контуру, які можна описати відрізками. Найближчим аналогом запропонованого рішення є підхід, що носить назву Fast Line Finder [41]. Він був застосований в роботизованому транспортному пристрої для його орієнтації за краями дороги в оптичному діапазоні. В цьому випадку потрібні лінії (межі дороги) займали більшу частину отриманого зображення. У нашому випадку мінімальним розміром лінії краю об'єкта була прийнята довжина в $MinStrL = 10$ пікселів на основі типового розміру будівель і з міркувань оптимальної швидкості обробки зображення. При цьому обмеження на максимальну довжину лінії не накладалися. Надійне виявлення коротких відрізків межі стало можливо завдяки застосуванню адаптивного фільтра. Відзначимо, що алгоритм Хафа не дозволяє виділяти настільки короткі відрізки на тестових зображеннях, що розглядаються.

Розглянемо результат адаптивної фільтрації (рис. 3.14, в). Обчисливши середнє значення яскравості такого зображення, легко отримати бінарну маску, де true-пікселі (білі) відповідають пікселям – елементам формування відрізків на оригінальному зображенні (рис. 3.14, г). В результаті були використані рівні бінаризації від 0,8 до 1,8 від середнього по результату фільтрації, що є досить невеликим діапазоном для пошуку оптимального рівня бінаризації. На рис. 3.14, г представлена біт-маска з порогом 1,2. Відзначимо, що цей поріг є оптимальним для більшості (близько 90 %) зображень з набору даних [88], а його зменшення впливає переважно на швидкість роботи алгоритму, та при цьому практично не впливає на якість результату.

Далі необхідно отримані групи пікселів, що відповідають цілому об'єкту, розділити на підгрупи, кожна з яких відповідатиме своєму відрізку. В роботі [41] для цього використаний спеціально розроблений Connected Components Algorithm (CCA). З урахуванням сучасних алгоритмів, оптимізованих під новітні архітектури процесора, можна стверджувати, що така задача (сегментація в N-вимірному просторі довільної кількості точок на довільну кількість груп) може бути успішно розв'язана за допомогою нейронної мережі з радіальною базисною функцією (RBF Neural Network) [92]. Оскільки вимірів всього три (рядок, стовпець, азимут градієнта зображення) така мережа не буде занадто громіздкою. Однак, такий підхід призводить до ряду проблем, головна з яких полягає в тому, що радіус базисної функції, тобто міра належності точок до одного кластера, буде потрібно підбирати для кожного знімка в залежності від його масштабу та рівня шумів. Щоб реалізувати програмне рішення, стійке до змін шумів і масштабу, необхідно розробити програмну функцію, яка б повертала список відрізків як найбільш загальних елементів контура, так і його дрібних деталей. Отже, у випадках, коли з одних і тих самих пікселів може вийти як одна довга лінія, так і кілька коротких, алгоритм повинен повертати всі імовірні лінії, надаючи таким чином надлишкову інформацію про контур (і узагальнену, і детальну). Це ще одна перевага розробленого методу.

Необхідну програмну функцію вдалося реалізувати шляхом ітераційної зміни діапазонів азимута, за якими вибираються пікселі для відрізків поточної ітерації. На рис. 3.15, а–г представлені біт-маски **CrntBM** з поточними азимутами градієнтів зображення, які відповідають чотирьом сторонам об'єкта. Для обчислення цих біт-масок використаний шар різниці азимутів значень з масиву θ й опорного азимута $RqstAz$, який змінюється в циклі. Цей шар різниці азимутів визначений виразом:

$$\mathbf{AzDiffLayer}_{row,col} = \left| \theta_{row,col} - (-\pi + t / Nstep \cdot 2\pi) \right|, \quad (3.17)$$

де θ – масив напрямків (азимутів) градієнта зображення, $RqstAz = -\pi + t / Nstep \cdot 2\pi$ – поточний азимут ітерації (в радіанах), який визначений

в межах від $-\pi$ до π , t – номер ітерації, $Nstep$ – кількість ітерацій напрямку опорного градієнта $RqstAz$ в циклі.

Цей вираз отримано в цілому аналогічно до (3.10), включаючи той факт, що з усіх значень, які перевищують π , віднімається 2π .

У кожній ітерації з отриманого шару різниці азимутів градієнтів обчислюється поточний шар значущості пікселів:

$$\mathbf{CrntLayer}_{row,col} = \frac{\mathbf{AdF}_{row,col}}{\mathbf{AzDiffLayer}_{row,col} / (OvF \cdot 2\pi Nstep)}, \quad (3.18)$$

де OvF – коефіцієнт перекриття діапазонів азимута (overleap factor). Розглянемо принципи побудови виразу (3.18). Оскільки **AzdiffLayer** містить фактичні різниці азимутів градієнта зображення для кожного пікселя й азимута поточної ітерації, можна розділити результат динамічної фільтрації на цю різницю. У такому випадку, якщо для деякого пікселя ця різниця менша за одиницю, то яскравість такого пікселя збільшується, якщо ж більша, то яскравість цього пікселя буде зменшуватися. Оскільки гранична різниця азимутів в один радіан очевидно занадто велика, **AzdiffLayer** має бути нормований на меншу величину – наприклад, ширину діапазону кутів однієї ітерації ($2\pi/Nstep$). З іншого боку, в залежності від рівня флуктуацій азимута градієнта може виявитися, що пікселі від однієї прямої кромки потраплять в різні ітерації, якщо орієнтація кромки близька до граничного значення двох ітерацій. В роботі [41] ця проблема розв’язана шляхом квантування напрямків градієнтів зображення всього на 8 діапазонів (так званих buckets) і підстроювання їх меж під контекст завдання. З урахуванням обчислювальних потужностей в [41] це було продуктивним варіантом. Однак, такий підхід передбачає слабку чутливість алгоритму до ліній градієнтів з напрямками, що близькі до меж діапазонів. Для усунення цього недоліку введемо коефіцієнт перекриття OvF , який заданий в секторах однієї ітерації. Виберемо перекриття в $OvF = 2,5$, в той час як кількість ітерацій $Nstep = 90$. Хоч на перший погляд такі заходи можуть здаватися надмірними, на ділі такий коефіцієнт перекриття OvF дозволяє отримати досить

узагальнені елементи контуру – довгі лінії з великими перепадами напрямку градієнта, в той час як невеликий крок $Nstep$ дозволяє отримати найбільш детальні елементи контуру – короткі лінії з практично однаковим напрямком градієнта.

Отримане зображення бінаризується з тим же порогом, що й основна біт-маска (рис. 3.14, г). Оскільки близькі до нуля різниці азимута в масиві **AzdiffLayer** нерідко формують кластери з завідомо низькими градієнтами **F** («артефактні» острівці), додатково використовується основна біт-маска, отримана безпосередньо з **AdF** (рис. 3.14 г).

Оскільки «артефактні» острівці часто мають недостатній розмір і занадто малий сумарний градієнт, як правило, з них не формується «артефактних» ліній контуру. Таке проріджування поточної біт-маски в кожній ітерації дозволило скоротити час роботи циклу практично вдвічі. Вираз для поточної біт-маски в кожній ітерації наступний:

$$\mathbf{CrntBM}_{i,j} = (\mathbf{CrntLayer}_{i,j} > T) \wedge \mathbf{MainBM}_{i,j}, \quad (3.19)$$

де TH – поріг бінаризації, **MainBM** – основна біт-маска (рис. 3.14, г).

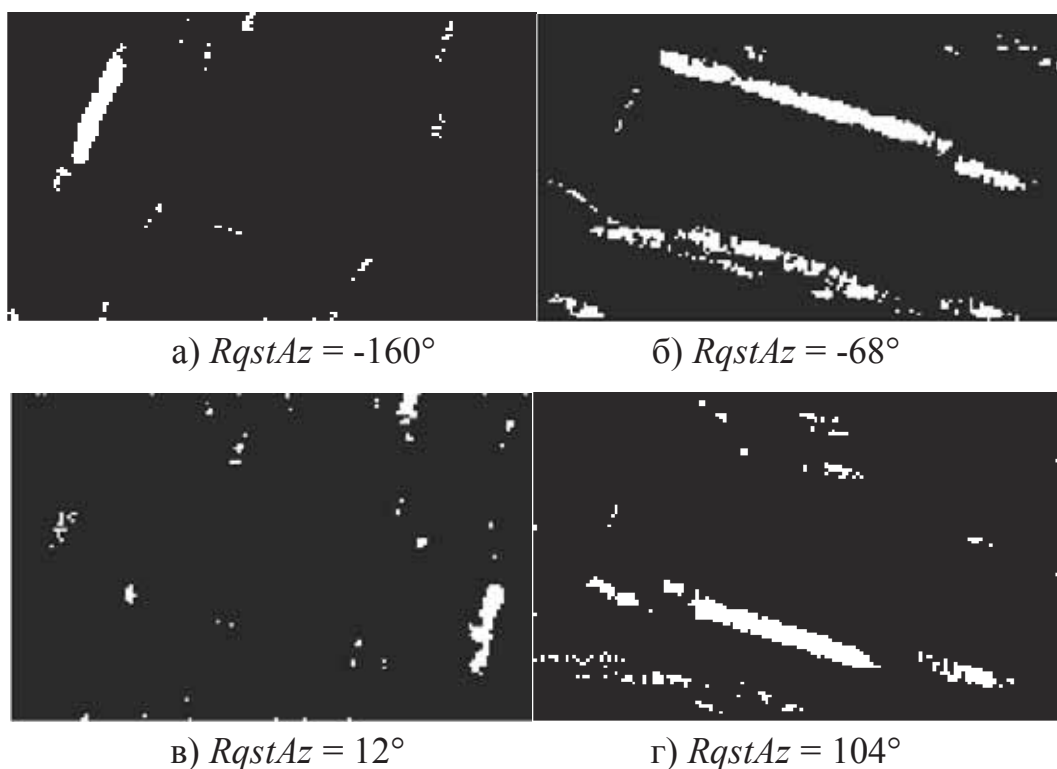


Рис. 3.15 Бінарні маски для опорних азимутів $RqstAz$, відповідних сторонам об'єкта

Таким чином, по мірі обертання опорного азимута в кожній ітерації спочатку проявляються пікселі з найбільшим градієнтом в окремих острівцях, що відповідає високій деталізації (короткі прямі елементи контуру), потім (коли $RqstAz$ відповідає орієнтації кромки об'єкта) єдина лінія виділяється в одному острівці, що відповідає максимальному узагальненню. Саме таким чином і реалізований принцип надмірності інформації про контур. При цьому умовна границя «рівня узагальнення» визначається σ -параметром динамічного фільтра та коефіцієнтом перекриття OvF . Ці ж самі параметри також визначають стійкість алгоритму до флуктуацій азимута градієнта (шумів і аберацій на зображенні).

3.3.5 Формування списку відрізків

З отриманих кластерів (острівців) далі необхідно отримати вписані відрізки у вигляді списку їх параметрів. Головним чином це координати країв відрізка ($X_{1,2}$ та $Y_{1,2}$). Також в якості допоміжної інформації вказуються координати центральної точки відрізка (X_{CP}, Y_{CP}) і напрямок градієнта зображення, описуваного цією лінією ($GrAz$), який є векторною сумою градієнтів від кожного пікселя в кластері. Крім того, в якості параметрів достовірності для кожного відрізка вказані кількість пікселів в групі (острівці) й параметр розкиду азимутів піксельних градієнтів в цій групі ($AzDev$).

Перш за все поточна група пікселів (кластер) перевіряється на достатність кількості пікселів. Ця мінімально допустима кількість дорівнює $1/\sqrt{2} \text{ MinStrL}$ (MinStrL – мінімальна довжина відрізка обрана користувачем). Потім визначаються параметри оптимальної прямої, вписаної в острівець пікселів відповідно до наступної моделі:

$$y = \operatorname{tg}\left(GrAz + \frac{\pi}{2}\right)(x - X_{CP}) + Y_{CP}, \quad (3.20)$$

$$GrAz = \arctg \left(\frac{\sum_{t \in strN} d\mathbf{x}_t}{\sum_{t \in strN} d\mathbf{y}_t} \right), \quad (3.21)$$

де X_{CP} , Y_{CP} – абсциса й ордината середини відрізка, який має бути знайдений, $GrAz$ – середньозважений напрямок градієнта в поточній групі пікселів, знайдений шляхом підсумовування похідних яскравості вихідного зображення по x і по y в кожному пікселі з групи (3.21), які були знайдені на етапі обчислення масивів величини $\mathbf{F}$ і напрямку θ градієнтів зображення.

Введемо параметр $t = \mathbf{col}_t \cdot Nrow + \mathbf{row}_t$ – розіменований (одновимірний) індекс для отримання множини пікселів поточної групи (острівця), де $\mathbf{col}_t$, $\mathbf{row}_t$ – список, що містить порядкові номери стовпця та рядка t -го (поточного) пікселя з даного острівця відповідно; $Nrow$ – кількість рядків у зображенні (растрі). Тепер для доступу до кожного пікселя з острівця потрібно вже не два списки – номерів рядків і відповідних їм номерів стовпців по кожному пікселю з групи, а один список порядкових номерів пікселів в растрі.

Визначимо $\mathbf{strN}$ – множина індексів t , що відповідають поточній групі пікселів. Тоді X_{CP} , Y_{CP} (середина відрізка) може бути знайдена як абсциса й ордината середньозваженого центру острівця. Вони виражаються як:

$$X_{CP} = \frac{\sum_{t \in \mathbf{strN}} \mathbf{col}_t \cdot \mathbf{F}_t}{\sum_{t \in \mathbf{strN}} \mathbf{F}_t}, \quad (3.22a)$$

$$Y_{CP} = \frac{\sum_{t \in \mathbf{strN}} \mathbf{row}_t \cdot \mathbf{F}_t}{\sum_{t \in \mathbf{strN}} \mathbf{F}_t}. \quad (3.22b)$$

Модель (3.20) є модифікацією найпростішого рівняння $y = kx + b$, тому для того, щоб обчислити координати країв відрізка, необхідно спочатку визначити межі поточної групи («фрейма»):

$$LftFr = \min(\mathbf{col}), \quad (3.23a)$$

$$RghtFr = \max(\mathbf{col}), \quad (3.23b)$$

$$UpFr = \min(\mathbf{row}), \quad (3.24a)$$

$$DwnFr = \max(\mathbf{row}), \quad (3.24б)$$

де **Row** та **Col** – множина номерів рядків і стовпців для поточного кластера пікселів.

Для визначення точок перетину знайденої прямої з отриманими лівою та правою межами «фрейма» необхідно підставити $LftFr$ і $RghtFr$ замість x в (3.20). Отримані величини позначимо Y_{Lft} та Y_{Rght} відповідно. Для горизонтальних кордонів можна виразити це рівняння відносно y :

$$x = \frac{y - Y_{CP}}{\tan\left(GrAz + \frac{\pi}{2}\right)} + X_{CP}. \quad (3.25)$$

Для пошуку точок перетину рівняння прямої та верхньої (нижньої) межі фрейму необхідно в дане рівняння аналогічно підставити $UpFr$ і $DwnFr$ замість y , щоб отримати X_{Up} та X_{Dwn} . Всі основні елементи при обчисленні параметрів вписаного в острівцець відрізка показані на рис. 3.16.

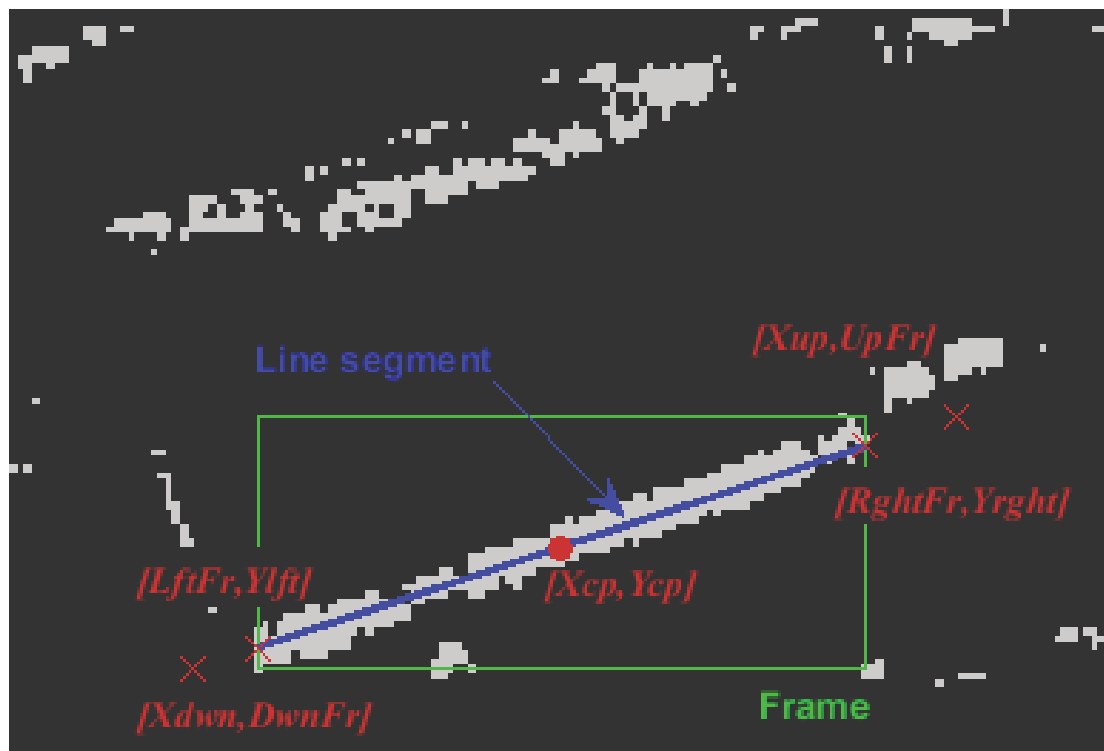


Рис. 3.16 Приклад формування параметрів відрізка

З отриманих чотирьох точок перетину вибираються ті, які лежать в межах відрізків контура фрейма, за допомогою вбудованої в програмний пакет MatLab функції `inpolygon.m`, аналітично ж пара точок, що відповідає кінцям відрізка, має підпорядковуватися таким правилам для вертикальних і горизонтальних кордонів фрейму відповідно:

$$RghtFr > X_{Up,Dwn} > LftFr, \quad (3.26)$$

$$DwnFr > Y_{Lft,Rght} > UpFr. \quad (3.27)$$

Необхідно мати на увазі, що координата Y зростає разом із адресою рядка row в растрі, тому чисельно $DwnFr > UpFr$.

Ключовим параметром значущості для кожного відрізка є параметр розкиду азимутів градієнтів у множині пікселів даної групи. Обчислення дисперсії цього параметру недоцільне, тому що для різних випадків сильно відрізняються кількість пікселів в острівці та типові значення величини градієнта F . Крім того, запобігання помилкових значень дисперсії в випадках, коли азимут градієнта пікселів коливається близько $\pm\pi$, потребує додаткових обчислювальних ресурсів. Тому використовуємо альтернативний підхід, а саме – векторне та модульне підсумування піксельних градієнтів в групі. Обчисливши відношення довжини сумарного вектора градієнта зображення до суми довжин градієнтів кожного пікселя в групі, отримаємо зручну величину, яка вказує на розкид азимутів, яка від початку нормована (не перевищує одиницю), та яка не залежить від кількості пікселів:

$$AzDev = \frac{GrAz}{\sum_{t \in \text{strN}} F_t}. \quad (3.28)$$

Згідно з наведеними виразами формується список параметрів, достатній для побудови цих відрізків в межах растру. Таким чином, розроблений набір функцій описує прямі фрагменти контуру об'єкта за допомогою одних тільки відрізків.

3.3.6 Проріджування та сортування відрізків

Реалізація підходу надмірності інформації про контур призначена для формування максимально можливої кількості гіпотез по антропогенним об'єктам без істотних обмежень необхідних обчислювальних ресурсів. З цієї причини на виході процедури формування відрізків на будь-якому знімку з наведеного набору [88] формується список, що складається з 120–160 тисяч відрізків. Це відбувається тому, що багато відрізків з високою значущістю дублюються в великому числі ітерацій $RqstAz$. У той самий час в рамках запропонованої концепції з цього списку повинні будуть бути обрані пари відрізків, відповідні прямим кутам будівель. Цього можна досягти тільки шляхом порівняння кожного відрізка з кожним іншим відрізком зі списку, що призводить до квадратичної залежності часу його подальшої обробки від розміру цього списку. Тому для досягнення прийняттого часу обробки без помітної втрати якості роботи алгоритму була розроблена процедура проріджування списку прямих для зниження їх кількості. Зокрема, в наведеному наборі даних [88] для кожного зображення відбувається типове зменшення кількості з понад 100 000 до 18 000 відрізків.

Для подальшої обробки списку відрізків список параметрів, які характеризують кожен відрізок, має бути розширений на два додаткових стовпчика, а саме: довжину відрізка ($strL$) та індекс значущості кожної прямої ($Tind$). Тут під значущістю розуміється числовий параметр, що дозволяє зробити однозначний вибір лише одного відрізка з усієї множини подібних близьких відрізків так, щоб він найкращим чином представляв певну частину контуру. Було зроблено ряд спроб виразити індекс значущості через розкид напрямків градієнтів зображення, середню величину інтенсивності градієнта $\bar{F}_t$, величину векторної суми градієнта острівця та кількість пікселів в острівці, проте найбільш універсальним виявився індекс значущості, рівний безпосередньо розкиду напрямків азимута $AzDev$. Величина значущості кожної прямої є підставою для однозначного вибору одного відрізка зі всієї множини

подібних відрізків, отриманих практично з одного й того ж острівця пікселів, з подальшим видаленням всіх інших, менш значущих відрізків. Отже, задача проріджування зводиться до пошуку (в циклі) для кожної прямої сімейства подібних прилеглих відрізків.

Оскільки при будь-якій реалізації алгоритму необхідно співставляти кожен відрізок з усіма іншими, має значення порядок прямих в списку. Тому для того щоб можна було гарантувати однаковий результат проріджування незалежно від порядку перебування відрізків, список попередньо сортується за значущістю прямих, і цикл починається з найбільш значущих відрізків. Так, в циклі завжди виділяється одна головна пряма (відрізок) з більшою значущістю та всі інші (другорядні) відрізки, для яких обчислюється величина подібності до головного відрізка.

Числове значення подібності для будь-якої пари відрізків (*SameSrsMtric*) може бути знайдено виходячи з таких параметрів, як розбіжність орієнтацій відрізків $\Delta\theta$, відстань між центрами відрізків, а саме її перпендикулярна до головного відрізка проекція *AcrDist*, і паралельна проекція *PrlDist*, а також розбіжність довжин відрізків ΔL . Останні два параметри зручно виразити в долях довжини головного відрізка. Всі чотири параметри (ознаки) показані на рис. 3.17.



Рис. 3.17 Приклад перевірки двох відрізків на предмет належності до однієї групи

Маючи чотири параметри для співставлення відрізків, було б ненадійно робити відбір в групу схожих із головним відрізків, спираючись лише на факт неперевикнення порогового значення за всіма параметрами, тому для відбору використовувалася евклідова відстань в чотиривимірному просторі ознак, яка також відома у літературі як Евклідова метрика [90]. Для того, щоб було можливо обчислити в цьому базисі відстань як таку, необхідно визначити норму для кожного вектора базису, тобто одиничну різницю кутів, одиничну частку поперечної відстані, та ін. Для цієї мети були підібрані оптимальні (для даної задачі та набору зображень) норми вимірів (threshold-величини):

$$\Delta\theta_{TH} = 1,8^\circ, \quad (3.29a)$$

$$AcrDist_{TH} = 0,5MinStrL, \quad (3.29b)$$

$$PrlDist_{TH} = \frac{1}{6}mstrL, \quad (3.30a)$$

$$\Delta L_{TH} = 0,5mstrL, \quad (3.30b)$$

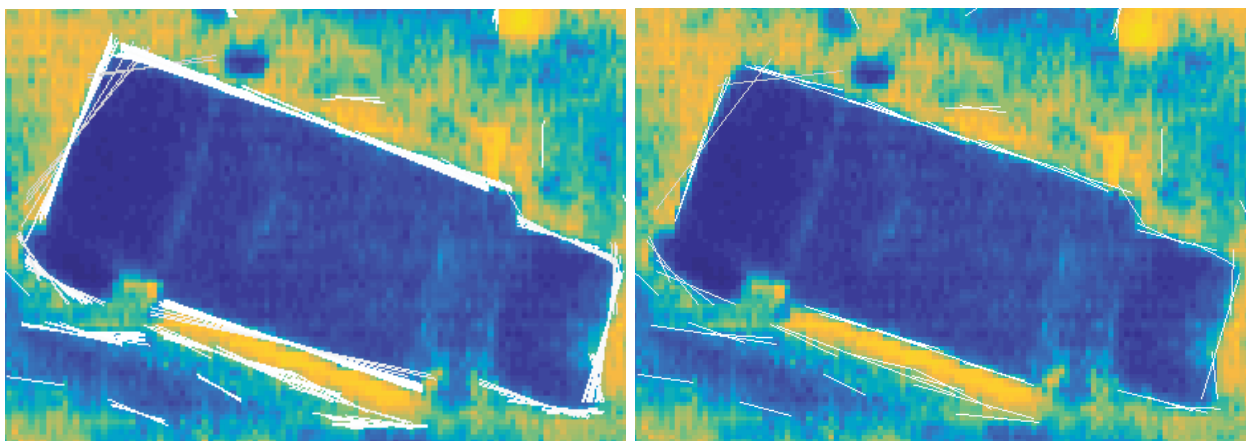
де $MinStrL$ – встановлена користувачем мінімально допустима довжина відрізка (в пікселях), $mstrL$ – довжина головного відрізка.

Таким чином, критерій належності кожного відрізка до групи з відповідним головним відрізком можна записати в наступному вигляді:

$$\sqrt{\frac{\Delta\theta^2}{\Delta\theta_{TH}^2} + \frac{AcrDist^2}{AcrDist_{TH}^2} + \frac{PrlDist^2}{PrlDist_{TH}^2} + \frac{\Delta L^2}{\Delta L_{TH}^2}} \leq 2. \quad (3.31)$$

Гранична величина дорівнює двом, оскільки саме ця величина відповідає випадку, коли кожна ознака дорівнює своїй нормувальній (threshold) величині.

Реалізована таким чином процедура проріджування списку відрізків, незважаючи на громіздкість, працює відносно швидко за рахунок того, що відрізки з високою значущістю відомі апріорі, а ті відрізки, що увійшли з ними в одну групу з меншою значущістю, позначаються як видалені, тому для них не проводиться пошук подібних відрізків. Повний і проріджений списки відрізків, нанесених на розглянутий фрагмент растра, як наочний приклад роботи процедури, наведено на рис. 3.18. Всі наведені нормувальні величини можуть варіюватися в залежності від вимог до часу обчислень і, як стане очевидно далі, вимог до співвідношення пропущених і помилкових цілей.



а) Повний список відрізків

б) Проріджений список відрізків

Рис. 3.18 Відрізки прямих меж об'єктів, що отримані зі знайдених зв'язкових областей і нанесені на зображення

3.3.7 Виявлення об'єктів з формою, характерною для споруд

Як було зазначено вище, в якості основних ознак антропогенного об'єкта на зображенні були прийняті наявність прямих меж об'єкта та прямих кутів між ними. В якості першого кроку необхідно об'єднати відрізки в об'єкти-кути.

Для того щоб уникнути необхідності співставляти кожен відрізок з усіма іншими, зручно спочатку відсортувати весь список за орієнтацією відрізків з тим, щоб потім розділити його на два списки – так звані Master- і Slave-відрізки. Кожен відрізок з першого списку зіставляється тільки з тими Slave-відрізками, які входять до необхідного діапазону за азимутом, тобто за орієнтацією. Інакше кажучи, в першому списку присутні всі відрізки з орієнтацією від $-\pi$ до $0 + RghtAng_{TH}$, а в другому – від $0 - RghtAng_{TH}$ до $+\pi$, де $RghtAng_{TH}$ – встановлюваний користувачем допуск, за яким кут між відрізками можна вважати прямим. Далі для кожного Master-відрізка робиться пошук першого підходящого за азимутом Slave-відрізка, а зіставлення відбувається в циклі, починаючи з цієї адреси та до першого Slave-відрізка з азимутом (орієнтацією), що перевищує задану межу.

Об'єктом-кутом (прямим кутом будівлі) вважаються відрізки, які зорієнтовані під близьким до прямого кутом один до одного та розташовані

досить близько до взаємної точки перетину. Якщо ця точка лежить за межами обох відрізків, то відстань від точки перетину до найближчого краю кожного відрізка має бути не більшою ніж *CornMinDist*. Таким чином, після завершення процедури формування об'єктів-кутів формується біт-маска розміром в довжину Master-списку на довжину Slave-списку, де кожна одиниця відповідає своєму об'єкт-кутку (парі відрізків).

Однак, кінцевою метою в даному випадку є виділення потенційних об'єктів-споруд. Приймемо, що зображення шуканого об'єкта (будівлі) повинно мати, принаймні, три прямі сторони і, відповідно, два прямих кута між ними. Це означає, що дві одиниці в біт-масці Master- і Slave-відрізків, відповідних об'єктам-кутам, повинні знаходитися в одному рядку, якщо у них спільний Master-відрізок, або в одному стовпці, якщо у них спільний Slave-відрізок. Насправді об'єкти можуть бути виражені й більш складними взаємозв'язками, тому була розроблена спеціальна процедура рекурсивного пошуку зв'язків (рядкових і стовпчикових) в біт-масці. Такий алгоритм може виявляти об'єкти, які складаються з необмеженої кількості ліній. Приклад виявлення даного об'єкту наведено на рис. 3.19. Тут при обчисленнях були взяті параметри

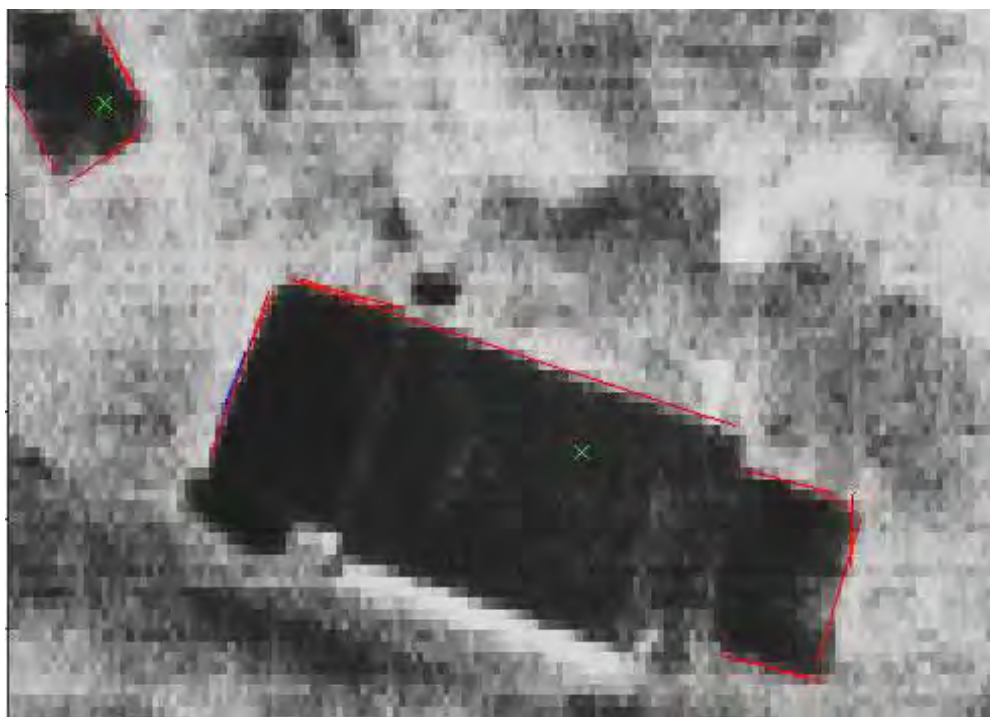


Рис. 3.19 Відрізки, що зведені в об'єкт-споруду

$RghtAng_{TH} = \pm 15^\circ$ і $CornMinDist = 9$ пікселів. З рисунка видно, що об'єкт-споруда складається з об'єктів-кутів з відрізками довжиною більше десяти пікселів.

Таким чином, поставлену задачу можна вважати розв'язаною, оскільки передбачається в рамках робіт із зовнішнього калібрування космічних засобів ДЗЗ робити знімки однієї і тієї ж самої місцевості з різних ракурсів. Такий підхід дозволить відкинути неоднозначні (в сенсі форми) об'єкти, а ті об'єкти, які залишилися на всіх ракурсах, можуть бути далі досліджені з метою визначення їх придатності для радіометричного калібрування сенсора.

Крім того, при розробці рішень, заснованих на тренуванні нейронної мережі, важливо надати велику і, в той самий час, якісну вибірку, що не завжди вдається досягти. Розроблений алгоритм є зручним інструментом, який дозволяє виявити практично всі можливі антропогенні об'єкти, або, інакше кажучи, об'єкти неприродної форми. З його допомогою оператор вже може не шукати об'єкти, які відповідають різним їх класам самотійно, а просто класифікувати запропоновані об'єкти з одержаного переліку. Цей алгоритм дозволяє швидко отримати достатньо великий альбом зображень будівель, мостів, залізничних переїздів, і т. ін., а також альбом контрастних об'єктів рідкісної форми, які, однак, будівлями чи спорудами не являються.

3.3.8 Оцінка продуктивності методу

Для обчислень, які проводяться без використання графічного процесора відеокарти, за умови, що алгоритм виконується в одному потоці, в поточній модифікації на його реалізацію витрачається 20–30 хвилин на одне зображення з набору [88] ($16\,000 \times 576$ пікселів). Випробування проводилися на тестовому комп'ютері Intel Core i3 3217U 4Gb RAM (5 GT/s). Для обробки були взяті перші 20 зображень. Вони містять зображення як одиночних будівель, так і цілих житлових масивів. Будівлі зі складним контуром найчастіше визначалися

як кілька об'єктів. За підсумком випробувань було виявлено всього 1836 потенційних антропогенних об'єктів. При цьому за підсумками розмітки вручну на цих знімках були відзначені 253 будівлі, з яких тільки 4 не були виділені алгоритмом. Таким чином, у рамках використання цього алгоритму для задач зовнішнього калібрування такий результат можна вважати успішним.

Щодо альтернативних алгоритмів, то вихідні набори даних з опублікованих робіт інших авторів [32–39], як правило, у відкритому доступі відсутні, або представлені знімками інших типів. Однак, незважаючи на це, можна порівняти ефективність виявлення прямих фрагментів контуру на одному наборі даних за допомогою перетворення Хафа [40] і з використанням розроблених програмних рішень. Дане перетворення застосовується до біт-масок з визначеним контуром товщиною в один піксель, тому на вхід перетворювача подаються не виділені раніше кластери пікселів (Line-support Regions), а контури, отримані за методом Канні [30]. Результати такої обробки показані на рис. 3.20, а. У порівнянні з розробленим алгоритмом (рис. 3.20, б) умовно прямі фрагменти контурів за Хафом виділяються гірше, особливо ті з них, частини яких найбільш відхиляються від прямолінійних. Крім того, короткі межі близько десяти пікселів за методом Хафа, як правило, взагалі не виділені. Очевидна причина такого результату – подача на вхід детектора меж Канні розмитого (за Гаусом з параметром $\sigma = 2,5$) зображення. Саме ж це розмиття забезпечує придушення шумів і краще виокремлення довгих умовно прямих кордонів об'єктів. При цьому для зображень з такими дрібними об'єктами, вочевидь, перетворення Хафа погано підходить, проте його безперечною перевагою є висока швидкість обробки – на кожне зображення потрібно менше 15 секунд.

Кінцевий етап визначення потенційних антропогенних об'єктів наведено на рис. 3.20, в. Представлені на рисунку червоні смуги – це лінії, які беруть участь у формуванні контуру об'єкта-споруди. Сині смуги – це лінії, з яких були сформовані об'єкти-кути, але які не беруть участь у формуванні контуру

об'єкта-споруди. Зеленим хрестом відзначені центри гіпотетичних будівель (або антропогенних об'єктів).

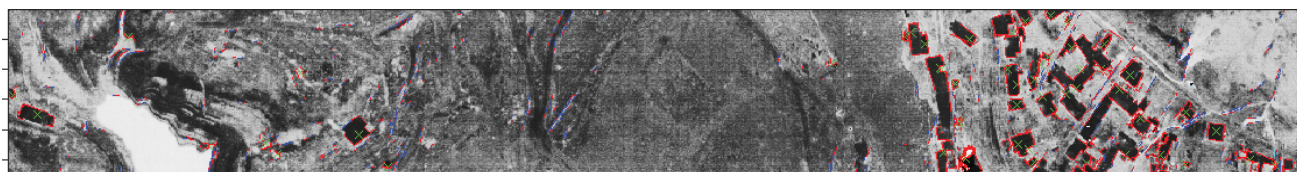
Таким чином, задачу по виділенню усіх можливих антропогенних споруд на чорно-білому знімку земної поверхні з метою їх подальшого використання для зовнішнього післястартового калібрування сенсорів космічного базування можна вважати розв'язаною. Представлений метод є оригінальним і ефективним. Також відзначимо, що усі наведені моделі та метод загалом може бути успішно використаний для інших задач у сфері обробки зображень.



а)



б)



в)

Рис. 3.20 Лінії прямих фрагментів контурів, отримані шляхом застосування перетворення Хафа (а), лінії прямих фрагментів контурів, побудовані шляхом застосування розробленого алгоритму (б), лінії, використані для визначення антропогенних об'єктів і самі об'єкти (в)

3.4 Висновки до розділу 3

1. Запропоновано для зовнішнього експлуатаційного калібрування РСА космічного базування використовувати металеві споруди господарського призначення, зокрема, водонапірні вежі та металеві цистерни, а також споруди з шиферною покрівлею. Проведені експериментальні дослідження коефіцієнта відбиття й ЕПР масштабних моделей таких споруд, які задовольняють принципу електродинамічної подібності. Досліджені діаграми зворотного розсіяння поширених покрівельних матеріалів, зокрема, хвилястого шиферу. Результати експериментальних досліджень і космічні радіолокаційні зображення показали, що такі споруди можуть бути використані для зовнішнього післястартового калібрування РСА космічного базування.
2. Показано, що антропогенні металеві об'єкти придатні для використання їх у якості реперів для геометричної корекції знімків і для уточнення RPC-моделі корекції РЛЗ. Деякі типи покрівельних матеріалів, зокрема, хвилясті шиферні пластини, придатні для калібрування радіометричних характеристик РСА космічного базування, зокрема, залежності яскравості об'єкта на РЛЗ від його реальної ЕПР, тобто передатної функції РСА, а також нижньої та верхньої меж динамічного діапазону РСА. Дані лабораторних вимірювань були використані при наземному забезпеченні космічної системи 710 КС (додаток Б).
3. Розроблено новітній алгоритм виділення на космічному знімку усіх можливих антропогенних об'єктів придатних для зовнішнього експлуатаційного калібрування сенсорів космічного базування. Алгоритм має такі основні переваги:
 - Найбільш загально сформульовані критерії вибору контуру – тільки наявність прямих ліній і прямих кутів між ними. При такому підході алгоритм не потребує тренувального набору даних.
 - Стійкість до шумів і спотворень форми контуру. Це досягається за рахунок адаптивної фільтрації та надмірності набору ліній по кожній групі пікселів, які формують відрізок. Такий підхід дозволяє сформувати максимально

можливу кількість гіпотез по зображенню саме в рамках виконання завдання по визначенню антропогенних об'єктів. Хибні цілі мають бути відбраковані при обробці зображень даної місцевості з інших ракурсів.

- Можливість пошуку дуже малих об'єктів (аж до десяти пікселів), якщо дозволяють обчислювальні ресурси та часові обмеження.
- Відсутність квантування по орієнтації країв, які мають бути виділені. Поряд з однією з передових технологій з пошуку прямих відрізків – розглянутим перетворенням Хафа, відсутність квантування є перевагою, оскільки на таких великих знімках, як в описаному випробувальному наборі, при точності в долі градуса за орієнтацією та долі пікселя за положенням, так званий акумулятор (масив гіпотез для перетворення Хафа) може затребувати десятки гігабайт оперативної пам'яті, що не завжди є прийнятним. При цьому фрагментована обробка зображень (наприклад, зміщуваним вікном) вимагає набагато більше часу, якщо потрібно гарантувати відсутність пропущених ліній аж до максимально-передбаченої довжини.
- Стабільність алгоритму, а саме – слабка чутливість до контрасту зображення та нечутливість до кількості об'єктів, що будуть знайдені на одному знімку. Це також одна з переваг принципу надмірності набору прямих, які описують контури об'єктів. По суті, знижуючи поріг бінаризації при формуванні кластерів пікселів, можна домогтися будь-якої чутливості за контрастом, якщо збільшення часу обчислення не є критичним.

Результати досліджень, що увійшли у розділ 3, доповідалися на конференціях [82, 93–99] і опубліковані в статтях [100–102].

РОЗДІЛ 4

ВИКОРИСТАННЯ РЕТРАНСЛЯТОРА ЗІ СЛАБКООСПРЯМОВАНОЮ АНТЕНОЮ ДЛЯ ЗОВНІШНЬОГО КАЛІБРУВАННЯ РСА КОСМІЧНОГО БАЗУВАННЯ

В даному розділі розглянуті основні вимоги до ретранслятора, закономірності взаємного розташування приймальної та передавальної антен для забезпечення регулювання зворотного зв'язку між ними, а також запропоновані та експериментально досліджені способи розширення робочої смуги частот антени типу вібратор над екраном.

4.1 Дослідження транспондерів для зовнішнього післястартового калібрування РСА космічного базування

При розв'язанні ряду задач забезпечення зовнішнього післястартового калібрування (в основному роздільної здатності), до наземних відбивачів пред'являються досить суперечливі вимоги. З одного боку, відбивач повинен мати високу ЕПР на рівні верхньої частини динамічного діапазону РСА (близько 50 дБ), з іншого боку, відбивач повинен мати розміри апертури, близькі до того, щоб вважати його точковим.

Крім того, при геометричній корекції знімків дуже важлива точність визначення координат на знімку використаних для цього реперів. Реальна точність вимірювання геодезичних координат, як правило, становить близько десяти сантиметрів. У сучасних дослідженнях для геометричної корекції знімків нерідко використовують активні ретранслятори, хоча відзначимо, що в прожекторному режимі зйомки РСА загальна апертура приймальної та передавальної антени (з урахуванням відстані між ними) не зможе бути вміщена в один піксель РЛЗ.

Для зменшення розмірів загальної апертури ретранслятора в якості приймальної та передавальної антени нами була використана антена типу вібратор над екраном. Апертура такої антени менша за апертуру рупорної антени з хорошим КСХ та істотно менша за апертуру дзеркальної антени для тієї ж довжини хвилі. Крім того, як показано в роботі [103], чвертьхвильовий вібратор над екраном квадратної форми зі стороною $1,2 \lambda$ дозволяє отримати широку діаграму спрямованості (ДС). Така ДС очевидно необхідна, наприклад, для калібрування двох РСА в режимі бістатичної зйомки [44], а також дозволяє знизити вимоги до точності орієнтації антени в цілому.

Іншою перевагою антени даного типу також є те, що її можна розділити на відбиваючі (дифрагуючі) елементи, та врахувати їх всі, один за одним. Це дозволяє підібрати таке взаємне розташування антен, при якому зворотний зв'язок, що виникає між прийомною та передавальною антеною, може бути тільки негативним, що, в свою чергу, гарантує неможливість для підсилювача ретранслятора перейти в режим самозбудження. З іншого боку, негативний зворотний зв'язок також не має бути надто глибоким, оскільки це сильно вплине на сумарний коефіцієнт підсилення ретранслятора.

Таким чином, необхідно встановити залежність між взаємним розташуванням приймальної та передавальної антен і глибиною зворотного зв'язку між ними. Будемо виходити з того, що при використанні ретранслятора негативний зворотний зв'язок все ж буде вибраний з деяким запасом для компенсації можливого перевідбиття ретрансльованого сигналу на місцевості, тому запропонована нижче теоретична залежність зворотного зв'язку від взаємного розташування антен може містити деякі спрощення.

Розглянемо зворотний зв'язок в термінах радіоелектроніки [104]:

$$K_U' = \frac{K_U}{1 + \beta \cdot K_U}, \quad (4.1)$$

де K_U' – коефіцієнт підсилення системи, охопленої зворотним зв'язком через приймальну та передавальну антени, K_U – коефіцієнт підсилення підсилювача, β – глибина зворотного зв'язку.

В даному випадку глибина зворотного зв'язку дорівнює:

$$\beta = \frac{E_{FB}}{E_{OUT}}, \quad (4.2)$$

де E_{OUT} – напруженість електричного поля випромінюючої антени ретранслятора, E_{FB} – напруженість поля зворотного зв'язку.

Аналізуючи далі амплітуди та фази дифрагованих полів, будемо визначати їх в частках від E_{OUT} . Це дозволить оперувати безрозмірними величинами. Тоді задача зводиться до пошуку на приймальній антені суми поля передавальної антени та полів, що дифраговані від країв екранів.

Розглянемо зворотний зв'язок (з урахуванням екранів), який виникає між парою антен вібраторного типу у випадку їх розміщення в одній площині. Оскільки вібраторні антени паралельні одна до одної, задача може бути зведена до двовимірної – її геометрія наведена на рис. 4.1

Відзначимо, що для того, щоб на приймальному вібраторі наводилася електрорушійна сила, збуджена полями дзеркального відображення передавального вібратора, ці антени мають буквально торкатися екранами, такий граничний випадок розглянутий не буде. Крім того, оскільки антени ідентичні та розташовані симетрично, досить врахувати хвилю, яка проходить через внутрішню грань екрану однієї антени, при цьому шлях через внутрішню грань другої антени виявиться однаковим. Те ж стосується і зовнішніх крайок. Оскільки вибір глибини зворотного зв'язку передбачає певний запас його рівня, відбиття другого та більших порядків в даній моделі розглядати також не будемо.

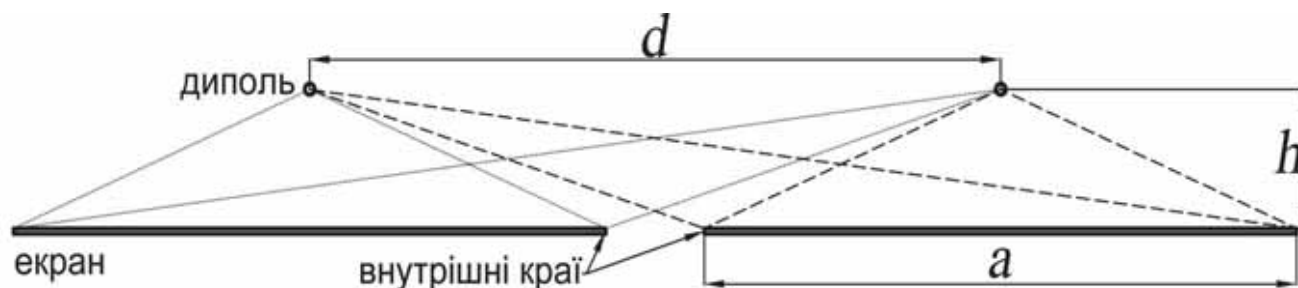


Рис. 4.1 Геометрія взаємного розташування приймальної та передавальної антен транспондера для варіанту їх розміщення в одній площині

Таким чином:

$$E_{FB} = E_{LS} + 2E_{IF} + 2E_{OF} , \quad (4.3)$$

де E_{FB} – поле зворотного зв'язку, що має бути знайдено, E_{LS} – поле передавального вібратора на приймальному вібраторі, визначене в геометрооптичному наближенні, E_{IF} – поле, дифрагзоване на внутрішньому ребрі екрану, E_{OF} – поле, дифрагзоване на зовнішньому ребрі екрану.

Амплітуди та фази цих полів залежать від сумарної відстані, яка пройдена хвилею від передавального до приймального вібратора. З рис. 4.1 видно, що:

$$r_{LS}(d) = d , \quad (4.4)$$

$$r_{IF}(d) = \sqrt{h^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2} + \sqrt{h^2 + \left(d - \frac{a}{2}\right)^2} , \quad (4.5)$$

$$r_{OF}(d) = \sqrt{h^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2} + \sqrt{h^2 + \left(d + \frac{a}{2}\right)^2} , \quad (4.6)$$

де r_{LS} – відстань між вібраторами, r_{IF} – відстань, яка пройдена хвилею дотично до внутрішнього ребра екрану, r_{OF} – відстань, яка пройдена хвилею дотично до зовнішнього ребра, h – висота вібратора над екраном ($0,25 \lambda$), a – сторона екрану ($1,2 \lambda$), d – відстань між осями диполів (варійований параметр).

Аналогічно до [105] отримуємо вираз для електричної складової електромагнітного поля в ближній зоні антени. У даній системі може існувати тільки вектор E , який паралельний осі диполя. З урахуванням того, що всі розміри наведені в частках довжини хвилі та того, що поле шукаємо в площині, перпендикулярній осі вібратора, в загальному випадку напруженість електричного поля залежить від відстані, пройденої хвилею:

$$\dot{E}(r) = \frac{l\sqrt{16\pi^4 r^4 - 4\pi^2 r^2 + 1}}{8\pi^2 r^3} e^{-i2\pi \frac{c}{V_\phi} r} , \quad (4.7)$$

де r – відстань, пройдена хвилею до досліджуваної точки, l – довжина вібратора ($0,5 \lambda$), c – швидкість світла, V_ϕ – фазова швидкість хвилі, яка може бути знайдена із співвідношення, наведеного в [105]:

$$V_{\Phi} = \frac{c}{1 - \frac{1}{2\pi r} \operatorname{arctg}\left(2\pi r - \frac{1}{2\pi r}\right)}. \quad (4.8)$$

Відзначимо, що величина поля в точці згідно (4.7) є комплексною, при цьому після складання полів всіх джерел згідно (4.3) необхідно отримати дійсну глибину зворотного зв'язку. Тому будемо вважати, що підсилення в системі відбувається миттєво та в досліджуваній момент часу фаза сигналу і на приймальній і на передавальній антені дорівнює нулю, тобто напруженість поля ретрансльованого сигналу $\dot{E}_{IN}$ на приймальній антені представляє дійсну величину. Для того, щоб зворотний зв'язок був негативним ($\beta < 0$) необхідно, щоб $\dot{E}_{IN}$ і $\dot{E}_{FB}$ склалися в протифазі. Отже, щоб врахувати набіг фази сумарного поля зворотного зв'язку $\dot{E}_{FB}$ необхідно брати її проекцію на дійсну вісь: $E_{FB} = \operatorname{Re}(\dot{E}_{FB})$. Таким чином, виходячи з геометричної теорії дифракції та згідно з принципами, викладеними в [103, 106], з урахуванням зсуву фази полів, відбитих від ребер екранів одержимо:

$$\beta = E_{FB} = \operatorname{Re}[\dot{E}(r_{LS}(d)) - 2\dot{E}(r_{IF}(d)) - 2\dot{E}(r_{OF}(d))]. \quad (4.9)$$

За отриманими співвідношенням була розрахована залежність глибини зворотного зв'язку β від відстані між вібраторами d . Вона наведена на рис. 4.2.

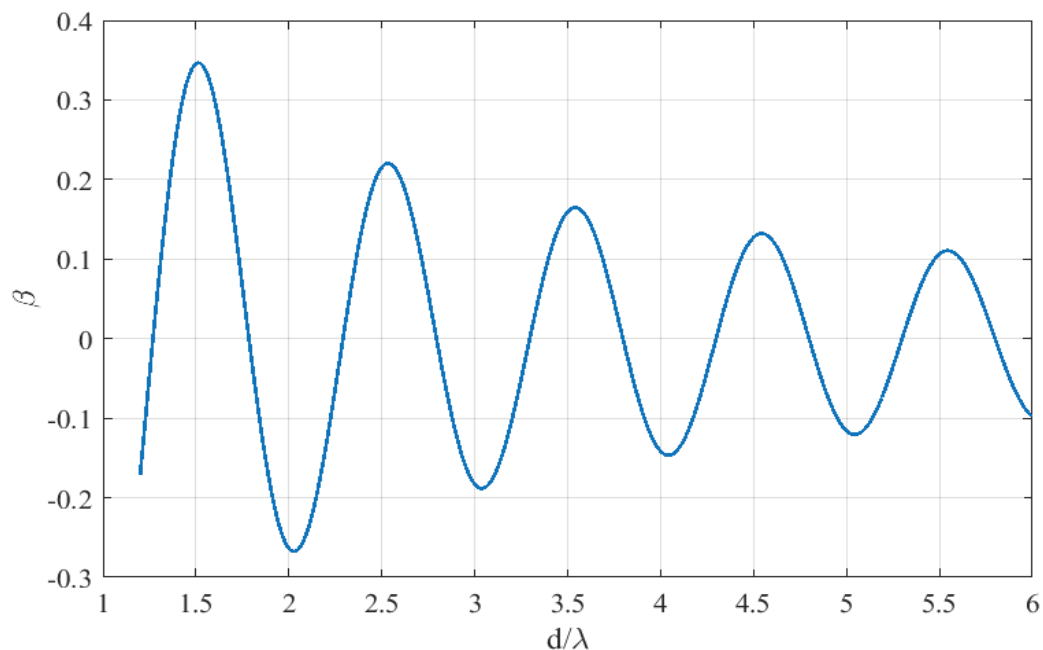


Рис. 4.2 Залежність глибини зворотного зв'язку між приймальною та передавальною антенами транспондера від відстані між вісьми вібраторів

Таким чином, необхідний зворотний зв'язок може бути заданий з високою точністю шляхом зміни відстані між приймальною та передавальною антенами транспондера. Необхідно брати до уваги, що близьке взаємне розташування антен впливає на реактивну складову їх вхідного опору. Відзначимо також необхідність врахування впливу помилок взаємного розташування антен на точність задання зворотного зв'язку. Нами ці ефекти не враховуються, оскільки вони виключаються при калібруванні перед безпосереднім використанням в польовому експерименті, по аналогії з іншими ретрансляторами [107]. Таке калібрування проводять методом трьох транспондерів, або за допомогою спеціальних відбивачів-еталонів [48].

Розраховані залежності та концепція універсального ретранслятора на базі приймачів прямого підсилення з парою слабкоспрямованих антен типу вібратор над екраном була апробована в ході прямого експерименту на контрольно-калібрувальному комплексі «Скрипалі» при валідації космічного апарату «Кондор-Э». Зовнішній вигляд використовуваного експериментального макету представлений на рис. 4.3.

Транспондер складається з двох однакових вібраторних антен, розташованих над металевим екраном квадратної форми, та трьох транзисторних підсилювачів з низьким рівнем власних шумів промислового виготовлення типу ТРУ 002-01. Коефіцієнти підсилення антен рівні 7,5 дБ. Коефіцієнти підсилення кожного підсилювача не менші за 20 дБ. Таким чином, повний коефіцієнт підсилення розробленого транспондера зі слабкоспрямованими антенами без урахування зворотного зв'язку становить 75 дБ, тобто такого ж порядку, як і у відомих зарубіжних транспондерів з високоспрямованими дзеркальними антенами.

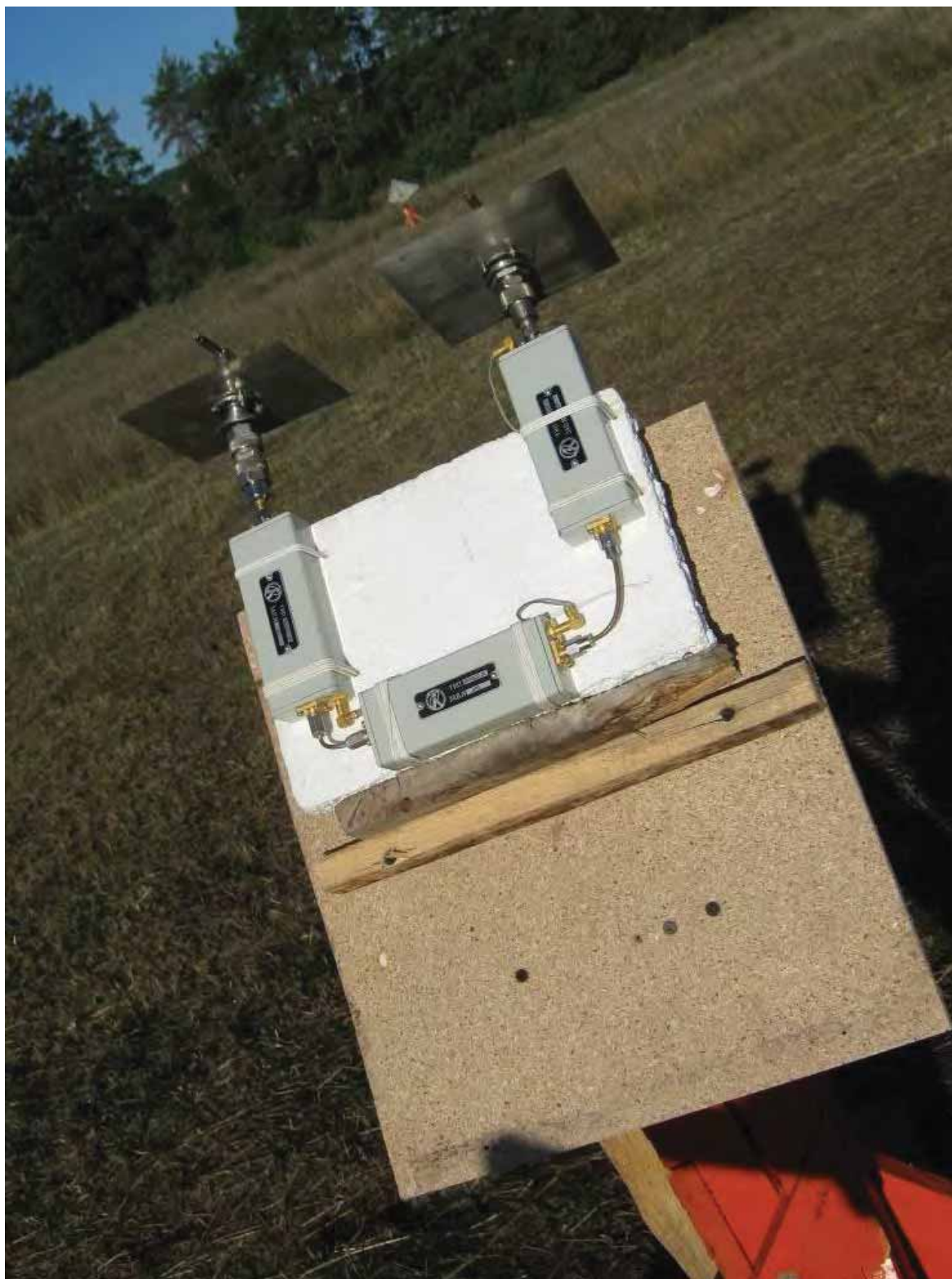


Рис. 4.3 Зовнішній вигляд експериментального ретранслятора в ході його польових випробувань

4.2 Спосіб узгодження антени в заданій широкій смузі частот

Задача створення вібраторних антен кінцевої довжини з високим коефіцієнтом корисної дії в широкій смузі частот актуальна для багатьох прикладних задач окрім зовнішнього калібрування РСА. Її розв'язання пов'язане, насамперед, із забезпеченням узгодження вібраторного випромінювача з коаксіальним фідерним трактом в заданій робочій смузі частот. Це досягається використанням трансформаторів повних опорів, які, стосовно до вібраторних випромінювачів, зазвичай, називають узгоджувальними пристроями. Техніка узгоджувальних трансформаторів досить добре відпрацьована для випадку резонансних (близьких до напівхвильового) вібраторних випромінювачів, в яких реактивна складова вхідного опору дорівнює або близька до нуля. У випадку необхідності роботи антени в широкій смузі частот, коли необхідно узгоджувальним пристроєм компенсувати реактивну складову вхідного опору вібратора, створення узгоджувального пристрою досить проблематично.

Метою роботи, представленої в цьому розділі, є експериментальне дослідження можливості перебудови резонансної частоти й узгодження вібраторної антени кінцевої довжини, розташованої паралельно до ідеально провідного плоского екрану, з коаксіальним фідерним трактом шляхом розміщення в області між вібратором і екраном неоднорідності у вигляді металевго стрижня та / або диска малих електричних розмірів.

Теоретичне розв'язання поставленої задачі зустрічає серйозні труднощі з ряду причин:

1. Неоднорідність вводиться дуже близько до вібратора в його ближній зоні й також дуже близько (малі частки довжини хвилі) до області збудження вібратора, в якій хвильові процеси вивчені недостатньо повно.
2. Характерні розміри антени порівняні з довжиною хвилі, тому прості наближені методики, засновані на методах та ідеях геометричної оптики, принципово неприйнятні.

3. Характерні розміри антени та діапазон довжин хвиль досить широкий. Задача відноситься до багатопараметричних, тому її розв'язання за допомогою розроблених до теперішнього часу комп'ютерних програм, заснованих на методах обчислювальної математики, досить важке.

Відзначимо, що принципова можливість розв'язання поставленої задачі запропонованим способом (розміщенням узгоджувальних неоднорідностей між вібратором і екраном) – не очевидна. Дійсно, для узгодження хвильоводних і випромінюючих систем з різними хвильовими опорами необхідне виконання умови повного узгодження $Z_1 = Z_2^*$. У класичних трансформаторах повних опорів управління амплітудою та фазою відбитої хвилі, по-перше, незалежне, а по-друге – реалізується в широких межах, достатніх для забезпечення необхідного значення КСХН антенно-фідерної системи. В даному випадку і амплітуда і фаза відбитої від узгоджувального пристрою хвилі, визначаються розмірами узгоджувальної неоднорідності та її положенням відносно вібратора. Іншими словами – і амплітуда і фаза хвилі, відбитої від узгоджувальної неоднорідності, можуть змінюватися в дуже обмежених інтервалах.

Для експериментальної перевірки запропонованого способу узгодження вібраторної антени з коаксіальним фідерним трактом було виготовлено чотири варіанти вібраторних випромінювачів:

1. Класичний варіант сантиметрового та дециметрового діапазонів – симетричний вібратор на жорсткому коаксіалі з двома поздовжніми щілинами в зовнішньому провіднику коаксіального хвильоводу [108].
2. Аналогічний варіант з діелектричною втулкою на жорсткому коаксіалі.
3. Симетрична вібраторна антена на двох жорстких порожніх металевих стійках, в одній з яких проходить коаксіальний кабель, що аналогічна до літакової антени радіовисотоміру [109].
4. Симетрична вібраторна антена О. О. Пістолькорса, виконана з трубки, зігнутої відповідним чином, всередині якої проходить коаксіальний кабель. Цей варіант антени аналогічний антені радіовисотоміру [109], яка встановлена на одній стійці.

Вібратори встановлювалися на металевому екрані квадратної форми з розміром сторони близько 1,5 довжини хвилі. При цьому забезпечувався електричний контакт зовнішнього провідника коаксіального фідера з екраном.

Експерименти проводилися в безлунній камері. В якості основного вимірювального засобу використовувався панорамний вимірювач КСХН і згасання. У режимі свіпуювання частоти генератора в область між вібратором і екраном вводилися узгоджувальні неоднорідності у вигляді короткого металевго стрижня, довжина якого змінювалася від $\lambda/8$ до $\lambda/4$, або кругового диска також різних діаметрів. Положення неоднорідності фіксувалося в кожному випадку за допомогою підкладки з пінопласту, яка практично не впливала на вимірювані значення КСХН. Багаторазовими змінами розмірів і положення узгоджувальної неоднорідності забезпечували мінімальне значення КСХН в максимальній смузі робочих частот. Далі вимірювалася залежність КСХН налаштованої таким чином антени від частоти. Для забезпечення максимально можливої високої точності вимірювань самі вимірювання проводилися «по точках» в режимі ручної перебудови частоти. Положення узгоджувального елемента вимірювалося та всі розміри налаштованої антени вводилися в комп'ютерну програму в якості вхідних даних. Розрахунки залежності КСХН відповідних налаштованих антен від частоти та їх діаграм спрямованості на дискретних частотах розраховувалися за допомогою програми FEKO LITE[110].

Вже попередні розрахунки й експерименти показали, що стрижнева неоднорідність дозволяє налаштовувати вібраторну антену на мінімум КСХН на певній частоті при її розміщенні поблизу вібратора на відстанях від 0,02 до 0,1 довжини хвилі. Такий самий ефект досягається при використанні диска діаметром близько половини довжини хвилі, який розташований на відстанях від 0,05 до 0,2 довжини хвилі від екрану. Відзначимо, що узгоджувальний диск не має електричного контакту з опорними стійками (антени 3 та 4) і такий контакт забезпечувався (в антені 4). Виявилося, що в обох цих варіантах

налаштування антени на мінімум КСХН можливе, мінімальні досяжні значення КСХН і резонансні частоти відрізняються незначно.

Як показали результати вимірювань, найгірші характеристики узгодження серед всіх чотирьох типів антен в широкому діапазоні частот має петльовий вібратор О. О. Пістолькорса (експериментальний макет №4). Тому розглянемо більш детально можливості узгодження та досяжні характеристики саме цього варіанту антени. На рис. 4.4, а представлена залежність КСХН експериментального макета антени без узгоджувальних елементів від частоти. Видно, що навіть в мінімумі цієї залежності на частоті близько 3,1 ГГц розрахункове значення $КСХН = 3,2$, а експериментальне $КСХН = 3,5$. Такі високі значення КСХН пояснюються відмінністю вхідного опору вібратора (близько 300 Ом) і хвильового опору коаксіального кабеля (50 Ом). На рис. 4.4, б наведена досліджувана залежність КСХН вібратора Пістолькорса, налаштованого на мінімум КСХН за допомогою штирьового узгоджувального елемента, розташованого паралельно до вібратора. В цьому випадку і розрахункові, і експериментальні величини КСХН зменшилися до 1,1, а самі криві вказують на широкосмуговий характер узгодження модифікованої таким чином антени. З рис. 4.4, в, на якому представлена досліджувана залежність КСХН вібратора, налаштованого за допомогою диска, видно, що такий узгоджувальний елемент забезпечує краще узгодження в низькочастотній області смуги робочих частот антени.

Підкреслимо, що наведені результати експериментів показують, що стрижневі узгоджувальні елементи дозволяють поліпшити узгодження антени в високочастотній області, а дискові – в низькочастотній області смуги робочих частот антени. Цей висновок відкриває можливості збільшення широкосмуговості петльових вібраторних антен шляхом використання узгоджувальних елементів обох типів одночасно. На рис. 4.4, г наведена відповідна залежність, яка підтверджує цей висновок. Таким чином, ускладнення конструкції антени узгоджувальними елементами виправдано отриманим результатом узгодження антени в 17,5 % смугі частот за рівнем

$K_{СХН} \leq 1,5$ і 18,7 % за рівнем $K_{СХН} \leq 2,0$, тим більше, що у вихідному варіанті антени такі значення $K_{СХН}$ взагалі не досяжні.

Результати розрахунків і вимірювань інших варіантів антен (антени 1,2 і 3), які мають резонансні властивості, привели до таких самих висновків, що підтверджують можливість узгодження вібраторів з фідерним трактом.

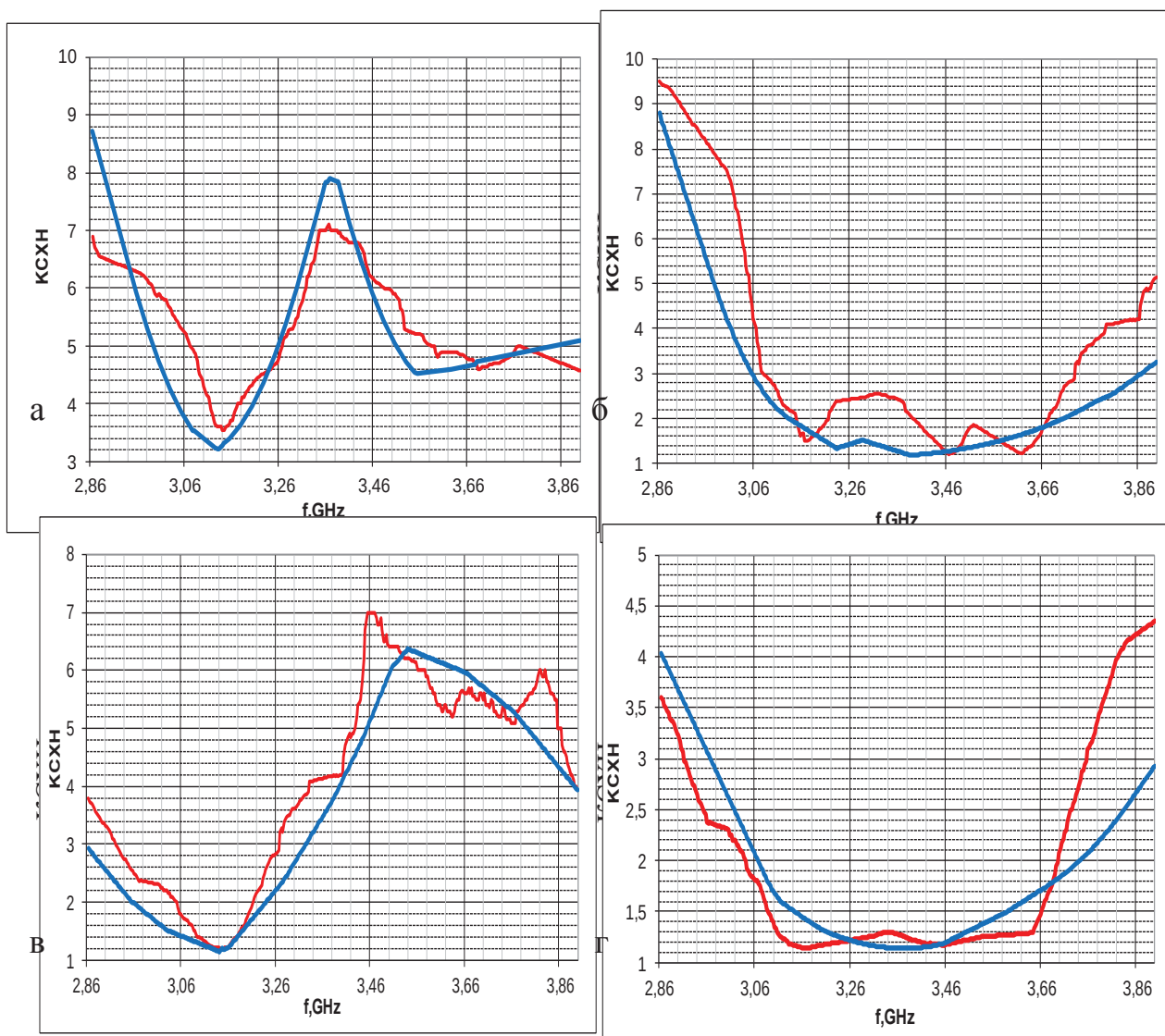


Рис. 4.4 Залежність $K_{СХН}$ петльової вібраторної антени О. О. Пістолькорса від частоти: а — без узгоджувальних елементів; б — зі стрижневим узгоджувальним елементом поблизу вібратора; в — з узгоджувальним диском поблизу екрану; г — зі стрижнем поблизу вібратора та диском поблизу екрану спільно (— розрахунок; — експеримент)

Виявилося також, що ці антени більш вузькосмугові в порівнянні з петльовим вібратором, що пояснюється більшою добротністю їх резонансів.

Розглянемо далі характеристики спрямованості досліджуваних антен. Оскільки розміри узгоджувальних елементів, в принципі, можна порівняти з довжиною хвилі, можливий їх істотний вплив на діаграму спрямованості антени. Для вивчення цього ефекту розраховувалися та вимірювалися діаграми спрямованості всіх чотирьох неналаштованих і налаштованих варіантів антени в головних площинах спостереження (електричного й магнітного векторів поля) на трьох частотах в межах робочої смуги частот. Типові результати наведені для неузгодженого петльового вібратора на рис. 4.5, узгодженого стрижнем, розташованим на відстані близько 0,005 довжини хвилі від екрану – на рис. 4.6 та широкосмугового узгодженого стрижнем і диском спільно – на рис. 4.7.

Наведені на рисунках розрахункові й експериментальні діаграми спрямованості отримані на частоті 3,13 ГГц, на якій, як видно з рис. 4.4, антена без узгоджувальних елементів має мінімальний КСХН, а КСХН узгоджених антен дорівнює 1,2–1,4. На інших частотах і розрахункові, і експериментальні діаграми спрямованості близькі до наведених.

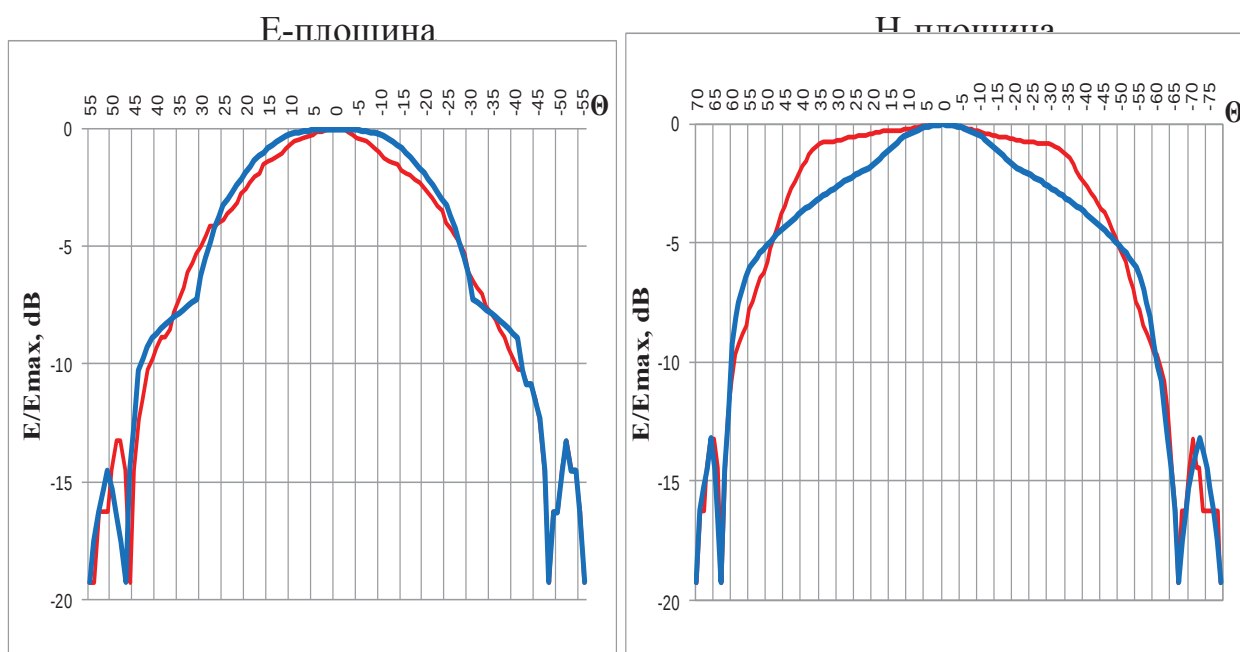


Рис. 4.5 Діаграми спрямованості петльового вібратора з екраном без узгоджувальних елементів (— розрахунок; — експеримент)

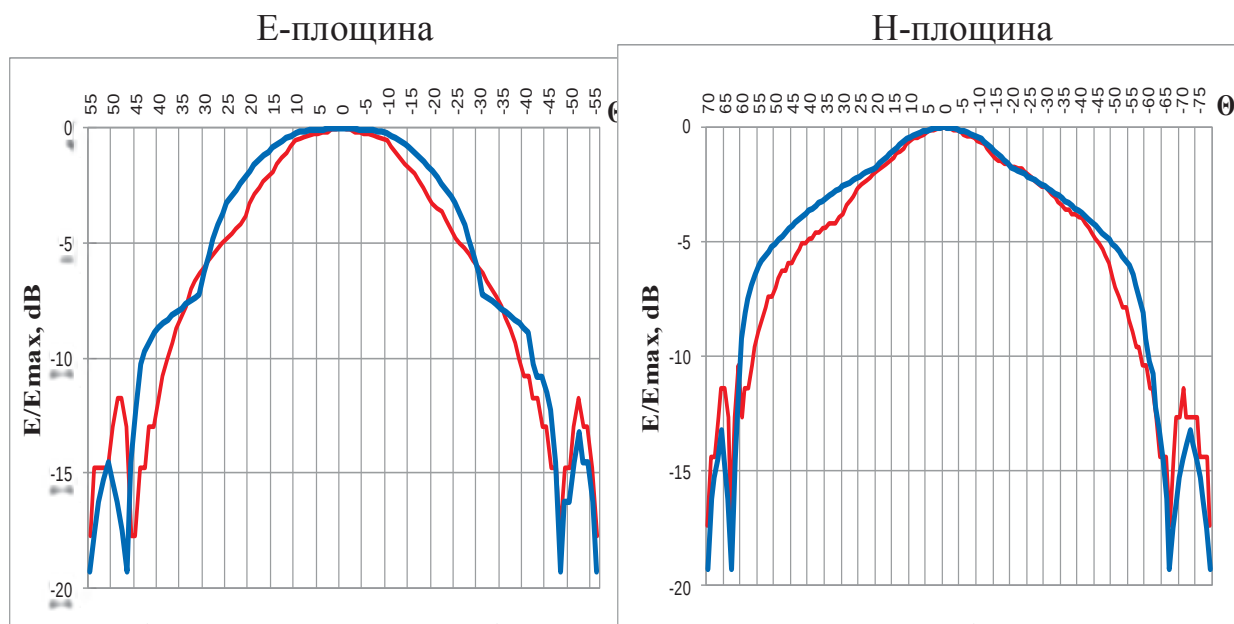


Рис. 4.6 Діаграми спрямованості налаштованого петльового вібратора з екраном зі стрижневим узгоджувальним елементом (— розрахунок; — експеримент)

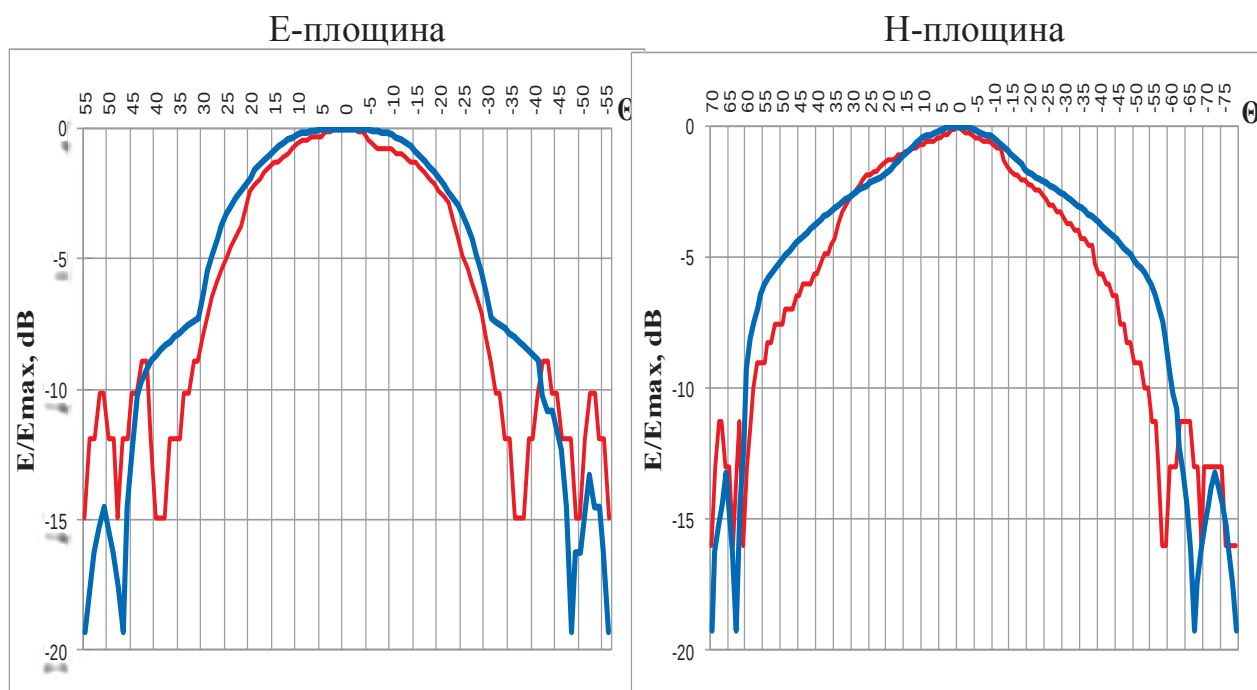


Рис. 4.7 Діаграми спрямованості налаштованого петльового вібратора з екраном зі штирьовим і дисковим узгоджувальним елементом одночасно (— розрахунок; — експеримент)

З усіх отриманих результатів досліджень можна зробити висновок, що узгоджувальні елементи слабо впливають на діаграму спрямованості – максимум на 1–2 дБ в головній пелюстці, та не більше 2–2,5 дБ в бічних

пелюстках. Відзначимо, що розрахунок і експеримент найбільш близькі для варіанту антени без настроювальних елементів. В усіх отриманих результатах розрахунків і вимірювань діаграм спрямованості розрахункова головна пелюстка ширша ніж виміряна, а рівні бічних пелюсток – нижчі. Експериментальні результати до відносних рівнів поля $-10 - -15$ дБ відрізняються мало. Теоретичні результати відрізняються дещо більше. Аналіз розрахунків і вимірювань діаграм спрямованості інших типів антен призвів до того ж висновку: впливом узгоджувальних елементів, що розміщуються в області між вібратором і екраном, на діаграми спрямованості симетричних вібраторних антен, розташованих паралельно екрану, на практиці можна знехтувати.

4.3 Підвищення характеристик спрямованості слабкоспрямованих антен транспондера

Як було зазначено вище, для розв'язання проблеми створення високоефективного «точкового» відбивача для наземних полігонів забезпечення зовнішнього післястартового калібрування та валідації РСА космічного базування пропонується використовувати активні радіолокаційні відповідачі – ретранслятори (транспондери) зі слабкоспрямованими приймальною та передавальною антенами та мікрохвильовими підсилювачами з високим коефіцієнтом підсилення.

Запропоновані транспондери перспективні для вимірювання радіометричних характеристик РСА космічного базування – чутливості та передатної функції в процесі експлуатації шляхом зміни коефіцієнта підсилення використовуваних мікрохвильових підсилювачів. Використання достатньої кількості транспондерів, розташованих належним чином на полігоні, дозволить виміряти роздільну здатність РСА з більш високою точністю в порівнянні з варіантом використання самофазованих тригранних кутникових відбивачів. Очевидно, що калібрувальний наземний полігон, обладнаний

транспондерами, дозволить більш точно визначити координати цілей на РЛЗ за рахунок більш точної «прив'язки» координат «точкового» відбивача-транспондера на наземному полігоні.

Пряме підтвердження в наземно-космічному експерименті працездатності транспондера зі слабкоспрямованими приймальною та передавальною антенами та підсилювачами з низьким рівнем власних шумів (low noise amplifier) і великим коефіцієнтом підсилення, призводить до необхідності більш детально дослідити антени транспондерів. В експерименті доведено, що часові затримки та спотворення форми та спектра сигналу в процесі його поширення на неоднорідній трасі «КА – поверхня Землі», прийому антеною, підсилення та подальшого випромінення не перешкоджає працездатності транспондера, незважаючи на високу швидкість руху носія (КА) та вузьку діаграму спрямованості антени радіолокатора (РСА).

Розглянемо характеристики спрямованості вібраторних антен, розташованих паралельно плоскому ідеально провідному екрану кінцевих розмірів, у всьому просторі спостереження. Саме такі антени використані в експериментальному макеті транспондера, проте їх характеристики спрямованості вивчені детально лише в головних Е- й Н-площинах.

Як добре відомо, при певному інтервалі висот вібратора над екраном близько однієї чверті довжини хвилі подібна антена випромінює переважно в область переднього півпростору, діаграма спрямованості має одну головну пелюстку, максимум якої спрямований по нормалі до екрану. Розв'язання зовнішньої задачі електродинаміки про випромінення такої антени добре відоме [103]. Для визначення діаграми спрямованості у всьому просторі спостереження використовуємо декартову систему координат з початком в середині екрану, вісь OZ направимо по нормалі до екрану в бік вібратора, а вібратор розташуємо в площині $Z = h$ (h – висота вібратора над екраном) паралельно осі OX . Точки спостереження в дальній зоні антени будемо описувати в сферичній системі координат, в якій кут θ відраховуємо від вісі OZ , тобто від нормалі до екрана, а кут φ відраховуємо від осі вібратора в площині

XOY . Тоді діаграма спрямованості по полю короткої вібраторної антени, яка описується математичною моделлю диполя Герца, у всьому просторі спостереження дорівнює

$$F(\theta, \varphi) = \sqrt{\cos^2 \theta \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi} \sin(kh \cos \theta). \quad (4.10)$$

Аналогічно діаграма спрямованості резонансного півхвильового вібратора дорівнює

$$F(\theta, \varphi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta \cos \varphi\right)}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi}} \sin(kh \cos \theta). \quad (4.11)$$

Діаграма спрямованості вібраторної антени довільної довжини, розташованої над екраном

$$F(\theta, \varphi) = \frac{\cos(kl \sin \theta \cos \varphi) - \cos kl}{(1 - \cos kl) \sqrt{1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi}} \sin(kh \cos \theta), \quad (4.12)$$

тут l – довжина плеча вібратора, $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число.

Легко бачити, що при $\varphi = 0$ отримані формули перетворюються в добре відомі формули для діаграми спрямованості диполя Герца, півхвильового вібратора та вібраторної антени довільної довжини, які розташовані паралельно плоскому нескінченному ідеально провідному екрану, в площині електричного вектора поля [111]. При $\varphi = 90^\circ$ отримуємо відомі формули для діаграм спрямованості в площині магнітного вектора поля.

Коефіцієнт спрямованої дії D_m вібраторних випромінювачів з екранами визначається інтегралом за переднім півпростором $z > 0$ від діаграм спрямованості (4.10) – (4.12) за потужністю:

$$D_m = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} |F(\theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi}. \quad (4.13)$$

У досліджуваному нами випадку вібраторних антен для транспондерів КСД необхідно знати не в загальному випадку (4.13), а для напрямку нормалі до екрану

$$D_m^n = \frac{4\pi \sin^2 kh}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} |F(\theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi} \quad (4.14)$$

З розрахунків за наведеними формулами (4.13) і (4.14) з урахуванням (4.10) – (4.12) виявилось, що при зміні висоти антени від 0,1 до 0,4 довжини хвилі діаграма спрямованості має одну головну пелюстку.

Розрахунки показали також, що ширина головної пелюстки за половиною потужності діаграми спрямованості напівхвильового вібратора, розташованого паралельно до плоского екрану на висоті чверті довжини хвилі в площині вектора напруженості електричного поля дорівнює $2\Delta\theta_{0,5P}^E = 66^\circ$, в площині вектора магнітного поля – $2\Delta\theta_{0,5P}^H = 120^\circ$. Коефіцієнт спрямованої дії такої антени дорівнює $D_m = 7,5$ дБ.

Розглянемо далі можливість збільшення КСД і зменшення ширини головної пелюстки діаграми спрямованості вібраторних антен з плоскими екранами. Очевидно, що найпростіший варіант практичного виконання цього завдання полягає в збільшенні висоти антени. Розрахунки показали, що при $h = 0,75 \lambda$ КСД півхвильового вібратора з екраном збільшується до 8 дБ, тобто досить незначно. Діаграма спрямованості такої антени має бічні пелюстки і в площині електричного, і в площині магнітного вектора поля, причому рівень бічних пелюсток в площині H такий же, як і рівень головної пелюстки. При подальшому збільшенні висоти антени максимум КСД практично не збільшується, оскільки зменшення ширини головної пелюстки діаграми спрямованості супроводжується збільшенням кількості бічних пелюсток.

Іншим способом збільшення КСД вібраторної антени з плоским екраном є збільшення довжини вібратора в частках довжини хвилі. Добре відомо [112], що симетричні вібраторні антени у вільному просторі мають діаграму

спрямованості без бічних пелюсток при їх довжині від дуже малої до однієї довжини хвилі. Отже, при розташуванні вібратора над екраном на висоті $h = 0,25 \lambda$ при збільшенні довжини вібратора аж до однієї довжини хвилі ширина головної пелюстки діаграми спрямованості буде зменшуватися і КСД антени буде збільшуватися. Розрахунки за наведеними вище формулами для всього простору спостереження підтвердили ці припущення. Зокрема, симетричний вібратор у вільному просторі має КСД $D_m^n = 3,8$ дБ при його довжині $2l = \lambda$. Максимально досягне значення КСД дорівнює 5,2 дБ при довжині вібратора $2l = 1,27 \lambda$. При подальшому збільшенні довжини вібратора КСД антени тільки зменшується.

Розрахунки показали, що при розташуванні симетричного вібратора довжиною 1,27 довжини хвилі на висоті $0,25 \lambda$ максимальна величина КСД антени збільшується до 10,6 дБ, ширина головної пелюстки за половиною потужності в площині електричного вектора поля зменшується до $2\Delta\theta_{0,5P}^E = 28^\circ$, в площині магнітного вектора поля – до $2\Delta\theta_{0,5P}^H = 110^\circ$. Відзначимо, що розміри резонансної вібраторної антени можна зменшити, якщо вібратор зробити імпедансним [113].

Розглянемо далі поляризаційні ефекти в наземно-космічних експериментах з використанням транспондерів зі слабкоспрямованими антенами. Поляризація випромінення РСА має бути повідомлена виконавцю заздалегідь разом з часом експерименту, траєкторією руху КА й іншими супутніми даними. Певні труднощі виникають у випадку, коли поляризація випромінення РСА лінійна. Дійсно, оскільки траса «КА – Земля» дуже протяжна та неоднорідна, орієнтація площини поляризації випромінення РСА в процесі його руху може змінюватися у великих межах. Підкреслимо, що в даному випадку більш важливі просторові, а не часові неоднорідності іоносфери та тропосфери Землі, тому що швидкість руху КА велика, антена РСА гостроспрямована а зйомка, як правило, триває менше секунди.

Ці труднощі можна виключити за рахунок використання в транспондері приймальної та передавальної антен з круговою поляризацією. Дійсно, поляризаційні втрати в системі «РСА – транспондер» в цьому випадку не залежать від кута орієнтації площини поляризації випромінення РСА та в сумі не перевищують 6 дБ, що може бути компенсовано збільшенням коефіцієнта підсилення використаних мікрохвильових підсилювачів. Поперечні розміри кругополяризованої антени транспондера можуть бути навіть меншими, ніж у випадку слабкоспрямованих вібраторних лінійно-поляризованих антен з плоскими екранами. При цьому найбільш зручні варіанти кругополяризованих слабкоспрямованих антен короткохвильової частини сантиметрового діапазону – хвилеводні та рупорні, а також в довгохвильовій частині сантиметрового і в дециметровому діапазонах – плоскі або конічні спіральні антени можуть бути реалізовані більш широкосмуговими в порівнянні з вібраторними.

Зауважимо, що якщо РСА працює на круговій поляризації випромінення, то виключити спотворення або втрати сигналу за рахунок неузгодженості поляризації випромінення РСА та транспондера можна шляхом застосування в транспондері антен з лінійною поляризацією. У цьому випадку відкриваються додаткові можливості виключення самозбудження транспондера зі слабкоспрямованими вібраторними антенами за рахунок ортогональності площини поляризації приймальної та передавальної антен.

Фрагмент РЛЗ, який містить відгук транспондера, представлений на рис. 4.8. З рисунка видно, що розмір і яскравість цього відгуку еквівалентні РЛЗ тригранного кутникового відбивача з ЕПР 20 дБ. Таким чином, запропонована концепція створення універсального калібрувального ретранслятора на базі приймача прямого підсилення та слабкоспрямованих антен експериментально підтверджена.

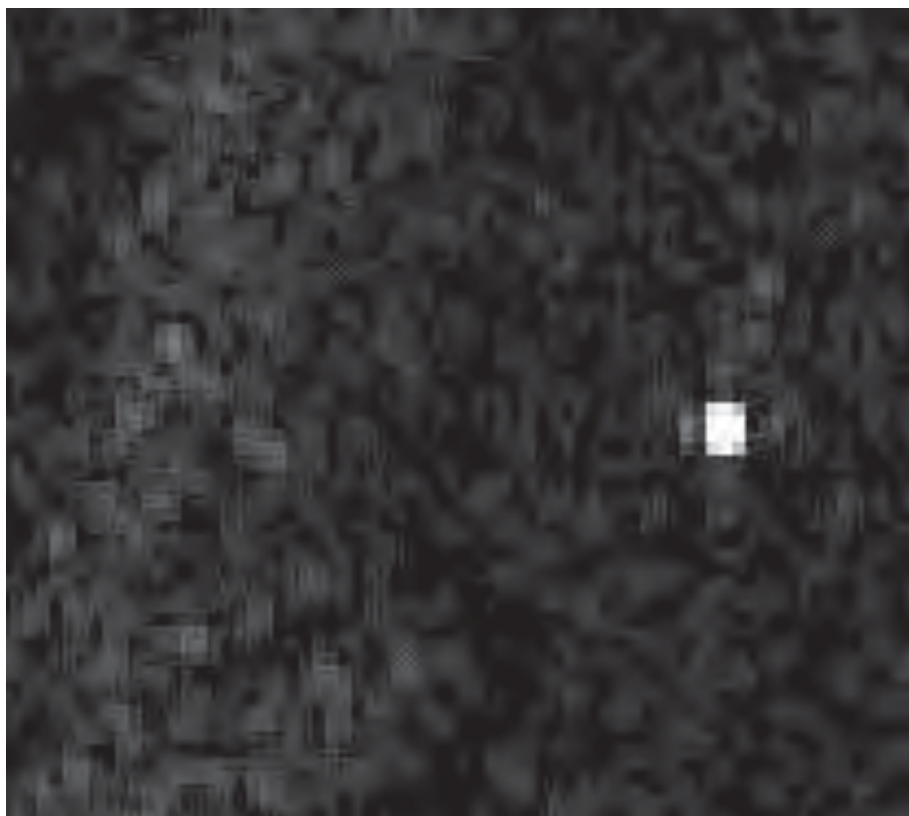


Рис. 4.8 Фрагмент РЛЗ, отриманого в ході експерименту, містить відгук транспондера на базі слабкоспрямованих антен типу вібратор над екраном і трьох підсилювачів типу ТРУ 002-01

4.4 Висновки до розділу 4

1. Показано, що створення універсального ретранслятора з широкою діаграмою спрямованості без затримки ретрансльованого сигналу принципово можливе та доцільне з практичної та економічної точки зору. Досліджено залежність глибини зворотного зв'язку між приймальною та передавальною антенами типу диполь над екраном у ретранслюючій системі на базі приймачів прямого підсилення з паралельною поляризацією приймальної та передавальної антен. Такий підхід дозволяє забезпечити простежуваність яскравості пікселя на знімку до метрологічних одиниць ЕПР (м^2 або дБ) в верхній частині динамічного діапазону РСА.

2. Запропоновано та теоретично й експериментально випробувано спосіб узгодження симетричних вібраторних антен, розташованих паралельно плоскому ідеально провідному екрану, з коаксіальним фідерним трактом, за рахунок стрижневих і / або дискових узгоджувальних елементів, розміщених в ближній зоні вібратора в ділянці між вібратором і екраном. Показано, що стрижневі погоджувальні елементи сильніше впливають на узгодження антени при їх розміщенні поблизу вібратора, а дискові – поблизу екрана. Запропонований спосіб дозволяє перебудовувати частоту, на якій має місце мінімум КСХН, і збільшувати смугу робочих частот вібраторних антен з екранами.

3. Запропонований спосіб узгодження вібраторної антени з фідерним трактом може бути використаний у випадку коаксіального фідерного тракту з іншим хвильовим опором, а також у випадку смужкової лінії передачі. Узгодження вібраторної антени з фідерним трактом різними неоднорідностями в області між вібратором і екраном дозволяє коригувати характеристики таких антен при різних дефектах їх виготовлення.

4. Теоретично й експериментально показано, що вплив узгоджувальних елементів між вібратором і екраном на діаграми спрямованості вібраторних антен з плоскими екранами дуже малий. Широка діаграма спрямованості також дозволяє домогтися зменшення невизначеності вимірювань, що зумовлена похибками кутового положення антени ретранслятора.

Результати досліджень, відображених у розділі 4, доповідалися на конференціях [113–119] і опубліковані в статтях [120–122].

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язана актуальна наукова задача з розвитку методів зовнішнього післястартового калібрування радіолокаторів космічного базування з синтезованою апертурою антени. При цьому отримані такі наукові та практичні результати.

1. Запропоновано новий спосіб визначення роздільної здатності космічного радіолокаційного зображення, який дозволяє отримувати результат у реальному масштабі часу, а також проведено порівняння з найбільш поширеним з існуючих способів. Перевага запропонованого способу полягає в свободі вибору розміру еталонного відбивача та в забезпеченні більш високої точності визначення роздільної здатності РСА. Він забезпечує в середньому на 15 % меншу невизначеність типу А ніж найбільш поширений з відомих методів. Єдине обмеження для найбільш детальних режимів роботи РСА полягає в необхідності отримати параметри автофокусування.

2. Запропоновано практичний спосіб оцінки радіометричних властивостей радіолокаційних зображень, що дозволяє порівнювати між собою різні режими різних сенсорів і визначати їх придатність для виконання конкретних тематичних завдань. Даний метод дозволяє забезпечити простежуваність яскравості пікселя на знімку до метрологічних одиниць ЕПР (м^2 або дБ) із заданою невизначеністю в нижній і середній частині динамічного діапазону. В рамках його реалізації досліджено ряд способів апроксимації відгуку для підвищення точності визначення його яскравості. В результаті обробки п'яти РЛЗ, отриманих сенсором TerraSar-X з метаданими, що додаються, показано, що найбільш ефективні три способи:

- з апроксимацією відгуку функцією Гауса за центральними рядком і стовпцем. Цей спосіб доцільно використовувати для випадків високих фонових шумів;
- з безпосереднім взяттям яскравості центрального пікселя відгуку (базовий варіант). Цей спосіб доцільно використовувати у випадках, коли відносний рівень фону невідомий, або сильно відрізняється від знімка до знімка;

- з апроксимацією двовимірного відгуку двовимірною функцією Гауса. Цей спосіб доцільно використовувати для даних з низьким рівнем фонових шумів.

3. Запропоновано використання для зовнішнього післястартового калібрування РСА антропогенних споруд, зокрема господарського призначення. Проведено низку експериментальних досліджень коефіцієнта відбиття від масштабних моделей споруд, які задовольняють принципу електродинамічної подібності. Їх результати дозволяють використовувати для зовнішнього експлуатаційного калібрування РСА космічного базування металеві споруди, зокрема, водонапірні вежі та металеві цистерни. Також досліджені діаграми зворотного розсіяння доволі поширеного покрівельного матеріалу (шиферу). Показано, що господарчі металеві об'єкти придатні для використання їх у якості реперів для корекції знімків. Крім того, деякі типи покрівельних матеріалів, зокрема, хвилясті шиферні пластини, придатні для калібрування радіометричних характеристик РСА космічного базування.

4. Розроблено новітній алгоритм виділення на космічному знімку усіх можливих антропогенних об'єктів придатних для зовнішнього експлуатаційного калібрування сенсорів космічного базування. Алгоритм має такі основні переваги:

- найбільш загально сформульовані критерії вибору контуру – тільки наявність прямих ліній і прямих кутів між ними;
- стійкість до шумів і спотворень форми контуру;
- можливість пошуку дуже малих об'єктів (близько десяти пікселів), якщо дозволяють обчислювальні ресурси та часові обмеження.

5. Для практичного виконання суперечливого завдання створення високоефективного відбивача малих фізичних розмірів, тобто завдання створення "точкового" відбивача з великою потужністю відбитого сигналу, запропоновано використовувати активні радіолокаційні відповідачі (транспондери) зі слабкоспрямованими приймальною й передавальною

антенами та приймачем прямого підсилення з низьким рівнем шумів і високим коефіцієнтом підсилення. Експериментально створено транспондер S-діапазону зі слабкоспрямованими антенами лінійної поляризації у вигляді резонансних вібраторів, розташованих паралельно плоскому металевому екрану. У транспондері використані три каскади підсилення, виконані на промислових підсилювачах мікрохвильового діапазону типу ТРУ 002-01. Такий підхід дозволяє забезпечити простежуваність яскравості пікселя на знімку до метрологічних одиниць ЕПР (м^2 або дБ) в верхній частині динамічного діапазону РСА. Прямий наземно-космічний експеримент підтвердив працездатність запропонованого приладу. При космічній зйомці наземного полігону «Скрипалі» відгук транспондера виявився еквівалентним відгуку тригранного самофазованого кутникового відбивача з ЕПР, що дорівнює 20 дБ. Таку ЕПР має кутниковий відбивач з трикутними гранями з шириною апертури 97 см в S-діапазоні ($\lambda = 9,6$ см).

6. Досліджено антени класу диполь над екраном у якості приймальної та передавальної антени для широкоспрямованого ретранслятора прямого підсилення. Проведено теоретичне й експериментальне дослідження можливостей покращення узгодження антени з коаксіальним фідерним трактом і розширення робочої смуги частот шляхом введення в ближній зоні антени між екраном і диполем неоднорідності у вигляді металевго стрижня або металевго диска. Показано, що стрижень найбільш ефективний при розміщенні його поблизу диполя та дозволяє домогтися суттєвого розширення робочої смуги у бік високих частот. Також показано, що дисковий погоджувальний елемент найбільш ефективний при розміщенні поблизу екрана та дозволяє розширяти робочу смугу у бік нижчих частот. Використання обох погоджувальних елементів дозволяє розширити робочу смугу до 17 % від центральної робочої частоти за рівнем КСХН ≤ 1.5 . Теоретично й експериментально показано, що такі погоджувальні елементи на діаграму спрямованості впливають не суттєво. Широка діаграма спрямованості також дозволяє домогтися зменшення невизначеності вимірювань, що зумовлена похибками кутового положення антени ретранслятора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Group on Earth Observation (GEO) portal.
URL : https://www.earthobservations.org/geo_community.php (date of application: 26.02.2019).
2. Commetee on Earth Observation Satellites (CEOS) Calibration and Validation society portal. URL : <http://calvalportal.ceos.org/> (date of application: 26.02.2019).
3. CEOS Calibration and Validation portal. Actual list of Papers, Good practices, etc. URL : <http://calvalportal.ceos.org/literature1> (date of application: 14.09.2018).
4. GEO. Committee on Earth Observation Satellites. A Quality Assurance Framework for Earth Observation – Implementation Strategy and Work Plan. URL : http://qa4eo.org/docs/QA4EO_implementation_strategy_for_CEOS_and_GEO_v0.4.pdf (date of application: 07.04.2019).
5. Metrology for Earth Observation and Climate (portal). URL : <http://www.meteoc.org/objectives/> (date of application: 07.04.2019).
6. Quality Measurements Definition for ASAR Level 1 Products. URL: http://calvalportal.ceos.org/c/document_library/get_file?uuid=3ad0201d-f9b4-4e9e-a5e3-9723d512254b&groupId=10136 (дата звернення: 10.06.2018).
7. Satake M., Umehara T., Kobayashi T. et al. Calibration of an X-band Airborne Synthetic Aperture Radar with Active Radar Calibrators and Corner Reflectors // Proceedings of the CEOS SAR Workshop, 2000. URL : https://www.researchgate.net/publication/234329561_Calibration_of_an_XBand_Airborne_Synthetic_Aperture_Radar_with_Active_Radar_Calibrators_and_Corner_Reflectors (date of application: 10.06.2018).
8. Вербa В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования: монография. Москва : Радиотехника, 2010. 680 с.

9. Финкельштейн М. И. Основы радиолокации : учебник для вузов. 2-е изд. Москва : Радио и связь, 1983. 536 с.
10. Кобак В. О. Радиолокационные отражатели : монография. Москва : Сов. радио, 1975. 248 с.
11. Döring B. J. Traceable Radiometric Calibration of Synthetic Aperture Radars : Thesis for PhD. 2016. URL : https://www.researchgate.net/publication/303021941_Traceable_Radiometric_Calibration_of_Synthetic_Aperture_Radars (date of application: 10.06.2018).
12. Энциклопедия современной техники / под ред. А. И. Берга, В. А. Трапезникова. Москва : Сов. энцикл., 1964. 487 с.
13. Энциклопедия физики и техники: Разрешающая способность. URL : http://femto.com.ua/articles/part_2/3288.html (дата обращения: 14.09.2018).
14. Li C. R., Tang L. L., Ma L. L., Zhou Y. S. A comprehensive calibration and validation site for information remote sensing // 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment. URL : <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-7-W3/1233/2015/isprsarchives-XL-7-W3-1233-2015.pdf> (date of application: 10.06.2018).
15. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Горобец А. Н., Мирошниченко А. Ю., Мындарь И. Г., Онищенко А. А., Пивовар Е. А. Наземное обеспечение CAL/VAL PCA TERRASAR-X и KOMPSAT-5 // 15th Ukrainian Conference on Space Research, 24–28 aug. 2015. : abstr. Odessa, 2015. P. 183.
16. Schättler B., Fritz T., Breit H., Adam N., Balss U., Lachaise M., Eineder M., Niedermeier A. Terrasar-X SAR data processing results from commissioning and early operational phase // New Challenges of High Resolution, Bochum. 2008. URL : https://www.researchgate.net/publication/225006172_TerraSAR-X_SAR_Data_Processing_Results_from_Commissioning_and_Early_Operational_Phase (date of application: 14.09.2018).

17. TerraSar-X Ground Segment Basic Product Specification Document. 2009.
URL : https://tandemx-science.dlr.de/pdfs/TX-GS-DD-3302_Basic-Products-Specification-Document_V1.6.pdf (date of application: 14.09.2018).
18. Атрошенко Л. М., Горобец А. Н., Горобец Н. Н., Данилова Т. Д., Елизаветин И. В., Жиличкин А. Г., Малюков В. М., Скрыльников Р. А., Тарасова П. Д. Результаты верификации данных, получаемых КА «TerraSar-X», с использованием наземных тест-объектов // Исследование Земли из космоса. 2017. № 4. С. 68–78.
19. Болсуновский М. А. Геометрическая коррекция данных со спутника Quickbird // Геопрофи. 2006. № 1. С. 16–19.
20. Kosaman S., Gruen A. Orientation and calibration of ALOS/PRISM imagery // ISPRS Workshop “High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information”, 29 May – 1 June, 2007. Hannover, Germany, (proceedings on CD-ROM).
21. Meadows P. J., Rosich B., Pilgrim A., Tranfaglia M. ERS-2 SAR Performance and product evolution // Proceedings of the Envisat Symposium 2007. URL : <https://www.researchgate.net/publication/289000946/download> (date of application: 14.09.2018).
22. Williams D., Wang Y., Fitzgerald G., Chabot M., Dantec P. le, Fiset R., Wu Y., Caves R., James K., Thompson A., Vigneron C. Radarsat-2 Image Quality and Calibration Update // CEOS SAR Calibration and Validation Workshop 2016. P. 15. URL : http://sarv.ceos.org/site_media/static/symposion/data/ceos-2016.pdf (date of application: 14.09.2018).
23. Захаров А. И., Жердев П. А., Соколов А. Б., Дарижапов Д. Д. Результаты первого года калибровки японского РСА PALSAR // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : Пятая юбилейная открытая Всероссийская конференция : тезисы докладов / ИКИ РАН. Москва, 2007. URL : <http://d902.iki.rssi.ru/theses-cgi/thesis.pl?id=991> (дата обращения: 14.09.2018).
24. Смирнов А. С., Сидоренко А. В. Використання контрольно-калібрувального полігона для покращення якості розв’язання тематичних

задач ДЗЗ Ж // Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки GEO-UA 2008 : Матеріали доповідей Першої Всеукраїнської конференції, м. Київ, 3–5 черв. 2008 р. Київ, 2008. С. 96–97.

25. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костяшкин С. И., Сафронова Л. П. Подспутниковые полигоны Украины // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. Москва 2008. Вып. 6, Т. 2. С. 265–271.
26. Сухаревский О. И., Василец В. А., Кукобко С. В., Нечитайло С. В., Сазонов А. З. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами : монография. Харьков : Харьков. ун-т Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, 2009. 466 с.
27. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Горобец А. Н., Сафронова Л. П. Эффективная площадь рассеяния наземных сооружений, используемых в качестве радиолокационных реперов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. 2009. Вып. 6, Т. 2. С. 506–512.
28. Дейвис Ш. М., Ландгребе Д. А., Филлипс Т. Л., Свейн Ф. Х., Хоффер Р. М., Ланденлауб Д. С., Сиева Р. Ф. Ле. Дистанционное зондирование: количественный подход / под ред. Ф. Свейна и Ш. Дейвис ; пер. с англ. В. П. Пяткина, О. А. Юдиной. Москва : Недра, 1983. С. 415.
29. Canny J. A Computational Approach to Edge Detection // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1986. Vol. Pami-8, № 6, November. P. 679–698.
30. Bezvesilniy O. O., Dukhopelnykova I. V., Vynogradov V. V., Vavriv D. M. Retrieving 3-D topography by using a single-antenna squint-mode airborne SAR // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007. Vol. 45, № 11, October. P. 3574–3582.
31. Буданов П. Ф., Васильев О. С., Доля Г. Н., Иванов В. К., Кальной С. Е., Кучук Г. А. Фрактальный анализ процессов, структур и

сигналов : монография / под ред. Р. Э. Пащенко.
Харьков : ЭкоПерспектива, 2006. 347 с.

32. Woo-Min D., Nguyen Q., Tran Q., Park D., Jung-Kee Y. Building detection and reconstruction from aerial images // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2008. Vol. 37. Part B3b. P. 713–718. URL : <https://pdfs.semanticscholar.org/a44d/d2d0b2be1abef13747129b60dccd29fcebdb.pdf> (date of application: 03.08.2019).
33. Konstantinidis D., Stathaki T., Argyriou V., Grammalidis N. A probabilistic feature fusion for building detection in satellite images // Proceedings of the 10th International Conference on Computer Vision Theory and Applications. Berlin, Germany, 2015. Vol. 2. P. 205–212.
34. Sirmacek B., Unsalan C. Urban-area and building detection using SIFT keypoints and graph theory // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2009. Vol. 47, № 4, April. P. 1156–1167.
35. Singh D., Maurya R., Shukla A., Sharma M., Gupta P. Building extraction from very high resolution multispectral images using NDVI based segmentation and morphological operators // IEEE International Students Conference on Engineering and Systems (SCES). 2012. March. P. 1–5.
36. Hermosilla T., Ruiz L., Recio J., Estornell J. Evaluation of automatic building detection approaches combining high resolution images and LiDAR data // Remote Sensing. 2011. Vol. 3, № 6, P. 1188–1210.
37. Theng L. Automatic building extraction from satellite imagery // Engineering Letters. 2006. Vol. 13, № 3, November. URL : https://www.researchgate.net/publication/26623725_AUTOMATIC_BUILDING_EXTRACTION_FROM_SATELLITE_IMAGERY (date of application: 14.09.2018).
38. Haverkamp D. Automatic building extraction from IKONOS imagery // Proceedings of ASPRS, 2004. URL : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.86.4511&rep=rep1&type=pdf> (date of application: 12.05.2019).

39. Konstantinidis D., Stathaki T., Argyriou V., Grammalidis N. Building Detection Using Enhanced HOG–LBP Features and Region Refinement Processes // IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing. 2017. Vol. 10, № 3, March. P. 1–41.
40. Hough P. Method and means for recognizing complex patterns : Patent 3,069,654, United States ; application filed by P. V. C. Hough 25.03.1962 ; publication of US3069654A 18.12.1962. URL : <https://patents.google.com/patent/US3069654A/en> (date of application: 08.09.2019).
41. Kahn P., Kitchen L., Riseman E. Fast Line Finder for Vision-Guided Robot Navigation // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1990. Vol. 12, №. 11, November. P. 1098–1102.
42. Bezvesilniy O. O., Gorovyi I. M., Vavriv D. M. Estimation of phase errors in SAR data by local-quadratic map-drift autofocus // Proceedings of the 19th International Radar Symposium, Warsaw, Poland, 23–25 May, 2012. P. 376–381.
43. Meadows P. J., Laur H., Rosich B., Schättler B. The ERS-1 SAR performance: a final update // CEOS WGCV SAR Workshop 2001. Tokyo, Japan, 2–5 April. URL : <https://www.researchgate.net/publication/224795117/download> (date of application: 14.09.2018).
44. Неронский Л. Б. Перспективы развития методов и систем радиолокационного наблюдения космического базирования // Журнал радиоэлектроники : электронный журнал. 2011. № 11. URL : <http://jre.cplire.ru/win/nov11/14/text.pdf> (дата обращения: 30.11.2018).
45. Wang W. Q. Errors analysis of transponder-based radiometric calibration for high-resolution imaging radars // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2008. Vol. 2, № 5, July. P. 451–458.
46. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Красногорский М. Г., Малюков В. М. Опыт создания полигонно-калибровочного комплекса для радиолокатора с синтезированной апертурой космического базирования // Вестник

Сибирского государственного аэрокосмического университета.
Красноярск, 2013, № 5 (51). С. 30–32.

47. Engen G., Johnsen H. A New Method for Calibration of SAR images // Proceedings of the CEOS SAR Workshop, 1999, Toulouse, France, 26–29 oct. 1999. P. 109–112. URL : <https://earth.esa.int/documents/10174/1593542/Cal11.pdf> (date of application: 14.09.2019).
48. Jackson H., Sinclair I., Tam S. Envisat/ASAR Precision Transponders // Proceedings of the CEOS SAR Workshop, 1999, Toulouse, France. 26–29 oct. 1999. P. 311–316. URL : <https://earth.esa.int/documents/10174/1593542/Cal11.pdf> (date of application: 14.09.2019)
49. Döring B. J., Reimann J., Raab S., Jirousek M. The Three-Transponder Method: A Novel Method for Accurate Transponder RCS Calibration // Progress In Electromagnetics Research B. 2015. Vol. 61. P. 297–315.
50. Döring B. J., Reimann J., Raab S., Jirousek M. Rudolf D., Schwerdt M. The Three-Transponder Method: A Novel Approach for Traceable (E)RCS Calibration of SAR Transponders // European Conference on Synthetic Aperture Radar. 2016. June. URL : https://elib.dlr.de/99204/1/2016_EUSAR_Doering_3TM_r4_nolinks.pdf (date of application: 03.01.2019).
51. Mahapatra P. S., Samiei-Esfahany S., van der Marel H., Hanssen R. F. On the Use of Transponders as Coherent Radar Targets for SAR Interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2014. Vol. 52, № 3, March. P. 1869–1878.
52. Merryman Boncori J. P., Schiavon G. Signal Processing Issues for the Exploitation of Pulse-to-Pulse Encoding SAR Transponders // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. 2008. Vol. 46, №. 4, April. P. 1048–1057.
53. European Space Agency website – Inflight Performance Verification. URL : <http://envisat.esa.int/handbooks/asar/CNTR3-2-2.html> (date of application: 04.01.2019).

54. TerraSar-X mission official website – sensor complement (properties)
URL : <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/t/terrasar-x> (date of application: 04.01.2019).
55. ДСТУ-Н РМГ 43-2006. Метрологія. Застосування Настанови з оцінювання невизначеності у вимірюваннях. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 20 с.
56. TerraSar-X Ground Segment Basic Product Specification Document, 2013.
URL : <https://sss.terrasar-x.dlr.de/docs/TX-GS-DD-3302.pdf> (date of application: 26.08.2018)
57. Сигмоїда (визначення, основні властивості, різновиди) // Вікіпедія : Вільна енциклопедія. URL : <https://uk.wikipedia.org/wiki/Сигмоїда> (дата звернення: 04.01.2019).
58. Mathworks support – Evaluating Goodness of Fit (SSE, RMSE etc.)
URL : <https://www.mathworks.com/help/curvefit/evaluating-goodness-of-fit.html?w.mathworks.com> (date of application: 04.01.2019).
59. Mathworks support – Coefficient of Determination (R-Squared)
URL : <https://www.mathworks.com/help/stats/coefficient-of-determination-r-squared.html> (date of application: 04.01.2019).
60. Mathworld – online handbook – (Gaussian Function). URL : <http://mathworld.wolfram.com/GaussianFunction.html> (date of application: 04.01.2019).
61. Двайт Г. Б. Показательные функции — интегралы // Таблицы интегралов и другие математические формулы / Г. Б. Двайт ; пер. с англ. Н. В. Леви ; под ред. К. А. Семендяева. Москва, 1978. С. 116–118.
62. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костриков А. Л., Купко В. С., Горобец А. Н., Мель И. А. Метрологические аспекты наземного обеспечения космического землеобзора // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія–2012): матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції, 9–11 жовт. 2012 р., Харків, 2012. С. 455–462.
63. Горобець О. М. Радіометричний аналіз якості радіолокаційного зображення // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія–2016):

Х Міжнародна науково-технічна конференція, 5–7 жовт. 2016 р. : тези доп. Харків, 2016. С. 82.

64. Атрошенко Л. М., Борщева Г. А., Горобец А. Н., Горобец Н. Н., Костриков А. Л., Мель И. А., Ярмольчук Е. Д. Методы наземного обеспечения внешней калибровки сенсоров отечественных КС ДЗЗ // Вимірювальна та Обчислювальна Техніка в Технологічних Процесах (ВОТТП-2017): матеріали 17-ї міжнародної науково-технічної конференції, 8–13 черв. 2017 р., Одеса, 2017. С. 29–30.
65. Ратушная Е. С., Горобец А. Н., Канивец К. П., Ковшов С. Б., Лебедев А. С., Малюков В. М. Размещение пассивных средств калибровки и валидации на подспутниковом полигоне «Скрипалі» // 11th Ukrainian Conference on Space Research, Aug. 29 – Sept. 2 2011. : abstr. Yevpatoria, 2011. P. 88.
66. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костяшкин С. И., Красногорский М. Г., Горобец А. Н., Лебедев А. С., Малюков В. М., Ратушная Е. С. Летно-экспериментальные испытания полигонно-калибровочного комплекса подспутникового полигона Скрипалі // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы X Всероссийской Открытой конференции, 12–16 нояб. 2012 г., Москва, 2012. С. 145.
67. Лебедев А. С., Горобец А. Н. Дополнения к программному обеспечению дешифрирования радиолокационных космических снимков для повышения надежности результатов испытаний РСА // 13th Ukrainian Conference on Space Research, 2–6 sept. 2013. : abstr. Yevpatoria, 2013. P. 200.
68. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Красногорский М. Г., Малюков В. М., Горобец А. Н. Начальный период внешней калибровки характеристик РСА МКА «Кондор - Э» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы XI Всероссийской Открытой конференции, 11–15 нояб. 2013 г., Москва, 2013. С. 163.
69. Горобец А. Н., Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н. Метод получения функции размытия с использованием сосредоточенных целей с известной

эквивалентной апертурой // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы XIII Всероссийской Открытой конференции, 16–20 нояб. 2015 г., Москва, 2015. С. 23.

70. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Горобец А. Н., Красногорский М. Г., Костриков А. Л., Купко В. С., Лебедев А. С., Малюков В. М., Ратушная Е. С. Мобильный контрольно-калибровочный комплекс для РСА космического базирования // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2012. № 1010. Вип. 20. С. 3–9.
71. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Горобец А. Н., Костяшкин С. И., Красногорский М. Г., Малюков В. М., Мель И. А., Ратушная Е. С. Полигонно-калибровочный комплекс для наземного обеспечения радиолокационного космического землеобзора // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2012. № 1010. Вип. 20. С. 10–18.
72. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Горобец А. Н., Красногорский М. Г., Малюков В. М. Внешняя калибровка РСА космического базирования: 2. Метод радиометрической калибровки радиолокаторов высокого разрешения // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2012. № 1038. Вип. 21. С. 7–10.
73. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Купко В. С., Горобец А. Н., Лебедев А. С., Малюков В. М. Критерии оценки результатов летных испытаний РСА космического базирования // Український метрологічний журнал. Харків, 2014. № 2. С. 28–34.
74. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Горобец А. Н., Мель И. А., Мындарь И. Г. Требования к точностным характеристикам установки метрологических средств для внешней калибровки РСА космического базирования // Український метрологічний журнал. Харків, 2014. № 2. С. 45–50.

75. Горобец А. Н. Расширенный метод метрологической оценки разрешающей способности радиолокационного изображения // Український метрологічний журнал. Харків, 2017. № 3. С. 9–16.
76. Стрэттон Дж. А. Теория электромагнетизма / пер. М. С. Рабиновича, В. М. Харитонова ; под ред. С. М. Рытова. Москва ; Ленинград : Гостехиздат. 1948. 540 с.
77. Atroshenko L. M., Gaikovich K. P., Gorobets N. N. Soil absorption profiling and complex dielectric permittivity based on microwave radiometry // 2006 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET' 2006). Kharkov. 26–29 June 2006. P. 366–367.
78. Физические величины : справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. Москва : Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
79. Мищенко Ю. А. Радиолокационные цели. Москва : Воениздат, 1966. 140 с.
80. Carrara W. G., Goodman R. S., Majeovsky R. M. Spotlight synthetic aperture radar signal processing algoritms. Boston, London : Artech House, 1995. 554 p.
81. Ross R. A. Scattering by finite cylinder // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. London, 1967. Vol. 114, № 7. P. 864–868.
82. Лебедев А. С., Горобец Н. Н., Кийко В. И., Купко В. С., Красногорский М. Г., Горобец А. Н., Мындарь И. Г. Распределенные метрологические средства для оценки УЭПР подстилающей поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы X Всероссийской Открытой конференции, 12–16 нояб. 2012 г., Москва, 2012. С. 147.
83. Черный Ф. Б. Распространение радиоволн. Москва : Сов. радио, 1972. 464 с.
84. Казаков Е. Л., Казаков А. Е. Определение величины угла поворота плоскости поляризации // Системи обробки інформації / Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. Харків, 2001. Вип. 1 (11). С. 97–100.

85. Литвиненко Л. Н., Просвирнин С. Л., Погарский С. А., Калиберда М. Е. Дифракция волн на периодических многослойных структурах. Харьков : ХНУ имени В. Н. Каразина. 2017. 268 с.
86. Rusautomation – Диэлектрическая проницаемость различных материалов. URL : <https://rusautomation.ru/dielektricheskaya-pronicaemost> (дата обращения: 04.01.2019).
87. ГОСТ 30340-95. Листы асбестоцементные волнистые. Технические условия. Москва : Изд-во стандартов, 1996. 37 с.
88. Открытый конкурс по распознаванию объектов на аэрофотоснимках. URL : <http://dataring.ru/competitions/fpi-object-detection/> (дата обращения: 04.01.2019).
89. Bradski G., Kaehler A. Learning OpenCV. Beijing ; Cambridge ; Farnham ; Köln ; Sebastopol ; Taipei ; Tokyo : O'Reilly Media, 2008. URL : <https://www.bogotobogo.com/cplusplus/files/OReilly%20Learning%20OpenCV.pdf> (date of application: 25.10.2019).
90. Новейшие методы обработки изображений / под ред. А. А. Потапова. Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2008. 496 с.
91. Ulaby F. T., Kouyate F., Brisco B., William T. Textural information in SAR images // IEEE Transactipn Geoscience and Remote Sensing. 1986. Vol. GE-24, № 2, March. P. 235–245.
92. Самитова В. А. Классификация и кластеризация данных, заданных в нечисловых шкалах: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.23 «Системы и средства искусственного интеллекта». Харьков, 2016. 138 с.
93. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костриков А. Л., Красногорский М. Г., Горобец А. Н., Лебедев А. С., Малюков В. М., Ратушная Е. С. Полигонно-калибровочный комплекс для РСА космического базирования // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 22-й Международной Крымской конференции, 10–14 сент. 2012 г., Севастополь, 2012. С. 1005–1006.

94. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костриков А. Л., Красногорский М. Г., Горобец А. Н., Лебедев А. С., Малюков В. М., Мель И. А. Использование объектов хозяйственного назначения для внешней калибровки РСА космического базирования // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 23-й Международной Крымской конференции, 8–14 сент. 2013 г., Севастополь, 2013. С. 1150–1151.
95. Gorobets A. N. Segmentation for Detecting Buildings in Infrared Space Images // ICATT'17: Proceedings on CD of XI International Conference on Antenna Theory and Techniques, 24–27 May, 2017. Kyiv, 2017. P. 364–366.
96. Лебедев А. С., Горобец Н. Н., Кийко В. И., Атрошенко Л. М., Горобец А. Н., Ковшов С. Б., Красногорский М. Г. Материалы для создания тестовых площадок оценки динамического диапазона РСА космического базирования. 1. Гофрированные материалы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы IX Всероссийской Открытой конференции, 14–18 нояб. 2011 г., Москва, 2011. С. 42.
97. Онищенко А. А., Пивовар Е. А., Горобец А. Н., Лебедев А. С. Современные технологии представления пространственной информации в процессе создания и эксплуатации новой техники наземной инфраструктуры космических исследований // 12th Ukrainian Conference on Space Research, 3–7 sept. 2012. : abstr. Yevpatoria, 2012. P. 123.
98. Лебедев А. С., Ковшов С. Б., Малюков В. М., Горобец А. Н. Материалы для создания тестовых площадок оценки динамического диапазона РСА космического базирования. 2. Материалы на основе набора металлических сфер // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы X Всероссийской Открытой конференции, 12–16 нояб. 2012 г., Москва, 2012. С. 151.
99. Горобец А. Н. Характеристики контрольно-калибровочных полигонов для наземного обеспечения работы космических систем "Січ-2-1" и "Січ-2М" //

- 16th Ukrainian Conference on Space Research, 22–27 aug. 2016. : abstr. Odessa, 2016. P. 193.
100. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Горобец А. Н., Красногорский М. Г., Лебедев А. С., Малюков В. М. Теория и практика полигонного обеспечения космического радиолокационного землеобзора // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2013. № 1094. Вип. 23. С. 36–43.
 101. Горобец А. Н. Обработка монохромного изображения поверхности Земли для обнаружения строений // Радіофізика та електроніка. 2017. Т. 22, № 4. С. 11–18.
 102. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костриков А. Л., Купко В. С., Горобец А. Н., Требования, предъявляемые к контрольно-калибровочным комплексам для наземного обеспечения CalVal PCA космического базирования // Український метрологічний журнал. Харків, 2013. № 3. С. 46–52.
 103. Елисеева Н. П., Горобец Н. Н. Дифракция излучения проволочной антенны на прямлугольных и уголковых экранах : монография. Харьков : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2009. 380 с.
 104. Радиотехнический форум – Отрицательная обратная связь в усилителе. URL : <http://www.electroclub.info/article/oos1.htm>. (дата обращения: 04.01.2019).
 105. Горобец Н. Н. Особенности волновых процессов в ближней зоне датчиков электрического и магнитного поля // Методы и средства измерений в области электромагнитной совместимости : сборник научных трудов. Винница, 1991. С. 95–100.
 106. Катрич В. О., Нестеренко М. В., Горобець М. М., Бердник С. Л., Думін О. М., Почанін Г. П., Дробахін О. О., Пенкін Ю. М. Випромінюючі структури багатофункціональних радіоелектронних систем: монографія / ред. Катрич В. О. LAP LAMBERT Academic Publishing RU. 2017. 400 с.

107. Döring B. J., Schmidt K., Jirousek M., Rudolf D., Reimann J., Raab S. Hierarchical Bayesian Data Analysis in Radiometric SAR System Calibration: A Case Study on Transponder Calibration with RADARSAT-2 Data // Remote Sensing. 2013. Vol. 5. P. 6667–6690.
108. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. Москва : Высшая школа. 1988. 432 с.
109. Лавров А. С., Резников Г. Б. Антенно-фидерные устройства. Москва : Сов. радио. 1974. 367 с.
110. Банков С. Е., Грибанов А. Н., Курушин А. А. Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ структур с использованием FEKO. Москва : Солон–Пресс. 2017. 412 с.
111. Ільницький Л. Я., Савченко О. Я., Сібрук Л. В. Антени та пристрої надвисоких частот: підручник для ВНЗ / за ред. Л. Я. Ільницького. Київ : Укртелеком. 2003. 496 с.
112. Шубарин Ю. В. Антенны сверхвысоких частот. Харьков : Изд-во Харьков. гос. ун-та, 1960. 284 с.
113. Gorobets A. N., Yelisseyeva N. P., Katrich V. A., Nesterenko M. V. Optimization of Circularly Polarized Radiation of Inphase Crossed Impedance Dipoles with Screen // ICATT'17: Proceedings on CD of XI International Conference on Antenna Theory and Techniques, 24–27 may, 2017. Kyiv, 2017. P. 270–272.
114. Gorobets A., Yelisseyeva N., Gorobets M. Power and Polarization Patterns of a Circularly Polarized Four-Dipole Radiator with a Square Screen // MIKON'2014: Proceedings on CD of 20th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communications, 16–18 June, 2014. Gdansk, Poland, 2014. P. 589–591.
115. Yeliseeva N. P., Gorobets N. N., Gorobets A. N., Calculation of near field of dipole placed above rectangular screen // ICATT'2015: Proceedings on CD of X Anniversary International Conference of Antenna Theory and Techniques, 21–24 April, 2015. Kharkov, 2015. P. 102–104.

116. Yelisseyeva N. P., Gorobets A. N., Katrich V. A., Pshenichnaya S. V. Directional and Polarization Characteristics of Crossed Impedance Wire Dipoles with Square Screen // UkrMiCo'2017: Proceedings on CD of International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, 11–15 Sept. 2017. Kyiv, 2017. P. 113–117.
117. Yelisseyeva N. P., Katrich V. A., Nesterenko M. V., Gorobets A. N. Synthesis of Circularly Polarized Radiation by Inphase Crossed Impedance Wire Dipoles with Screen // UKRCON: Proceedings on CD of 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, May 29 – June 2, 2017. Kyiv, 2017. P. 98–101.
118. Gorobets A. N., Gorobets N. N., Mahov E. S. Impedance Matching of Dipole Antennas by Metal Rod and Disk Placing // UWBUSIS'2018: Proceedings on Flash-drive of 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 04–07 Sept. 2018. Odessa, 2018. P. 357–361.
119. Gorobets N. N., Bulgakova A. A., Lyashchenko V. A., Gorobets A. N., Optimizing the Vibrator Antenna, Parallel to a Flat Screen, by the Maximum Directive gain in the Normal Direction // UWBUSIS'2018: Proceedings on Flash-drive of 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 04–07 Sept. 2018. Odessa, P. 372–375.
120. Горобец Н. Н., Горобец А. Н., Махов Е. С. Вибраторные антенны с согласующимися неоднородностями в ближней зоне // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2017. Вип. 27. С. 70–74.
121. Елисеева Н. П., Горобец Н. Н., Горобец А. Н. Характеристики ближнего поля горизонтального вибратора, расположенного над квадратным экраном // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 7. С. 611–628.
122. Yelisseyeva N. P., Gorobets A. N., Katrich V. A., Nesterenko M. V. Radiation Fields of System of Two Impedance Crossed Vibrators Excited In-Phase and Placed over a Rectangular Screen // Progress In Electromagnetics Research B. 2017. Vol. 77, Issue 1. Article number 52503, P. 71–84.

ДОДАТОК А

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Наукові праці у наукових фахових виданнях України:

1. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Красногорский М. Г., Костриков А. Л., Купко В. С., Лебедев А. С., Малюков В. М., Ратушная Е. С. Мобильный контрольно-калибровочный комплекс для РСА космического базирования // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2012. № 1010. Вип. 20. С. 3–9. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у створенні й експериментальних випробуваннях полігону для калібрування РСА, розробив механічні вузли для точної орієнтації відбивачів за параметрами траси космічного апарата.)*

1а. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Костяшкин С. И., Красногорский М. Г., Малюков В. М., Мель И. А., Ратушная Е. С. Полигонно-калибровочный комплекс для наземного обеспечения радиолокационного космического землеобзора // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2012. № 1010. Вип. 20. С. 10–18. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у створенні та в роботі полігону, розробив конструкторську документацію до калібрувального комплексу.)*

2. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Красногорский М. Г., Малюков В. М. Внешняя калибровка РСА космического базирования: 2. Метод радиометрической калибровки радиолокаторов высокого разрешения // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2012. № 1038. Вип. 21. С. 7–10. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у розробці методичної бази для обробки результатів і створив на її основі необхідні програмні скрипти для постановки експерименту.)*

3. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Красногорский М. Г., Лебедев А. С., Малюков В. М. Теория и практика полигонного обеспечения космического радиолокационного землеобзора // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2013. № 1094. Вип. 23. С. 36–43. *(Особистий внесок здобувача: розв'язав задачу із обчислення азимуту сліду траси космічного апарата на поверхні Землі для заданих географічних координат.)*

4. Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Махов Е. С. Вибраторные антенны с согласующимися неоднородностями в ближней зоне // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2017. Вип. 27. С. 70–74. *(Особистий внесок здобувача: розробив креслення експериментальних зразків антен, теоретично й експериментально дослідив узгодження та діаграми спрямованості антен.)*

5. **Горобец А. Н.** Обработка монохромного изображения поверхности Земли для обнаружения строений // Радіофізика та електроніка. 2017. Т. 22, № 4. С. 11–18.

5a. Переклад: **Gorobets A. N.** Building Detection using Processing of Monochromatic Earth Observation Image // Telecommunications and Radio Engineering. 2018. Vol. 77, Issue 3. P. 243–256. (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

Наукові праці у зарубіжних наукових фахових виданнях:

6. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Сафронова Л. П. Эффективная площадь рассеяния наземных сооружений, используемых в качестве радиолокационных реперов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. 2009. Вип. 6, Т. 2. С. 506–512. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у розрахунках і експериментальних дослідженнях.)*

7. Елисеева Н. П., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.** Характеристики ближнего поля горизонтального вибратора, расположенного над квадратным экраном // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 7. С. 611–628. (Видання входить до наукометричної бази Science index.)

7а. Переклад: Yeliseyeva N. P., Gorobets N. N. **Gorobets A. N.** Characteristics of Near Field of the Horizontal Vibrator Located above a Square Screen // Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. Vol. 61, № 7. P. 749–766. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у розрахунках, підготовці графічних матеріалів і аналізі одержаних результатів.)* (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science.)

8. Yeliseyeva N. P., **Gorobets A. N.**, Katrich V. A., Nesterenko M. V. Radiation Fields of System of Two Impedance Crossed Vibrators Excited In-Phase and Placed over a Rectangular Screen // Progress In Electromagnetics Research B. 2017. Vol. 77, Issue 1. Article number 52503, P. 71–84. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у розрахунках і підготовці графічних матеріалів.)* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

9. Атрошенко Л. М., **Горобец А. Н.**, Горобец Н. Н., Данилова Т. Д., Елизаветин И. В., Жиличкин А. Г., Малюков В. М., Скрыльников Р. А., Тарасова П. Д. Результаты верификации данных, получаемых КА «Terrasar-X», с использованием наземных тест-объектов // Исследование Земли из космоса. 2017. № 4. С. 68–78. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у розробці тест-об'єктів і розробив конструкторську документацію до них.)* (Видання входить до наукометричної бази Science index.)

Наукові праці апробаційного характеру (тези доповідей на наукових конференціях) за темою дисертації:

10. Ратушная Е. С., **Горобец А. Н.**, Канивец К. П., Ковшов С. Б., Лебедев А. С., Малюков В. М. Размещение пассивных средств калибровки и валидации на подспутниковом полигоне «Скрипалі» // 11th Ukrainian Conference on Space Research, Aug. 29 – Sept. 2 2011. : abstr. Yevpatoria, 2011. Р. 88. *(Особистий внесок здобувача: розробив схему розміщення калібрувального приладдя.)*

11. Лебедев А. С., Горобец Н. Н., Кийко В. И., Атрошенко Л. М., **Горобец А. Н.**, Ковшов С. Б., Красногорский М. Г. Материалы для создания тестовых площадок оценки динамического диапазона РСА космического базирования. 1. Гофрированные материалы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов): материалы IX Всероссийской Открытой конференции, 14–18 нояб. 2011 г., Москва, 2011. С. 42. *(Особистий внесок здобувача: розробив креслення тестових майданчиків.)*

12. Онищенко А. А., Пивовар Е. А., **Горобец А. Н.**, Лебедев А. С. Современные технологии представления пространственной информации в процессе создания и эксплуатации новой техники наземной инфраструктуры космических исследований // 12th Ukrainian Conference on Space Research, 3–7 sept. 2012. : abstr. Yevpatoria, 2012. Р. 123. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у розрахунках і підготовці графічних матеріалів та їх аналізі.)*

13. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костриков А. Л., Красногорский М. Г., **Горобец А. Н.**, Лебедев А. С., Малюков В. М., Ратушная Е. С. Полигонно-калибровочный комплекс для РСА космического базирования // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 22-й Международной Крымской конференции, 10–14 сент. 2012 г., Севастополь, 2012. С. 1005–1006. *(Особистий внесок здобувача: брав активну*

участь в організації, експериментальних дослідженнях і роботі полігону.)
(Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

14. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костриков А. Л., Купко В. С., **Горобец А. Н.**, Мель И. А. Метрологические аспекты наземного обеспечения космического землеобзора // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія–2012): матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції, 9–11 жовт. 2012 р., Харків, 2012. С. 455–462. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в розрахунках і створив відповідні програмні скрипти.)*

15. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костяшкин С. И., Красногорский М. Г., **Горобец А. Н.**, Лебедев А. С., Малюков В. М., Ратушная Е. С. Летно-экспериментальные испытания полигонно-калибровочного комплекса подспутникового полигона Скрипалі // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов): материалы X Всероссийской Открытой конференции, 12–16 нояб. 2012 г., Москва, 2012. С. 145. *(Особистий внесок здобувача: брав активну участь в експериментальних випробуваннях полігону.)*

16. Лебедев А. С., Горобец Н. Н., Кийко В. И., Купко В. С., Красногорский М. Г., **Горобец А. Н.**, Мындарь И. Г. Распределенные метрологические средства для оценки УЭПР подстилающей поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов): материалы X Всероссийской Открытой конференции, 12–16 нояб. 2012 г., Москва, 2012. С. 147. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в супутніх теоретичних і експериментальних дослідженнях.)*

17. Лебедев А. С., Ковшов С. Б., Малюков В. М., **Горобец А. Н.** Материалы для создания тестовых площадок оценки динамического диапазона РСА космического базирования. 2. Материалы на основе набора металлических

сфер // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов): материалы X Всероссийской Открытой конференции, 12–16 нояб. 2012 г., Москва, 2012. С. 151. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в супутніх теоретичних і експериментальних дослідженнях.)*

18. Лебедев А. С., **Горобец А. Н.** Дополнения к программному обеспечению дешифрирования радиолокационных космических снимков для повышения надежности результатов испытаний РСА // 13th Ukrainian Conference on Space Research, 2–6 sept. 2013. : abstr. Yevpatoria, 2013. P. 200. *(Особистий внесок здобувача: запропонував методи обробки радіолокаційного зображення, створив необхідні програмні модулі, доповідав особисто.)*

19. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костриков А. Л., Красногорский М. Г., **Горобец А. Н.**, Лебедев А. С., Малюков В. М., Мель И. А. Использование объектов хозяйственного назначения для внешней калибровки РСА космического базирования // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 23-й Международной Крымской конференции, 8–14 сент. 2013 г., Севастополь, 2013. С. 1150–1151. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в теоретичних розрахунках і постановці експерименту.)* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

20. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Красногорский М. Г., Малюков В. М., **Горобец А. Н.** Начальный период внешней калибровки характеристик РСА МКА «Кондор - Э» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов): материалы XI Всероссийской Открытой конференции, 11–15 нояб. 2013 г., Москва, 2013. С. 163. *(Особистий внесок здобувача: брав активну участь в роботі полігону.)*

21. **Gorobets A.**, Yeliseyeva N., Gorobets M. Power and Polarization Patterns of a Circularly Polarized Four-Dipole Radiator with a Square Screen // MIKON'2014: Proceedings on CD of 20th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communications, 16–18 June, 2014. Gdansk, Poland, 2014. P. 589–591. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в розрахунках, створив усі графічні матеріали та робив доповідь особисто.)* (Видання входить до наукометричної бази Science index.)

22. Yeliseeva N. P., Gorobets N. N., **Gorobets A. N.**, Calculation of near field of dipole placed above rectangular screen // ICATT'2015: Proceedings on CD of X Anniversary International Conference of Antenna Theory and Techniques, 21–24 April, 2015. Kharkov, 2015. P. 102–104. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в розробці програмних рішень для розрахунків, підготував усі графічні матеріали та робив доповідь на конференції.)* (Видання входить до наукометричних баз Scopus, Web of Science та Science index.)

23. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Мирошниченко А. Ю., Мындарь И. Г., Онищенко А. А., Пивовар Е. А. Наземное обеспечение CAL/VAL PCA TERRASAR-X и KOMPSAT-5 // 15th Ukrainian Conference on Space Research, 24–28 aug. 2015. : abstr. Odessa, 2015. P. 183. *(Особистий внесок здобувача: брав активну участь в роботі полігону й обробці отриманих результатів.)*

24. **Горобец А. Н.**, Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н. Метод получения функции размытия с использованием сосредоточенных целей с известной эквивалентной апертурой // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов): материалы XIII Всероссийской Открытой конференции, 16–20 нояб. 2015 г., Москва, 2015. С. 23. *(Особистий внесок здобувача: запропонував новий підхід до обробки параметрів, що валідуються, створив необхідні програмні модулі, доповідав особисто.)*

25. **Горобець А. Н.** Характеристики контрольно-калибровочных полигонов для наземного обеспечения работы космических систем "Січ-2-1" и "Січ-2М" // 16th Ukrainian Conference on Space Research, 22–27 aug. 2016. : abstr. Odessa, 2016. P. 193.

26. **Горобець О. М.** Радіометричний аналіз якості радіолокаційного зображення // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія–2016): Х Міжнародна науково-технічна конференція, 5–7 жовт. 2016 р. : тези доп. Харків, 2016. С. 82.

27. **Gorobets A. N.**, Yelisseyeva N. P., Katrich V. A., Nesterenko M. V. Optimization of Circularly Polarized Radiation of Inphase Crossed Impedance Dipoles with Screen // ICATT'17: Proceedings on CD of XI International Conference on Antenna Theory and Techniques, 24–27 may, 2017. Kyiv, 2017. P. 270–272. (*Особистий внесок здобувача: брав участь у розрахунках і підготовці графічних матеріалів, робив доповідь особисто.*) (Видання входить до наукометричних баз Scopus, Web of Science та Science index.)

28. **Gorobets A. N.** Segmentation for Detecting Buildings in Infrared Space Images // ICATT'17: Proceedings on CD of XI International Conference on Antenna Theory and Techniques, 24–27 May, 2017. Kyiv, 2017. P. 364–366. (Видання входить до наукометричних баз Scopus, Web of Science та Science index.)

29. Yelisseyeva N. P., Katrich V. A., Nesterenko M. V., **Gorobets. A. N.** Synthesis of Circularly Polarized Radiation by Inphase Crossed Impedance Wire Dipoles with Screen // UKRCON: Proceedings on CD of 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, May 29 – June 2, 2017. Kyiv, 2017. P. 98–101. (*Особистий внесок здобувача: розробка програми, проведення розрахунків і підготовка графічних матеріалів, робив доповідь особисто.*) (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science.)

30. Атрошенко Л. М., Борщева Г. А., **Горобець А. Н.**, Горобець Н. Н., Костриков А. Л., Мель И. А., Ярмольчук Е. Д. Методы наземного обеспечения внешней калибровки сенсоров отечественных КС ДЗЗ // Вимірювальна та

Обчислювальна Техніка в Технологічних Процесах (ВОТТП-2017): матеріали 17-ї міжнародної науково-технічної конференції, 8–13 черв. 2017 р., Одеса, 2017. С. 29–30. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у розробці нових методів калібрування, запропонував нові підходи.)*

31. Yeliseyeva N. P., **Gorobets A. N.**, Katrich V. A., Pshenichnaya S. V. Directional and Polarization Characteristics of Crossed Impedance Wire Dipoles with Square Screen // UkrMiCo'2017: Proceedings on CD of International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, 11–15 Sept. 2017. Kyiv, 2017. P. 113–117. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у розробці програми розрахунків, обробці графічних матеріалів і їх аналізі.)* (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science.)

32. **Gorobets A. N.**, Gorobets N. N., Mahov E. S. Impedance Matching of Dipole Antennas by Metal Rod and Disk Placing // UWBUSIS'2018: Proceedings on Flash-drive of 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 04–07 Sept. 2018. Odessa, 2018. P. 357–361. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у проведенні експерименту, аналізі та підготовці матеріалів до публікації.)* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

33. Gorobets N. N., Bulgakova A. A., Lyashchenko V. A., **Gorobets A. N.**, Optimizing the Vibrator Antenna, Parallel to a Flat Screen, by the Maximum Directive Gain in the Normal Direction // UWBUSIS'2018: Proceedings on Flash-drive of 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 04–07 Sept. 2018. Odessa, P. 372–375. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в розрахунках, аналізі результатів і підготовці матеріалів до публікації.)* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

Наукові праці, які додатково відображають
наукові результати дисертації:

34. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костриков А. Л., Купко В. С., **Горобец А. Н.**, Требования, предъявляемые к контрольно-калибровочным комплексам для наземного обеспечения CalVal РСА космического базирования // Український метрологічний журнал. Харків, 2013. № 3. С. 46–52. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в експериментальному випробуванні полігону та формуванні вимог до нього.)*

35. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Купко В. С., **Горобец А. Н.**, Лебедев А. С., Малюков В. М. Критерии оценки результатов летных испытаний РСА космического базирования // Український метрологічний журнал. Харків, 2014. № 2. С. 28–34. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в роботі полігону, обробці й аналізі отриманих результатів.)*

36. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Мель И. А., Мындарь И. Г. Требования к точностным характеристикам установки метрологических средств для внешней калибровки РСА космического базирования // Український метрологічний журнал. Харків, 2014. № 2. С. 45–50. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в розрахунках і дослідженнях точності виготовлення та встановлення радіолокаційних відбивачів.)*

37. **Горобец А. Н.** Расширенный метод метрологической оценки разрешающей способности радиолокационного изображения // Український метрологічний журнал. Харків, 2017. № 3. С. 9–16.



ДОДАТОК Б

Науково-виробниче підприємство ТОВ «ЛІС-ІНФОРМ»
Scientific and Production Enterprise «FOREST - INFORM», Ltd

Р/р 26004060098505 в Бірді. №1 ХГРУ «ПриватБанк», МФО 351533, Адреса: 61023, м. Харків, вул. Серпова, 4, Україна
S/а 26004060098505 in Dep. №1 ХГРУ «ПриватБанк», МФО 351533, Ad.: 4, Sernova str., Kharkov, Ukraine, 61023

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «ЛІС-ІНФОРМ»

" 25 "  Кочкар Д. А.
2019 р



АКТ

про впровадження результатів
кандидатської дисертаційної роботи
Горобця Олексія Миколайовича

Комісія у складі:

Голова – директор ТОВ «ЛІС-ІНФОРМ» Кочкар Д. А.;

члени комісії: директор полігонів Атрошенко Л. М., технічний директор
Богомолів В. В., головний інженер Акуленко Є. І.

склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи за темою
«Наземне метрологічне забезпечення точності аерокосмічних систем дистанційного
зондування Землі», представленої на здобуття наукового ступеня кандидата фізико –
математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика, використані в діяльності
ТОВ «ЛІС - ІНФОРМ» при обслуговуванні полігона з калібрувальним комплексом для
наземного забезпечення космічної системи 710 КС і при створенні нових метрологічних
пристроїв та програмного забезпечення. В наведених роботах використані наступні
результати дисертаційного дослідження:

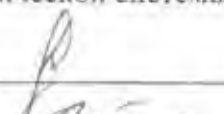
1. Методика визначення роздільної здатності радіолокаторів із синтезованою
апертурою за радіолокаційним зображенням підстильної поверхні.
2. Дослідження радіометричних характеристик РСА за радіолокаційними
зображеннями типових конструктивів наземних об'єктів.

Використання зазначених результатів дозволило підвищити якість послуг, скоротити
видатки на проведення робіт; підвищити продуктивність праці при калібруванні сенсорів
космічної системи 70КС.

Результати впроваджувалися при виконанні робіт за темами:

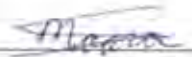
1. Договір № 838/19-12 від 01.11.12р. «Обслуживание полигонно - калибровочного
комплекса для наземного обеспечения космической системы 710КС».
2. Договір № 294/19-13 від 17.05.13р. «Изготовление и поставка метрологических
средств и ПО для наземного обеспечения космической системы 710КС».

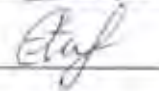
Голова комісії

 Кочкар Д. А.

Члени комісії:

 Атрошенко Л. М.

 Богомолів В. В.

 Акуленко Є. І.