

УЗАГАЛЬНЕННЯ МЕТОДІВ ЦИФРОВОГО СИНТЕЗУ АПЕРТУРИ АНТЕНИ ТА ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНИЙ ПІДХІД ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ

В даній статті узагальнюються методи цифрового синтезу апертури антени, а також розглядається інтерферометричний метод їх реалізації. Проведений аналіз поставленої задачі показав особливості використання методів цифрового синтезу апертури антени, їх основні можливості та переваги. На їх основі запропоновано використання інтерферометричної зйомки, наведено принцип роботи, обґрунтовано доцільність методу інтерферометричної зйомки. Даний інтерферометричний підхід розширює функціональні можливості РЛС, залишаючи незмінними апаратні.

Ключові слова: радіоелектронні системи, цифровий синтез апертури антени, інтерферометрична зйомка, антена.

E.G. BOGDANOV, I.I. CHESANOVSKYY, V.B. RUDNITSKY
Khmelnytsky National University

SUMMARY AND COMPARISON CHARACTERISTICS METHODS DIGITAL SYNTHESIS APERTURE ANTENNA AND INTERFEROMETRIC APPROACH OF THEM

Abstract –This paper summarizes the methods of digital synthesis aperture antenna, and is also considered interferometric method implementation. The analysis of the problem shows the features of the methods of digital synthesis aperture antennas, their key features and benefits. On the basis of proposed use interferometric shooting are working principle, expediency interferometric method of shooting. This interferometric approach extends the functionality of the radar, keeping the same hardware.

Keywords: radio-electronic systems, digital aperture synthesis antenna interferometric photography, antenna.

Синтез апертури антени є одним з найбільш перспективних напрямків розвитку радіолокації, що з'явився в кінці 50-х років і зразу ж привернув до себе широку увагу. Основною перевагою цього напрямку є значне (в 1000 і більше разів) збільшення кутової роздільної здатності РЛС. Радіолокаційна станція з синтезованою апертурою антени (РСА) на сьогоднішній день є єдиним бортовим радіотехнічним засобом, що дозволяє отримати зображення місцевості, з розташованими на ній об'єктами, яке по якості, близьке до аерофотознімків на великій дальності незалежно від часу доби та погодних умов. При введенні цифрової обробки сигналів та цифрового управління (РЛС з цифровим синтезом апертури — РЦСА) до цих переваг додалась оперативність, тобто можливість отримання зображення на борту літального апарату (ЛА) в реальному масштабі часу, а також широкі можливості по обробці сигналів і управлінню РСА. Крім того, при цифровій обробці сигналів та цифровому управлінні простіше вирішуються задачі компенсації спотворень сигналів, селекції цілей, що рухаються і з'являється можливість синтезу апертури антени при криволінійному русі ЛА, що на сьогоднішній день значно розширило область застосування даних систем.

Метою даної роботи, є узагальнення та порівняльна оцінка методів цифрового синтезу апертури радіосистем, а також обґрунтування інтерферометричного підходу їх реалізації.

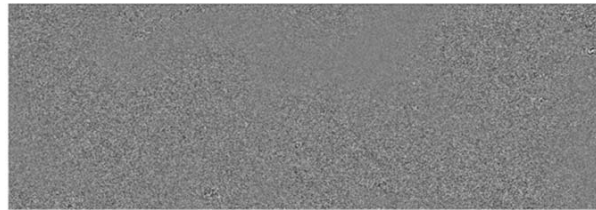
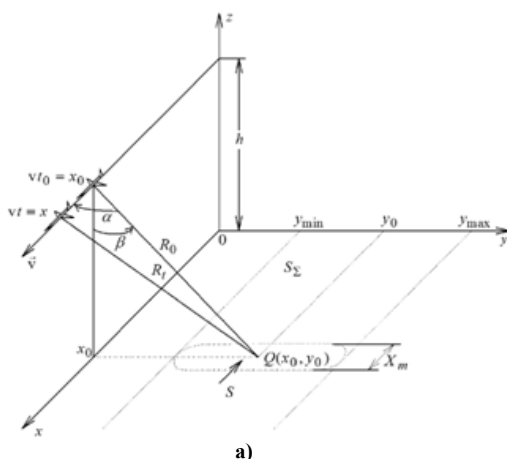


Рис. 1. Загальна схема синтезу апертури (а) і приклад формування радіолокаційного зображення до і після синтезу (б)

В основі побудови РЛС з синтезованою апертурою, покладено застосування малоапертурної антени з широкою діаграмою спрямованості, яка нерухома, відносно літального апарату на якому вона розміщена і направлена перпендикулярно лінії шляху (бічний огляд). При польоті літального апарату антена РЛС послідовно займає в просторі положення на прямій лінії (траєкторії польоту літального апарату), тим самим формуючи штучну (синтезовану) апертуру антени, яка в певному сенсі може ще й розглядатись як решітка (рис. 1). Очевидно, що за умови статичності сцени спостереження і лінійності руху, запам'ятовуючи ряд

сигналів, послідовно прийнятих антеною РЛС в кожній точці, на ділянці траєкторії, потім когерентно їх підсумовуючи, отримується результуюча вузька діаграма спрямованості антени, хоча штучно сформована, але за даних умов вона є такою, що нічим принципово не відрізняється. Розмір синтезованої апертури антени РЛС визначається довжиною ділянки траєкторії, на якому проводиться запам'ятовування і когерентне підсумовування сигналів.

Дана довжина обмежується декількома факторами, основними з яких є стабільність траєкторії польоту літального апарату і ширина діаграми спрямованості елементарної антени, що застосовується для синтезу. Крім того, довжина синтезування визначається і математичним методом синтезу, яких на сьогоднішній день є декілька – метод прямої згортки, метод швидкої згортки та гармонійний аналіз.

Узагальнена математична модель формування радіолокаційного зображення при застосуванні методу прямої згортки можна представити у вигляді [1]:

$$J(\eta) = \int_{-T/2}^{T/2} \dot{\xi}(t+\eta) \dot{h}(t) dt = \int_{-T/2}^{T/2} \dot{\xi}(t-\eta) \dot{h}(t) dt, \quad (1)$$

де $\dot{h}(t) = H(t) \exp(j\mu t^2)$ – опорна функція, $\dot{\xi}(t)$ – прийнятий сигнал (адитивна суміш відбитого сигналу і шуму).

До переваг алгоритму прямої згортки можна віднести можливість безперервної обробки всього маршруту з реалізацією граничного виявлення, в отриманні РЛЗ з рівномірним кроком по азимуту без масштабних спотворень. До недоліків – велику кількість комплексних множень, складність пов'язана з корекцією міграції дальності.

Один з найбільш продуктивних і найбільш поширених алгоритмів – алгоритм швидкої згортки [1], який реалізує фільтрацію сигналу в частотній області. Він використовує відому властивість перетворення Фур'є – згортка сигналів в часовій області відповідає добутку спектрів в частотній області.

$$\dot{U}_{out}(t) = F^{-1}[\dot{S}_{out}(f)] = F^{-1}[\dot{S}_U(f) \dot{S}_h(f)], \quad (2)$$

де $\dot{S}_{out}(f) = \dot{S}_U(f) \dot{S}_h(f)$ – спектр вихідного сигналу; $\dot{S}_h(f)$ – спектр опорної функції (частотна характеристика фільтра).

Перевагами алгоритму швидкого згортки є його висока продуктивність, простота перебудови, отримання вихідного РЛЗ без масштабних спотворень при зміні похилої дальності, а також можливість застосування алгоритму як для стиснення ЛЧМ імпульсів по тривалості, так і для синтезу апертури. Алгоритм швидкої згортки дозволяє також проводити корекцію зміщення дальності цілі по апертурі (міграцію дальності), що особливо актуально для РСА високої роздільної здатності.

При обробці гармонійним сигналом, процес синтезу апертури антени (САА) описується наступним співвідношенням

$$J\{m, q\} = \left| \sum_{k=0}^{N_2-1} h_2\{m, k\} \exp(-j2\pi kq / N_2) \sum_{i=0}^{N_1-1} \xi\{m, kN_n + i\} h_1\{i\} \right|, \quad (3)$$

де $q = -N_2/2, \dots, -1, 0, 1, \dots, N_2/2, k = 0, 1, \dots, N_2-1$

Для алгоритму гармонійного аналізу, як і для не фокусованого синтезу методом ДПФ, характерна нерівномірність масштабу вихідних відліків в залежності від дальності. Як і в інших кадрових алгоритмах, щоб зменшити втрати для цілей, віддалених від центру ДНА, сусідні кадри повинні оброблятися з перекриттям (від 50% і більше, залежно від необхідного дозволу). Суттєва відмінність розглянутих методів полягає саме в обробці сигналу на другому етапі у фільтрі синтезування. При технічній реалізації метод прямої згортки самий простий та не потребує значного об'єму пам'яті для зберігання інформації про відліки. Але поруч із тим, він є менш ефективним через послідовне утворення РЛЗ. Переваги двох інших методів полягають в тому, що на одному інтервалі синтезування формується не один відлік, а N_6 відліків в методі швидкої згортки, та N_2 відліки сигналу РЛЗ в методі гармонійного аналізу, в результаті чого утворення РЛЗ відбувається покадрово.

На сьогоднішній день, необхідно виділити новий метод ЦСА – інтерферометрична зйомка [1]. Даний підхід передбачає отримання набору (двох і більше) КРЛЗ на заданій території при співпадаючих або близьких умовах спостереження, що визначаються інтерферометричною базою (рис. 3.). Залежно від задачі, що розв'язується база може розташовуватися поперек лінії шляху, (побудова карт рельєфу, топографічне картування) уздовж лінії шляху (індикація рухомих цілей) або визначатися часовим інтервалом між зйомками (часова база диференційної інтерферометрії для вимірювання малих зсувів земної кори і зміни геометрії об'єктів, а також для виявлення змін в оперативній обстановці). Інформація, яку видобувають при інтерферометричній обробці, міститься в різниці фаз в кожному пікселі РЛЗ, що обчислюється через добуток комплексних відліків одного КРЛЗ на комплексно-пов'язані відліки другого КРЛЗ

$$\varphi(X, Y) = \arctg \left(\frac{\text{Im}(U_1 U_2^*)}{\text{Re}(U_1 U_2^*)} \right), \quad (4)$$

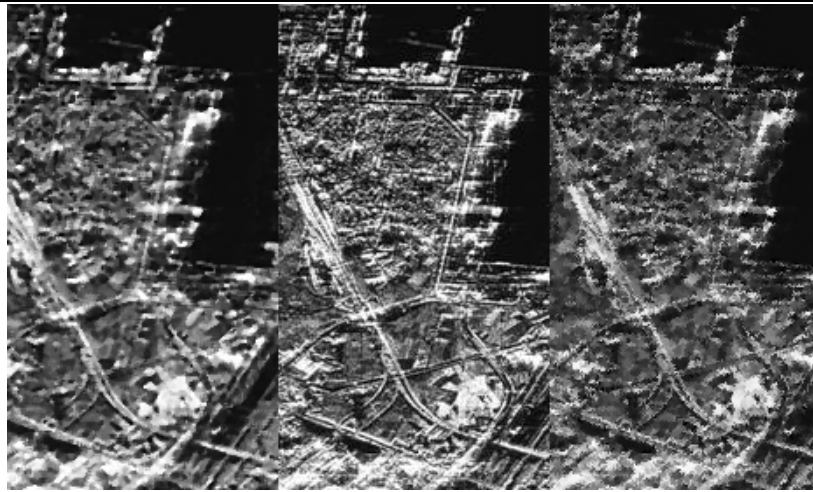


Рис.2. РЛЗ отримані методом прямої згортки (а), методом швидкої згортки (б), гармонійним аналізом (в)

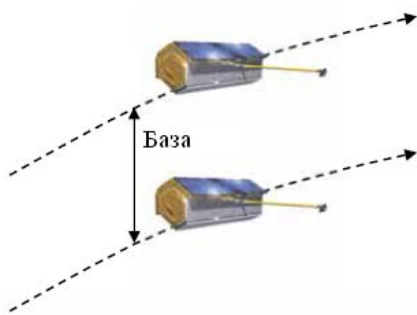


Рис. 3. Інтерферометрична база

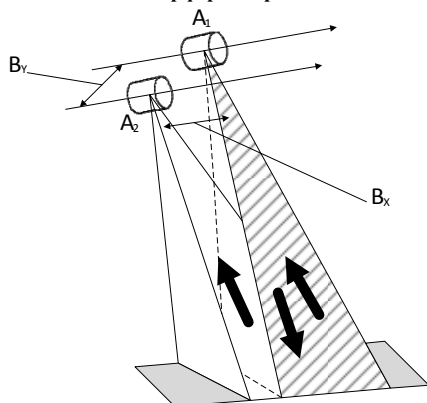


Рис. 4. Інтерферометрична зйомка з використанням тандему КА

Використовують інтерферометрію з «жорсткою» базою, при якій передавач і два прийомних канали з незалежними антенами розміщуються на одному КА, і з «м'якою» базою у вигляді тандемів КА, що рухаються по близьких паралельних орбітах або шляхом зйомки на іншому витку кратно повторюваної орбіти (міжвиткова інтерферометрія).

Основна вимога до отримуваних пар КРЛЗ – їх придатність до когерентної обробки. Її характеризують коефіцієнтом когерентності. Цей комплексний параметр називають «інтерферометричною когерентністю»

$$\gamma_{cog} = \frac{\langle z_1 z_2^* \rangle}{\sqrt{\langle z_1 z_1^* \rangle \langle z_2 z_2^* \rangle}}, \quad (5)$$

де z_1, z_2 – комплексні коефіцієнти зворотного розсіювання, розраховані по першому і другому КРЛЗ, кутові дужки означають усереднення по об'єкту спостереження.

Геометрія інтерферометричної зйомки з використанням тандемів КА показана на рис. 4. Супутники рухаються по близьких орбітах. У поточний момент часу положення супутників в точках A_1 і A_2 формує інтерферометричні бази – поперечну B_y і повздовжню B_x . Зазвичай один з супутників (A_1) працює в активному режимі випромінювання і прийому, а другий (A_2) пасивний – тільки в режимі прийому. Розміри

інтерферометричних баз повинні задовольняти умову когерентності. Розглядаємо поперечну інтерферометрію для побудови карт рельєфу (рис. 5). Прийемо, що вісь Z_S направлена в зеніт і проходить через середину центрального кута α_S (центр орбітального угруповання). Вісь X_S паралельна вектору швидкості переміщення КА, вісь Y_S доповнює систему до правої при лівосторонньому огляді і до лівої – при огляді правим бортом.

Площина візування $OY_S Z_S$, перпендикулярна вектору швидкості переміщення, відповідає нульовій доплерівській частоті при синтезі РЛЗ.

Вхідними даними для розрахунків є:

- отримані за даними вимірювань радіуси орбіт КА R_{S1}, R_{S2} , центральний кут α_S , поточні географічні координати сліду F;
- похилі дальності R_1 і R_2 до точок на земній поверхні;
- різниця похилих дальностей $\Delta R = R_{S1} - R_{S2}$.

Вихідними даними розрахунків повинні бути:

- географічна координата кожної точки РЛЗ в перетині $X = 0$ (у площині візування), для

обчислень якої потрібне знання кута α ;

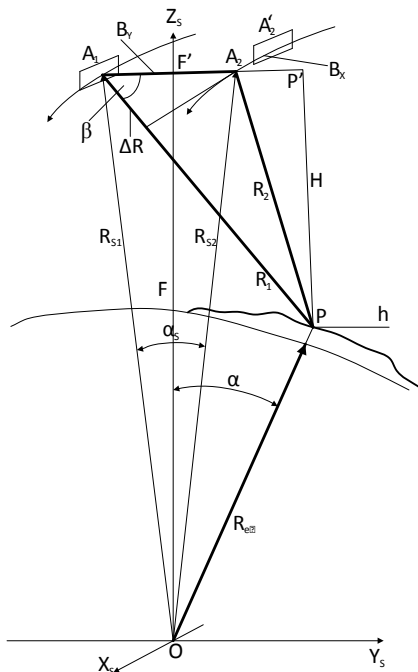


Рис. 5. Геометрія інтерфериметричної зйомки тандему КА

- висота рельєфу щодо радіуса референц-еліпсоїда $R_{e\phi}$ на географічній широті району зйомки.

Розмір бази поперечної інтерфериметрії визначається виразом

$$B_Y = \sqrt{R_{S1}^2 + R_{S2}^2 - 2R_{S1}R_{S2} \cos(\alpha_S)} \approx \alpha_S (R_{S1} + R_{S2}) / 2 \quad (6)$$

При рівності радіусів орбіт обох КА база інтерфериметрії горизонтальна, інакше вона нахилена на малий кут

$$\delta_B = \arcsin\left(\frac{R_{S1} \sin(\alpha_S)}{B_Y}\right) + \frac{\alpha_S}{2} - \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

Для спрощення викладок приймемо, що радіуси орбіт КА в тандемі однакові, тоді лінія A_1P' горизонтальна, а лінія PP' паралельна осі OZ_S . Координату точки P щодо базової лінії A_1P' знаходять з прямокутного трикутника A_1PP' з гіпотенузою R_1 і прилеглим кутом β , обчисленим через різницю похилих дальностей ΔR $\beta = \arcsin(\Delta R / B_Y)$

Звідси отримуємо співвідношення для координати точки P :

$$X_P = 0; Y_P = F'P' = R_1 \cos(\beta) - B_Y / 2 = \frac{\Delta R R_1}{B_Y} - B_Y / 2;$$

$$Z_P = R_{S1} \cos(\alpha / 2) - R_1 \sin(\beta)$$

Для висоти рельєфу щодо референц-еліпсоїда маємо $h = \sqrt{Z_P^2 + Y_P^2} - R_{e\phi}$

Центральний кут α для обчислення віддалення точки спостереження від траси КА знаходимо з виразу $\alpha = \arcsin\left(\frac{Y_P}{R_{e\phi} + h}\right)$

У можливому варіанті розрахунку виражають $R_{S2} = R_{S1} - \Delta R$, а далі розраховують трикутник за трьома сторонами з обчисленням висоти

$$H = \frac{2\sqrt{p(p - B_Y)(p - R_1)(p - R_2)}}{B_Y} \quad (8)$$

і кута

$$\beta = \arccos\left(\frac{\sqrt{R_1^2 - H^2}}{R_1}\right)$$

де $p = \frac{B_Y + R_1 + R_2}{2}$ – півпериметр трикутника A_1A_2P .

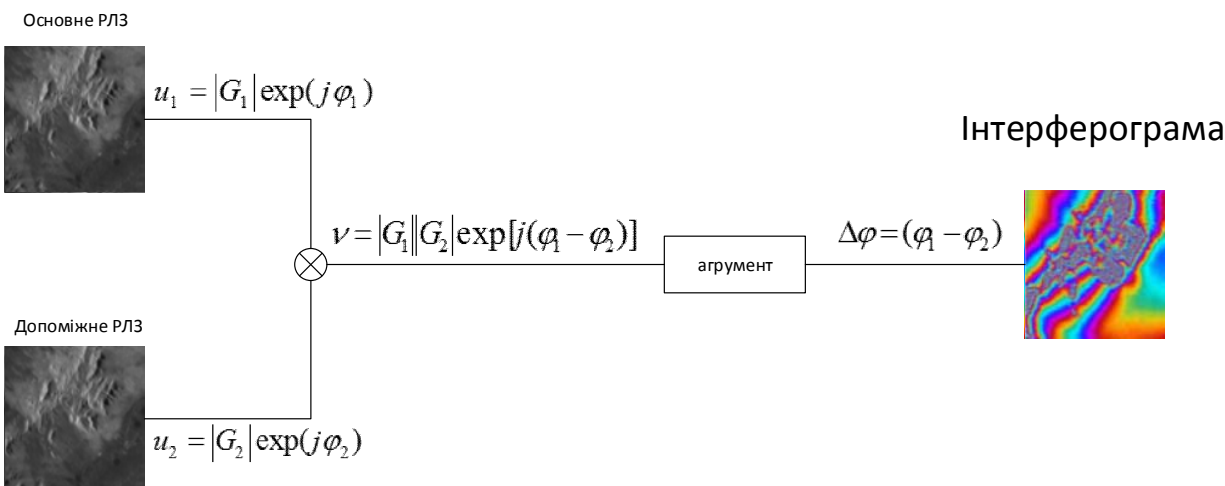


Рис. 6. Принцип формування інтерферограми

Співвідношення, аналогічні наведеним вище, справедливі і для випадків міжвиткової інтерферометрії, коли зображення отримують незалежно за допомогою одного або різних КА. Неодмінна вимога – дотримання бази інтерферометрії, при якій зберігається когерентність пар КРЛЗ. Принцип формування інтерферограми показаний на рис. 6.

На рис. 7 показано приклад реконструкції радіолокаційного зображення із застосуванням інтерферометричного підходу, що демонструє його можливості. При цьому, слід зазначити, що деталізація елементів зображення, при достатній базі, може сягати сантиметрових і міліметрових розмірностей, що з огляду на умови спостереження не може бути досягнуто іншими підходами.

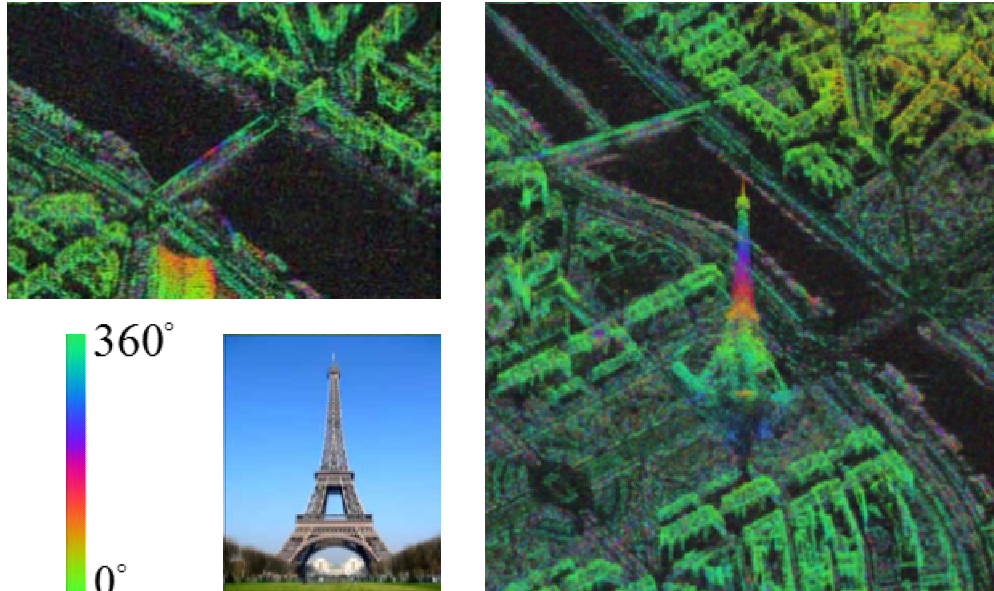


Рис. 7. Інтерферограма Ейфелевої вежі та моста Мірабо

Висновок. Підсумовуючи вище проведений аналіз, кожен з трьох методів цифрового синтезу апертури антени має свої переваги (пряма згортка – не потребує збільшення пам'яті для зберігання інформації про відліки, швидка згортка – висока продуктивність, простота перебудови, отримання вихідного РЛЗ без масштабних спотворень при зміні похилої дальності, гармонійний аналіз – на одному інтервалі синтезування формується не один відлік а N_2 відліки сигналу РЛЗ, в результаті чого утворення РЛЗ відбувається покадрово). Новий метод ЦСА – інтерферометрична зйомка – передбачає отримання набору (двох і більше) КРЛЗ на заданій території при співпадаючих або близьких умовах спостереження, що визначаються інтерферометричною базою. Він дозволяє розв'язати більш складні задачі, а саме: побудова карт рельєфу, топографічне картування, індикація рухомих цілей, вимірювання малих зсувів земної кори і зміни геометрії об'єктів, а також для виявлення змін в оперативній обстановці.

Література

1. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.: ил. (Научная серия «Системы мониторинга воздушного, космического пространства и земной поверхности», редактор серии В. С. Верба).
2. Цифровые методы обработки информационных процессов [Текст]: учеб. пособие / В.К. Волосяк, В.В. Павликов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е.Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2012. – Ч. 2. – 78 с.
3. Dr. Francesco De Zan. ESA Radar Remote Sensing Course16-20/04/2012 Tartu (Estonia). SAR Interferometry. https://earth.esa.int/documents/10174/226412/Interferometry_I_II.pdf/c9a3355a-3466-42a4-a16d-224236e99c87?jsessionid=5967646BFF5D4C81E79B3D3C628B15E1.eodisp-prod4040?version=1.0

Preferences

1. Radiolokacionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya / Pod red. V.S. Verby. – М.: Radiotekhnika, 2010. – 680 s.: il. (Nauchnaja serija «Sistemy monitoringa vozdušnogo, kosmicheskogo prostanstva i zemnoj poverhnosti», redaktor serii V. S. Verba).
2. Cifrovye metody obrabotki informacionnyh processov [Tekst]: ucheb. Posobie / V.K. Volosjuk, V.V. Pavlikov. – H.: Nac. ajerkosm. un-t im. N.E.Zhukovskogo «Har'k. aviac. in-t», 2012. – Ch. 2. – 78s.
3. Dr. Francesco De Zan. ESA Radar Remote Sensing Course16-20/04/2012 Tartu (Estonia). SAR Interferometry. https://earth.esa.int/documents/10174/226412/Interferometry_I_II.pdf/c9a3355a-3466-42a4-a16d-224236e99c87?jsessionid=5967646BFF5D4C81E79B3D3C628B15E1.eodisp-prod4040?version=1.0

Рецензія/Peer review : 13.3.2014 р.

Надрукована/Printed : 18.5.2014 р.