

МЕТОДИ ФРАКТАЛЬНОЇ ОБРОБКИ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ І СПЕКТРОЗОНАЛЬНИХ ДАНИХ

В роботі розглянута математична модель формування зображень в радіолокаторах із синтезованою апертурою. Сформована модель сцени, одержуваної в РСА, являє собою простір двовимірних функцій зворотного розсіювання, однозначно відповідних простору об'єктів, розташованих на поверхні, яка знімається. Здійснюється визначення питомої ефективної площі розсіювання та комплексної функції відбивання. Розглянуто питання впливу поляризації на обробку радіолокаційних зображень. В моделі формування зображень враховано додавання адитивного випадкового шуму та мультиплікативної завади у вигляді спекл-шуму, який, в свою чергу, може використовуватися для ідентифікації просторово-розподілених об'єктів і оцінювання характеристик РСА. Побудована математична модель фрактального методу оцінки радіолокаційних зображень з використанням функції спостережуваного сигналу, функції випадкового шуму, текстурної функції цілі та текстурної функції фону. Встановлено, що визначення фрактальних властивостей областей і об'єктів, присутніх на зображеннях, одержуваних в системах космічного спостереження, можливе тільки при обчисленні локальної фрактальної розмірності.

Ключові слова: радіолокація, дистанційне зондування Землі, поляризація, синтезована апертура, математична модель, зображення, фрактал, розмірність.

V.R. LUBCHIK, V.I. STETSUK, O.S. KARPINSKY, V.P. NEZDOROVIN
Khmelnytskyi National University

FRactal PROCESSING METHODS FOR RADAR AND SPECTROZONAL DATA

Currently available textural analysis methods are widely used in image processing problems in Earth remote sensing systems, but the question remains of the application of fractal geometry methods in radar imaging problems in radars with synthesized aperture, especially with low contrast objects present on them. The study of the applicability of fractal theory methods in the problem of detecting low-contrast targets on radar images, as well as options for improving the efficiency of such detection by applying a complex approach is an urgent scientific task. To solve it requires an analysis of the processing of various natural and anthropogenic scenes obtained in the systems of remote sensing. The mathematical model of image formation in radars with synthesized aperture is considered. The formed model of the scene obtained in RSA is a space of two-dimensional backscattering functions, uniquely corresponding to the space of objects located on the surface being taken. The specific effective scattering area and the complex reflection function are determined. The influence of polarization on the processing of radar images is considered. In the imaging model, account is taken of the addition of additive random noise and multiplicative interference in the form of speckle noise, which in turn can be used to identify spatially distributed objects and evaluate the characteristics of PCA. A mathematical model of the fractal method of estimating radar images using the observed signal function, random noise function, textural objective function and textural background function is constructed. It is established that the determination of fractal properties of regions and objects present in images obtained in space surveillance systems is possible only when calculating the local fractal dimension. We form the following successive steps of the process of fractal processing of radar images: construction of a field of fractal dimensions of a multichannel radar image; threshold processing of fractal dimension fields; clustering of radar image by fractal dimension field.

Keywords: radar, remote sensing, polarization, synthesized aperture, mathematical model, image, fractal, dimension.

Вступ

Методи та апаратура радіолокаційного зондування Землі на сьогоднішній день розвиваються досить швидкими темпами, особливо бортові радіолокатори із синтезом апертури (РСА). Дані технічні засоби здійснюють зондування земної поверхні в будь-який час доби, та пори року і не залежать ні від кліматичних умов, ні від наявності хмарності, що вигідно відрізняє їх від систем оптичного діапазону. Сучасна реалізація космічних (РСА) може забезпечити просторове розрізнення знімків до часток метра, що дозволяє вирішувати задачу радіобачення не тільки у всепогодності, але і в можливості виявлення і розпізнавання об'єктів спостереження за радіолокаційним контрастом, селекції рухомих наземних (надводних) об'єктів. В подібних системах використовується багаточастотне поляриметричне зондування з вимірюванням амплітудних і фазових відмінностей відбитих сигналів. Широко застосовується інтерферометрична обробка даних радіолокаційного зондування для отримання детальних тривимірних портретів об'єктів спостереження, стаціонарних і рухомих, виявлення змін, викликаних природними, техногенними та антропогенними факторами. Проблематика даного питання в першу чергу відноситься до задачі виявлення і визначення границь слабо відбиваючих об'єктів, а також об'єктів, відбивні властивості яких близькі (малоконтрасні протяжні цілі). При автоматизованій обробці космічних РЛЗ для її вирішення в даний час найчастіше використовуються статистичні, спектральні і контурно-текстурні методи. Широко поширені методи виділення границь на основі радіояскравісного контрасту, отримані на основі методів Лапласа, Уоллеса і Кірша, а також алгоритм Кенні [1]. Однак ці методи виявляються малоефективними при вирішенні завдань виявлення неоднорідностей малоконтрасних об'єктів. Перспективними в цьому плані слід вважати фрактальні методи. В рамках цього підходу зображення розглядаються не як сукупність окремих елементів з певними характеристиками, а як деяка структура, що володіє внутрішніми топологічними, а отже і кореляційними зв'язками між елементами і характеризує складний і протяжний об'єкт в цілому. Численні

дослідження і експерименти з аналізу зображень природних поверхонь в різних діапазонах просторових масштабів показали, що в більшості випадків вони мають фрактальні властивості [2, 3]. Зокрема, фрактальна розмірність, яка кількісно оцінює складність і хаотичний характер природних текстур, може бути використана в якості ефективної ознаки сегментації РЛЗ. Однак ряд питань фрактальної обробки космічних радіолокаційних зображень опрацьовано недостатньо. Зазначені вище фактори дозволяють говорити про необхідність проведення додаткових досліджень з розробки та аналізу фрактальних методів і алгоритмів обробки РЛЗ з метою підвищення дешифрувальних властивостей радіолокаційних зображень в системах космічного спостереження.



а)



б)

Рис. 1. Схожість реальних фрагментів рельєфу місцевості на фрактальні структури:
а) гірський хребет Кондер, б) Австралія

Основна частина

Радіолокаційне виявлення малопомітних і малогабаритних об'єктів поблизу поверхні землі і моря представляє вкрай важку задачу. Різноманітність підстилаючих поверхонь, умов радіолокаційного спостереження і супроводу вищевказаних об'єктів часто призводить до того, що відношення сигнал/шум для таких завдань майже завжди заповнює область від'ємних (в децибелах) значень. Це робить непридатним класичні радіолокаційні методи і алгоритми виявлення в більшості випадків, тобто використання енергетичних виявників стає неможливим. У зв'язку з цим подальший розвиток теорії виявлення на основі аналізу фрактальних властивостей зображень призвів до появи моделі фрактального виявника, який дозволяє здійснювати пошук штучних об'єктів на фоні фрактальних підстилаючих поверхонь. Модель сцени, одержуваної в РСА, являє собою простір двовимірних функцій зворотного розсіювання $\rho(x, y)$, однозначно відповідних простору об'єктів, розташованих на поверхні, яка знімається. Функція зворотного розсіювання $\rho(x, y)$ являє собою комплексну функцію, відповідну локальній матриці розсіювання поля, відбитого від об'єкта в заданому поляризаційному базисі при фіксованих значеннях всіх інших характеристик поля опромінення:

$$\rho(x, y) = \lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{4\pi R} \frac{E(x, y)}{E_0(x, y)}, \quad (1)$$

де $E(x, y)$ – величина електричної складової розсіяного електромагнітного поля, зміряна гіпотетичним спостерігачем, $E_0(x, y)$ – величина електричної складової падаючого електромагнітного поля. Потужність відбитого поля визначається ефективною площею розсіювання:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \left| \frac{E}{E_0} \right|^2. \quad (2)$$

Тому функція зворотного розсіювання пов'язана з ефективною площею розсіювання відбивача наступним чином:

$$\rho(x, y) = \sqrt{\sigma(x, y)} \cdot e^{j\varphi(x, y)}, \quad (3)$$

де $\varphi(x, y)$ – зміна фази хвилі при її відбиванні. Тоді функція відбивання об'єкта визначається залежністю коефіцієнта розсіювання від координат точкових відбивачів i -го об'єкту:

$$\rho_i = \sqrt{\sigma} \cdot e^{j\varphi_i}. \quad (4)$$

У разі гладких неоднорідностей використовується модель об'єкта у вигляді P просторово-розподілених блискучих точок, і функція зворотного розсіювання представляється сумою дельта-функцій:

$$\rho(x, y) = \sum_{p=1}^P \rho_p \delta(x - x_p, y - y_p), \quad (5)$$

де $\rho_p = \sqrt{\sigma_p} \cdot e^{j\varphi_p}$ – коефіцієнт зворотного розсіювання точкового відбивача.

Просторово розподілені об'єкти мають однорідну відбивну здатність в межах деякої ділянки (поле, ліс, водна поверхня, дорога, тощо). Відбиваюча здатність таких об'єктів характеризується питомою ефективною площею розсіювання, яка визначається як відношення ефективної площі розсіювання елемента розрізнення на місцевості до значення його геометричної площі:

$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{\delta x \cdot \delta y} \quad (6)$$

Важливою властивістю РСА, яка істотно впливає на одержувані зображення, є поляризація радіосигналів при передачі і прийомі [2]. В однополяризаційних РСА прийом ведеться з узгодженими вертикальною (VV), горизонтальною (HH) або круговою поляризаціями. У поляриметричних РСА використовуються два приймальних і два передавальних канали з горизонтальною і вертикальною поляризаціями, що дозволяють порівнювати сигнали з будь-якими комбінаціями поляризацій при передачі і прийомі. В цьому випадку, для визначення комплексної функції відбивання використовується повна поляризаційна матриця, яка описує перетворення амплітуди, фази і поляризації хвилі, опромінюючої ціль, при її відбиванні від цілі:

$$\hat{\rho} = \begin{bmatrix} \sqrt{\sigma_{HH}} \cdot e^{j\varphi_{HH}} & \sqrt{\sigma_{HV}} \cdot e^{j\varphi_{HV}} \\ \sqrt{\sigma_{VH}} \cdot e^{j\varphi_{VH}} & \sqrt{\sigma_{VV}} \cdot e^{j\varphi_{VV}} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де $\sqrt{\sigma_{HH}}$, $\sqrt{\sigma_{HV}}$, $\sqrt{\sigma_{VH}}$, $\sqrt{\sigma_{VV}}$ – елементи матриці розсіювання, що характеризують амплітуду відбитого сигналу, φ_{HH} , φ_{VH} , φ_{HV} , φ_{VV} – відповідні фази.

Поляризація впливає на контраст об'єктів, збільшуючи його в напрямку, що збігається з напрямком поляризації. Вплив вибору поляризації показано на рис. 2.



Рис. 2. Фрагмент синтезованого знімка: а) VV поляризація, б) VH поляризація

Прийняте РСА поле на всій траєкторії носія РЛС формує траєкторний сигнал, який включає в себе різного роду перешкоджаючі сигнали від сторонніх джерел перешкод і внутрішні шуми:

$$U_T(\xi, \eta) = U_r(\xi, \eta) + \beta(\xi, \eta) \quad (8)$$

де $U_r(\xi, \eta)$ – спостережуваний сигнал, $U_r(\xi, \eta)$ – відбитий сигнал, прийнятий на ділянці траєкторії, $\beta(\xi, \eta)$ – шуми і перешкоди.

Прийнятий сигнал від протяжної цілі є результат лінійного перетворення функції відбивання:

$$U_T(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(x, y) U_1(\xi - x, \eta - y) dx dy, \quad (9)$$

де $U_1(\xi - x, \eta - y)$ – сигнал від одиночної точкової цілі, $\rho(x, y)$ – функція відбивання.

Метою завдання обробки радіолокаційного сигналу є відновлення функції зворотного розсіювання $\rho(x, y)$. Функція зворотного розсіювання міститься в прийнятому сигналі у вигляді невідомої функції підінтегрального виразу. Завдання формування зображення в радіолокаційних системах (так само як і в оптико-електронних) є окремим випадком завдання відновлення зображення. Модель формування зображень представляється наступним виразом:

$$g(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) h(\xi, \eta, x, y) dx dy, \quad (10)$$

тут $g(\xi, \eta)$ – сформоване системою зображення (РЛС або оптичною), $f(x, y)$ – поле відбивання досліджуваного об'єкта. Функція Гріна (або апаратна функція) $h(\xi, \eta, x, y)$ в даному виразі має зміст реакції системи формування на імпульсний вхідний вплив $\delta(x - x_0, y - y_0)$ і повністю характеризує систему формування зображення. У радіолокації функцією Гріна $h(\xi, \eta, x, y)$ є реакція системи на точковий відбивач, розташований в точці (ξ, η) , в оптиці – на точковий яскравий об'єкт в точці з цими ж координатами. Інтегральне рівняння Фредгольма (10) справедливо тільки для лінійних систем формування зображень. Попри те, що більшість реальних систем є принципово нелінійними, часто доводиться вдаватися до різних методів лінеаризації початкових рівнянь і потім проводити дослідження в класі лінійних систем, що дозволяє використовувати (10) як загальний вираз для спостережуваного зображення з додаванням адитивного випадкового шуму – $\beta(\xi, \eta)$, немінучого в реальному фізичному пристрої.

$$g(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) h(\xi, \eta, x, y) dx dy + \beta(\xi, \eta). \quad (11)$$

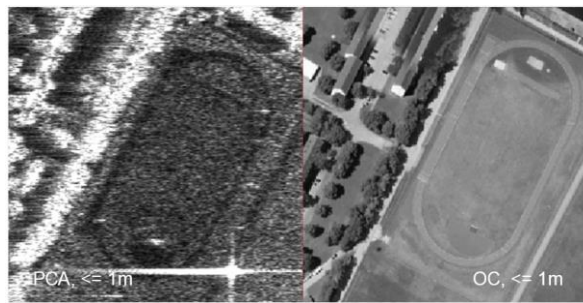


Рис. 3. Радіолокаційне зображення, що містить характерний спекл-шум (зліва)

Специфічною особливістю радіолокаційних зображень, отриманих в РСА є наявність спекл-шуму (рис. 3), який викликаний інтерференцією елементарних відбивачів від однорідних протяжних об'єктів.

Принциповим в утворенні спекл-шуму є співвідношення розмірів об'єкта і розміру елемента розрізнення, який формується при когерентній обробці сигналу. Спекл-шум може використовуватися для ідентифікації просторово-розподілених об'єктів і оцінювання характеристик РСА, і, в той же час, наявність спекл-шуму призводить до погіршення дешифрованості радіолокаційних зображень, радіометричного розрізнення і точності вимірювання компонентів радіолокаційного портрету об'єкта. Таким чином, задача обробки зображення зводиться до найбільш точного відновлення функції $f(x,y)$. Для цієї мети необхідно пригнічувати мультиплікативну шумову складову – спекл-шум. Існуючі методи зниження спекл-шуму поділяються на такі основні напрями: додавання незалежних радіолокаційних зображень, використання глобальних алгоритмів фільтрації (алгоритми Вінеровської і Калмановської фільтрації, геометрична фільтрація, тощо) та використання локальних алгоритмів (метод локальних статистик, сигма-фільтр, локальна адаптивна фільтрація, метод Фроста).

При аналізі протяжних цілей результатом дешифрування є розбиття вихідного зображення на однорідні області з оцінкою їх статистичних характеристик, що дозволяють коректно відносити такі області до певних класів. Отримувані радіолокаційні зображення можуть містити в різному ступені виражену границю між окремими областями з різним контрастом, тому крім рішення задачі виявлення та оцінки параметрів таких границь істотну роль відіграє аналіз запропонованих алгоритмів її виділення. Основні методи виділення границь можна класифікувати наступним чином (рис. 4).

Однак в загальному випадку при обробці протяжних областей, особливо, якщо вони мають близькі значення статистичних характеристик, застосування класичних алгоритмів виявлення і розпізнавання не завжди можливе. В основі нових інформаційних технологій виявлення і розпізнавання об'єктів в складній обстановці із завадами розвиток отримали методи з використанням текстур (фрактальна обробка, основана на теорії детермінованого хаосу і дробової розмірності), методи комплексування радіолокаційної інформації з даними інших знімальних систем, наприклад в оптичному діапазоні. Застосування методів фрактальної обробки передбачає використання моделі зображення, що враховує самоподобу природних текстур в різних масштабах. Результати обробки зображень, отриманих на різних довжинах хвиль в різних масштабах, свідчать про те, що області зображень, відносяться до різних класів природних утворень, зберігають свої стохастичні характеристики, не дивлячись на масштаб зображення, і можуть бути досліджені з використанням теорії фракталів. Використання фрактальних методів обробки космічних зображень (побудова поля фрактальних розмірностей) дозволяє розділяти різні типи природних і антропогенних структур і об'єктів, таких як границі море-лід, межі берегової лінії, лісові масиви, сільськогосподарські угіддя з різними культурами тощо. Особливістю фрактальних методів є те, що при обробці спектральнозональних і радіолокаційних зображень місцевості вдається описати унікальність спостережуваного об'єкта за допомогою одного параметра – фрактальної розмірності, що дає можливість здійснити попереднє автоматичне сегментування аналізованого зображення шляхом виділення кластерів заданого діапазону значень фрактальних розмірностей.

При радіолокаційному зондуванні корисний сигнал від цілі $s_T(\vec{x})$ є частиною загального зображення, створюваного всіма відбиваючими елементами спостережуваних фрагментів фону, який оточує ціль, тому на практиці сигнали від елементів утворюють завадову складову. Шукана ціль затінює ділянку фону, тому припущення про адитивність корисного сигналу $s_T(\vec{x})$ і фону оправдане тільки, коли ціль



Рис. 4. Класифікація методів виділення границь

займає незначну частину зображення. У зв'язку з цим модель реальних зображень виявляється складнішою за просту радіотехнічну модель адитивного складання сигналу і шуму виду (8).

Вважаючи, що в області аналізу A задані функції:

- $U_T(\vec{x})$ – функція спостережуваного сигналу $\vec{x} \in A$;
- $s_T(\vec{x})$ – функція цілі ($\vec{x} \in A_s, A_s \subset A$),
- $n(\vec{x})$ – функція випадкового шуму ($\vec{x} \in A$),
- $g(\vec{x})$ – текстурна функція навколо цілі ($\vec{x} \in A - A_s$),

при тому, що

$$g(\vec{x}) \rightarrow \begin{cases} \geq 0, & \vec{x} \in A - A_s, \\ = 0, & \vec{x} \in A_s \end{cases} \quad (12)$$

одержуємо, що модель аналізованого зображення з урахуванням середовища поширення зводиться до виду

$$U_T(\vec{x}) = \varepsilon[g_0 + s_T(\vec{x})] + g(\vec{x})n(\vec{x}), \quad (13)$$

де ε – рівень мультиплікативних перешкод, g_0 – постійна складова, яка визначається середнім рівнем контрасту і забезпечує умову $U_T(\vec{x}) \geq 0$.

Встановлення інваріантності фрактальної розмірності зображень природних утворень від їх яскравості стало основною передумовою для переходу до фрактальної обробки складних зображень: будь-яка детермінована ціль у фізично охоплюваних масштабах спостереження залишається практично незмінною, і оцінка її геометричних характеристик прагне до певного межі. У той же час, при зміні масштабу зображення місцевості площа фрактальних утворень відповідно змінюється, тому поява на будь-якому зображенні деякої штучної цілі змінює величину фрактальної розмірності зображення в цілому. У разі протяжних цілей, одержуваних РСА, модель радіолокаційного зображення повинна бути доповнена. Протяжний об'єкт сам по собі може мати фрактальний характер, крім цього обов'язковий в РСА спекл-шум має фрактальні властивості, тому в виразах (12) і (13) повинні бути враховані фрактальні властивості протяжного об'єкта:

$$g_B(\vec{x}) \rightarrow \begin{cases} \geq 0, & \vec{x} \in A - A_s, \\ = 0, & \vec{x} \in A_s \end{cases} \quad (14)$$

$$g_T(\vec{x}) \rightarrow \begin{cases} \geq 0, & \vec{x} \in A_s, \\ = 0, & \vec{x} \in A - A_s \end{cases} \quad (15)$$

$$U_T(\vec{x}) = \varepsilon[g_0 + g_T(\vec{x})s_T(\vec{x})] + g_B(\vec{x})n(\vec{x}), \quad (16)$$

де $g_T(\vec{x})$ – текстурна функція цілі ($\vec{x} \in A_s$), $g_B(\vec{x})$ – текстурна функція фону ($\vec{x} \in A - A_s$).

При проведенні фрактального аналізу необхідно враховувати той факт, що досліджуване зображення може складатися з фрагментів, що мають різні оцінки розмірності. Тому при проведенні фрактальної обробки зображень, що містять різні природні текстури, потрібне проведення віконної обробки зображення з обчисленням в пропонованому вікні локальної фрактальної розмірності. В цьому випадку, результатом обробки зображення є побудова поля фрактальної розмірності, при якому кожному пікселю зображення ставиться у

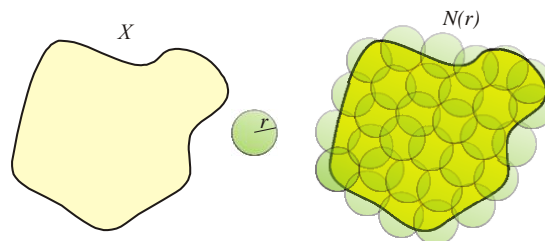


Рис. 5. Графічне пояснення розмірності

відповідність значення D (дробова розмірність Хаусдорфа-Безиковича). Поняття дробової розмірності тісно пов'язане з топологічною розмірністю D_0 (це звичайна геометрична розмірність). Фрактали можна розглядати як множину точок, вкладених у простір. Зокрема, точка має топологічну розмірність $D_0=0$. Гладкі криві (окружності, прямі) – $D_0=1$. Розмірність поверхні $D_0=2$, об'ємних тіл $D_0=3$, гіпертіл $D_0>3$. Розмірність Хаусдорфа узагальнює поняття розмірності дійсного векторного простору, і є природним способом визначення розмірності підмножини в метричному просторі. Наприклад розмірність Хаусдорфа n -мірного (розмірність в сенсі векторного простору) унітарного простору (особливий випадок векторного простору) буде теж дорівнює n . Уявімо повне покриття множини X кулями радіусу r , позначивши кількість цих куль за $N(r)$, рис. 5. Значення $N(r)$ буде рости при зменшенні r (для повного покриття буде потрібно все більше куль). Розмірністю Хаусдорфа “хорошою” множини X буде таке унікальне число d , що $N(r)$ буде рости як $1/r^d$ при прагненні r до нуля. Під “хорошою” множиною розуміються гладкі множини без особливостей, якими наприклад володіють фрактали. Прикладами хороших множин можуть бути будь-які ідеалізовані геометричні об'єкти такі як куб, сфера, тощо.

Візьмемо деяку D -мірну геометричну структуру і будемо ділити ітеративно її сторони на M рівних частин (на наступній ітерації, будемо ділити кожну отриману на попередній ітерації частина так само на M частин). Кожен рівень буде складатися з M^D частин попереднього рівня. Позначимо наступним чином кількість отриманих частин $N=M^D$. Виконаємо наступне перетворення для обчислення формули для значення фрактальної розмірності D :

$$N = M^D \Rightarrow \log N = \log M^D \Rightarrow D = \frac{\log N}{\log M} \quad (17)$$

Наприклад, для кривої Коха (рис. 6) $M=3$, тому що відрізок ділиться на три рівні частини, а $N=4$, тому що кожна частина перетворюється в 4 частини рівних $1/4$ від оригіналу. Тоді фрактальна розмірність такої множини при нескінченній кількості ітерацій буде дорівнювати наступним значенням:

$$D = \frac{\log N}{\log M} = \frac{\log 4}{\log 3} = \frac{2 \log 2}{\log 3} \approx 1,26$$

Для трикутника Серпінського (рис. 7) на кожній ітерації одна сторона ділиться на 2 частини, тобто $M=2$, а в результаті виходить 3 частини, тобто $N=3$, тоді

$$D = \frac{\log 3}{\log 2} \approx 1,58$$

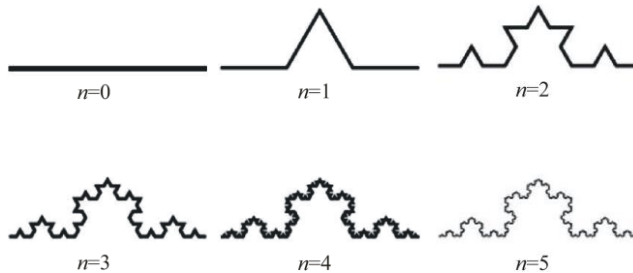


Рис. 6. Побудова тріадної кривої Коха

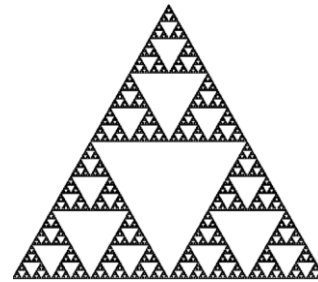


Рис. 7. Трикутник Серпінського

Висновки

В роботі розглянута математична модель формування зображень в радіолокаторах із синтезованою апертурою. Сформована модель сцени, одержуваної в РСА, являє собою простір двовимірних функцій зворотного розсіювання, однозначно відповідних простору об'єктів, розташованих на поверхні, яка знімається. Здійснюється визначення питомої ефективної площі розсіювання та комплексної функції відбивання. Розглянуто питання впливу поляризації на обробку радіолокаційних зображень. В моделі формування зображень враховано додаванням адитивного випадкового шуму та мультиплікативної завади у вигляді спекл-шуму, який в свою чергу, може використовуватися для ідентифікації просторово-розподілених об'єктів і оцінювання характеристик РСА. Побудована математична модель фрактального методу оцінки радіолокаційних зображень з використанням функції спостережуваного сигналу, функції випадкового шуму, текстурної функції цілі та текстурної функції фону. Встановлено, що визначення фрактальних властивостей областей і об'єктів, присутніх на зображеннях, одержуваних в системах космічного спостереження, можливо тільки під час обчислення локальної фрактальної розмірності.

Література

1. Гонсалес Р. С. Цифровая обработка изображений / Р. С. Гонсалес, Р. Е. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
2. Верба В. С. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. Научная серия «Системы мониторинга воздушного космического пространства и земной поверхности» / В. С. Верба, Л. Б. Неронский, И. Г. Осипов, В. Э. Турук. – М. : Радиотехника, 2010. – 680 с.
3. Неронский Л. Б. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны : учеб. пособие / Л. Б. Неронский, В. Ф. Михайлов, И. В. Брагин. – СПб, 1999. – Ч. 2. – 220 с.

References

1. Gonsales R. S. Cifrovaya obrabotka izobrazhenij / R. S. Gonsales, R. E. Vuds. – М. : Tehnosfera, 2005. – 1072 s.
2. Verba V. S. Radiolokacionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya. Nauchnaya seriya «Sistemy monitoringa vozdušnogo kosmicheskogo prostranstva i zemnoj poverhnosti» / V. S. Verba, L. B. Neronskij, I. G. Osipov, V. E. Turuk. – М. : Radiotekhnika, 2010. – 680 s.
3. Neronskij L. B. Mikrovolnovaya apparatura distancionnogo zondirovaniya poverhnosti Zemli i atmosfery. Radiolokatory s sintezirovannoj aperturoj anteny : ucheb. posobie / L. B. Neronskij, V. F. Mihajlov, I. V. Bragin. – SPb, 1999. – Ch. 2. – 220 s.

Рецензія/Peer review : 24.11.2019 р.

Надрукована/Printed : 02.01.2020

Стаття прорецензована редакційною колегією