

УДК 621.396.9

doi: 10.32620/aktt.2024.5.08

В. В. ПАВЛІКОВ¹, П. В. ПОЗДНЯКОВ², Е. О. ЦЕРНЕ¹, Д. В. КОЛЕСНИКОВ¹,
М. С. ПЕРЕТЯТЬКО¹, П. П. МАЛАШТА¹

¹ Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

² Державний науково-дослідний інститут технологій кібербезпеки
та захисту інформації Державної служби спеціального зв'язку
та захисту інформації України, Київ, Україна

ТЕОРІЯ ФАНТОМІЗАЦІЇ РАДІОЗОБРАЖЕНЬ РСА: БАЗОВІ ВІДОМОСТІ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗМІРІВ ДІЛЯНКИ ФАНТОМІЗАЦІЇ

Предметом вивчення в статті є створення основ теорії формування хибних елементів на зображеннях систем аерокосмічного радіобачення шляхом внесення відсутніх на опроміненій з аерокосмічного носія підстильної поверхні інформаційних ознак об'єктів у просторово-часові траєкторні сигнали. **Метою** є обґрунтування розмірів ділянок підстильної поверхні, на якій можна імітувати об'єкти при різних способах огляду досліджуваної області з аерокосмічного носія радара. **Завдання:** розробити геометрію задачі, яка відобразить взаємодію між радаром з синтезуванням апертури антени (РСА) та радаром фантомізації (ФР); розробити загальну структурну схему ФР; визначити основні параметри, врахування яких дозволить планувати сеанс «взаємодії» між РСА та ФР; визначити розміри ділянок підстильної, на яких можливо забезпечити фантомізацію радіозображень, формованих РСА при різних способах огляду. Використовуваними **методами** є: математичний та функціональний аналіз; методи навігації та дистанційного зондування. Отримані такі **результати**. Визначено геометрію задачі взаємодії між РСА та ФР, яка дозволила розрахувати час взаємодії між системами та встановити закон зміни відстані між ними при будь-якому положенні РСА на орбіті. Досліджено вплив взаємоположення розглянутих систем на очікувану форму зондуючого сигналу РСА та розмір ділянки, на якій можливо вирішити задачу фантомізації радіозображення. Наведено приклади розрахунків зазначених параметрів при різних типах огляду земної поверхні радаром з аерокосмічного носія. **Висновки.** Стаття узагальнює та розвиває поточні напрацювання в області фантомізації радіозображень, побудованих за допомогою РСА. Отримані результати, що встановлюють залежність між геометрією фантомізації та такими параметрами, як потенційний та реальний час взаємодії між системами, обвідною пачки прийнятих радіоімпульсів та кількістю смуг розділення за дальністю, є важливими для подальших досліджень у даному напрямку, які наразі доцільно зосередити на вирішенні задачі оптимізації окремих блоків радара фантомізації та визначенню умов планування процесів ін'єктування об'єктів у сигнал передавача та у радіозображення, формоване РСА.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі; фантомізація радіозображень; формування радіозображень.

Вступ

Сучасний стан. Радари дистанційного зондування Землі забезпечують всепогодне отримання інформації про стан підстильної поверхні великих площ з високою просторовою розрізнявальною здатністю [1]. Інформація, отримана такими системами (переважно станціями з синтезуванням апертури антени (РСА) [2, 3]), використовуються у задачах землевпорядкування, вивчення стану лісів, запасу корисних копалин, обсягів водних басейнів, вивчення поведінки русел рік та ін. Але у деяких випадках

виникає необхідність щодо запобіганню можливості отримання точної інформації супутникам з РСА про об'єкти, важливі для забезпечення функціонування держави – об'єкти критичної інфраструктури. Особливо це стало актуальним коли значно розвинулися не тільки принципи побудови систем радіобачення, але й системи вторинного оброблення зображень [4, 5]. Відповідно, виникає потреба у проектуванні та розробленні систем запобігання отриманню достовірної інформації у радіодіапазоні на певних ділянках поверхні Землі.



Слід зазначити, що такі задачі (задачі змінювання достовірних відомостей на зображеннях) вирішуються у оптичному [6, 7], інфрачервоному [8] і радіо [9] діапазонах хвиль. Проте вказані методи змінювання інформації на зображеннях вирішуються розміщенням об'єктів на певних ділянках підстильної поверхні.

У той же час, як уперше запропоновано у [10, 11], задачу коригування радіозображень можна вирішити за допомогою підмішування у відбиті радіосигнали РСА радіосигналів з необхідною інформацією про об'єкти на заданій ділянці, які фактично відсутні на цій місцевості. Такі сигнали, після їхнього оброблення у радіосистемах з синтезуванням апертури на аерокосмічних носіях, призведуть до появи «фантомних» об'єктів на радіозображеннях. Відповідно теорію, яка описуватиме синтез радіотехнічних систем, що формуватимуть вказані сигнали, запропоновано [10] визначити як теорію фантомізації радіозображень, а системи – радарми фантомізації (ФР).

Мотивація. Основна ідея формування теорії полягає у тому, що ФР дозволить покрити певну ділянку простору зображеннями об'єктів, які відсутні у даний час на заданій місцевості. Безумовно, для формування радіозображень об'єктів, які не існують в даний момент часу на заданій території, можна застосувати системи кутикових відбивачів, розміщені у просторі за певними закономірностями. На практиці такий підхід доцільно реалізувати тоді, коли імітувати потрібно невелику кількість об'єктів. Для створення фантомів на відносно великих територіях (з великою кількістю техніки або споруд), цей підхід спряжений з використанням значного часу на розгортання та великої кількості систем кутикових відбивачів. Значні ускладнення при цьому виникнуть при необхідності імітувати рух транспортних засобів на радіозображеннях.

Тому теорія фантомізації має вирішити наявне протиріччя – з одного боку є необхідність створення систем запобігання отриманню достовірної інформації шляхом імітування на великих територіях значної кількості об'єктів (техніки, споруд) у радіодіапазоні, а з іншого – відсутня теорія синтезу методів і систем фантомізації зображень без використання фізичних об'єктів-імітаторів.

У [10, 11] сформульовано об'єкт і предмет дослідження. Об'єкт дослідження – процес внесення хибних елементів (фантомів) у радіозображення, які формуються на борту аерокосмічних радіосистем дистанційного моніторингу, зокрема, радарам з синтезуванням апертури антени як ключовим системам радіобачення. Предмет дослідження – створення основ теорії формування хибних елементів на зображеннях систем аерокосмічного радіобачення шляхом вне-

сення відсутніх на опроміненій з аерокосмічного носія підстильної поверхні інформаційних ознак об'єктів у просторово-часові траєкторні сигнали.

Стаття продовжує дослідження [10, 11], містить базову інформацію про системи фантомізації радіозображень, а також вирішує задачу обґрунтування розмірів ділянок підстильної поверхні, на якій можна імітувати об'єкти. Розміри таких ділянок визначаються відповідно до способу огляду поверхні з аерокосмічних носіїв – бічний, передньо-бічний або прожекторний та залежить від взаємного розташування системи «РСА-ФР».

1. Базові визначення і співвідношення

Розглянемо геометрію задачі взаємодії у системі «РСА-ФР», показано на рис. 1.

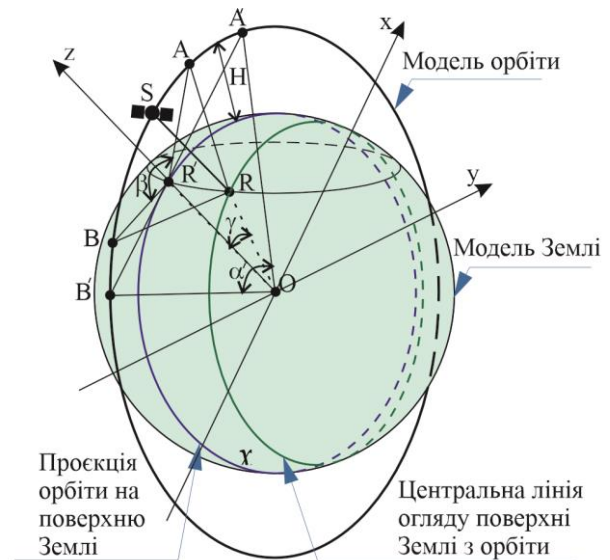


Рис. 1. Геометрія до розрахунку дальності між РСА і ФР

На рис. 1 введено наступні позначення: R – місце розміщення ФР на підстильній поверхні, S – поточна позиція РСА (на борту супутника), H – висота орбіти супутника, O – центр Землі, який одночасно є початком декартової 3D системи координат $Oxyz$, відстань OR рівна радіусу Землі, A і B – точки початку і кінця взаємодії системи «РСА-ФР» (при граничному зміщенні цих точок у A' і B' на горизонті видимості супутника з т. R, вони визначатимуть точки початку і кінця «потенційної взаємодії» системи «РСА-ФР»), $\angle\alpha' = \angle A'OB'$, $\angle\beta = \angle AR'B$, де – перпендикуляр, опущений з т. R на проекцію орбіти на підстильну поверхню), $\angle\alpha = \angle AOB$, $\angle A'RO = \angle B'RO = 90^\circ$, $\angle\gamma = \angle ROR'$, вісь Oz проведена через т. R', $OR=OR'$.

Виходячи з геометрії (див. рис. 1) визначено базові структурну схему, параметри і характеристики необхідні для закладання основ теорії проєктування (у сенсі синтезу алгоритмів оброблення сигналів, розроблення структурних схем, планування сеансів «взаємодії», формування ін'єкції інформації про об'єкти – фантоми у сигнали, тощо) радарів фантомізації.

Основні елементи структурної схеми ФР [10, 11] показані на рис. 2.

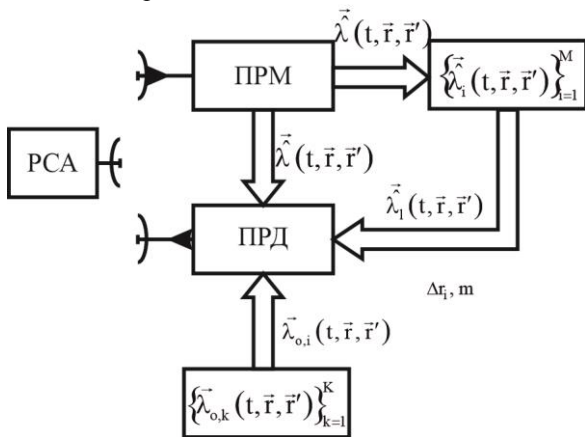


Рис. 2. Основні елементи структурної схеми ФР

На рис. 2 використано наступні позначення: ПСА – бортова радіолокаційна станція з синтезуванням апертури антени, яка формує радіолокаційне зображення підстильної поверхні, ПРМ – приймач сигналу, ПРД – передавач сигналу, $\vec{\lambda}(t, \vec{r}')$ – вектор істинних значень форми і параметрів сигналу, параметрів руху супутника, як функція часу t та просторових координат \vec{r}' , $\vec{\lambda}(t, \vec{r}, \vec{r}')$ – вектор оцінок форми і параметрів сигналу, параметрів руху супутника, як функція часу t та просторових координат \vec{r} і \vec{r}' , $\vec{\lambda}_i(t, \vec{r}, \vec{r}')$ – вектор оцінок форми і параметрів сигналу, параметрів руху 1-го (першого) супутника з урахуванням власного положення радару фантомізації, $\{\vec{\lambda}_i(t, \vec{r}, \vec{r}')\}_{i=1}^M$ – блок пам'яті, який зберігає інформацію щодо векторів оцінок форми і параметрів сигналів, параметрів руху i -го супутника з урахуванням власного положення ФР, $\vec{\lambda}_{o,i}(t, \vec{r}, \vec{r}')$ – вектор ознак об'єктів, що мають бути внесені у параметри сигналу ФР, $\{\vec{\lambda}_{o,k}(t, \vec{r}, \vec{r}')\}_{k=1}^K$ – банк ознак об'єктів, що мають бути внесені у параметри сигналу ФР.

За наявності апріорних відомостей про рух супутника і характеристики його ПСА у блоці пам'яті $\{\vec{\lambda}_i(t, \vec{r}, \vec{r}')\}_{i=1}^M$ їх доцільно використовувати (показано Р' зв'язок вказаного блоку і передавача ПРД).

Геометрія задачі (див. рис. 1) і основні елементи структурної схеми (див. рис. 2) дозволяють визначити основні параметри та характеристики, необхідні для планування сеансу «взаємодії» у системі «РСА-ФР». До таких параметрів віднесемо наступні:

- час потенційної взаємодії системи «РСА-ФР»;
- час реальної взаємодії системи «РСА-ФР»;
- закон зміни відстані системи «РСА-ФР»;
- очікувана форма сигналу РСА у контексті геометрії формування радіозображення.

Нижче наведено вирази для оцінювання вказаних вище параметрів.

Час потенційної взаємодії системи «РСА-ФР» – максимальний час можливої взаємодії у системі «РСА-ФР», який визначається потенційною видимістю з позиції розміщення ФР станції РСА (від горизонту у т. А' до горизонту у т. В'):

$$t_{\text{pot}} = 2 \frac{(OR + H)}{V} \arccos\left(\frac{OR}{OR + H}\right), \quad (1)$$

де V – швидкість носія РСА (супутника по орбіті).

Час реальної взаємодії системи «РСА-ФР» (залежить від типу огляду, який реалізує РСА, і значно менший потенційного часу взаємодії):

$$t_{\text{real}} = \frac{(OR + H)}{V} \left(\beta - 2 \arcsin\left(\frac{OR}{OR + H} \sin\left(\pi - \frac{\beta}{2}\right)\right) \right). \quad (2)$$

Формула (2) пов'язує реально очікуваний час «взаємодії» системи «РСА-ФР» з висотою орбіти супутника, його швидкістю, режимом огляду РСА («прожекторний» чи «бічного огляду»). У випадку, коли РСА використовує режим «бічного огляду» слід вважати $\angle\beta = \Delta\theta$, де $\Delta\theta$ – ширина променя діаграми спрямованості РСА (без урахування синтезування апертури антени).

Приклад. Нехай РСА працює у прожекторному режимі і $\angle\beta = 90^\circ$, $H = 400$ [км], $V = 7,91$ [км/с], $OR = 6371$ [км]. За таких вихідних параметрів час реальної «взаємодії» відповідно до (2) становить $t_{\text{real}} \approx 98,4$ [с]. Для бічного огляду $\angle\beta = \Delta\theta = 0,6^\circ$ і за умови, що інші параметри з попереднього прикладу залишилися без змін, час реальної взаємодії становить усього $t_{\text{real}} \approx 0,5$ [с].

З прикладу слідує, що час реальної взаємодії може бути малим і тому ФР треба розгортати так, щоб забезпечити гарантоване втручання у роботу РСА, зокрема, мати можливість працювати на випередження у випадках, коли РСА працює у режимі «бічного» огляду.

Вираз для визначення відстані між РСА і ФР (наводиться для використання кругової орбіти). Нехай положення ФР на поверхні Землі визначається координатами (X_R, Y_R, Z_R) . Тоді відстань між РСА і ФР визначимо наступним чином:

$$\Delta Q = \sqrt{(\sqrt{(OR' + H)^2 - z^2} - X_R)^2 + Y_R^2 + (z - Z_R)^2} \quad (3)$$

Отриманий вираз (3) є загальним і описує відстань між ФР і РСА, яка знаходиться у будь-якому місці на своїй орбіті (за умови, що орбіта кругова, що на практиці часто виконується для орбіт супутників з РСА).

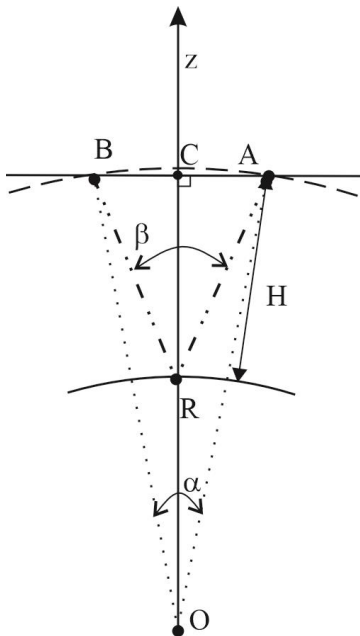


Рис. 3. Геометрія до визначення меж змін параметру z у (4) (позначення співпадають з позначеннями на рис. 1)

Приклад. Нехай $H = 400$ [км], РСА реалізує прожекторний огляд і $\angle\beta = 90^\circ$, $V = 7,91$ [км/с], координати розміщення ФР $(0, 100, OR')$. За таких умов знайдемо межі зміни параметру z . Для цього розглянемо рис. 3. Із прямокутного $\triangle AOC$ знайдемо

$$OC = AO \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = (OR' + H) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4)$$

Тобто параметр z при русі супутника з т. А у т. В змінюється у межах $z \in [OC, OR' + H]$.

На рис. 4 показано графік зміни відстані (4) при прольоті супутника з т. А у т. В, як функцію часу

«взаємодії» (вище було розраховано час взаємодії $t_{real} \approx 98,4$ [с]).

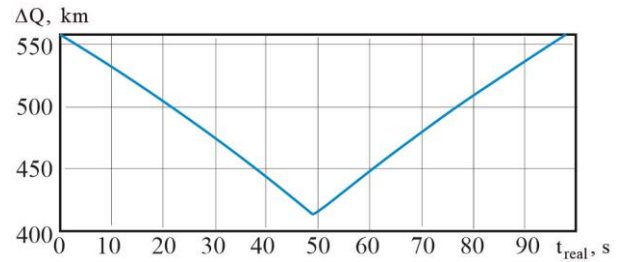


Рис. 4. Зміна відстані $\Delta Q(z)$ у системі «РСА-ФР» при прожекторному огляді в межах $\angle\beta = 90^\circ$ і $H = 400$ [км]

Очікувана форма сигналу РСА. У якості сигналу зондування бортової РСА зазвичай використовують когерентну пачку радіоімпульсів (наприклад, з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ)). Комплексну обвідну пачки радіоімпульсів

$$\dot{A}(t) = A_0 \sum_{i=0}^{N-1} I_i S(t - iT_r, \tau) \exp(j\pi\alpha(t - iT_r)^2), \quad (5)$$

де A_0 – амплітуда радіоімпульсів у пачці, N – кількість радіоімпульсів у пачці, I_n – знакова функція, яка при використанні ЛЧМ імпульсів з фазовою маніпуляцією в пачці може визначати зміну фази в межах імпульсу на протилежну шляхом використання «1» або «-1», T_r – період слідування радіоімпульсів у пачці, $\alpha = \frac{\Delta F}{\tau}$, ΔF – девіація частоти ЛЧМ імпульсу, $S(t - iT_r, \tau)$ – зрізаюча функція, яка описує або обвідну одного радіоімпульса у пачці, яка зазвичай є рівномірним відеоімпульсом, протяжністю τ з періодом повторення імпульсів $T_r > \tau$, тобто

$$S(t - iT_r, \tau) = \begin{cases} 1 & 0 \leq (t - iT_r) \leq \tau; \\ 0 & (t - iT_r) < 0, (t - iT_r) > \tau, \end{cases}$$

або описує обвідну M -послідовності.

Для вирішення задачі оцінювання параметрів зондуючого сигналу бортової РСА необхідно орієнтовно розуміти протяжність пачки радіоімпульсів та кількість N імпульсів у пачці.

Позначимо через q_{min} і q_{max} кути, які визначають мінімальний і максимальний кут опромінення підстильної поверхні і відповідають дальностям R_{min} і R_{max} .

Максимальну протяжність пачки радіоімпульсів

(довжину М-послідовності) знайдемо, орієнтуючись на те, що з початком прийому відбитих підстильною поверхнею імпульсів приймач має бути закритим (не випромінювати радіоімпульси). Тому, час, необхідний для проходження радіоімпульсу подвійної мінімальної відстані R_{\min} і визначає максимальну протяжність радіоімпульсу або пачки радіоімпульсів:

$$t_b = \frac{2R_{\min}}{c} = \frac{2H}{c \cdot \cos(q_{\min})}, \quad (6)$$

де c – швидкість світла.

Період слідування пачок радіоімпульсів визначається відповідно часом, необхідним для проходження подвійної максимальної дальності останнім імпульсом у пачці (протяжністю t_b), тому знайдемо мінімальний час (період) повторення пачок імпульсів наступним чином:

$$T_b = \frac{2R_{\max}}{c} + t_b = \frac{2H(\cos(q_{\min}) + \cos(q_{\max}))}{c \cdot \cos(q_{\max}) \cos(q_{\min})}. \quad (7)$$

Скважність імпульсів у пачці визначається спроможністю радіоелементної бази. Можливе значення скважності для таких задач становить $Q=4$. Кількість імпульсів у пачці визначається як

$$t_b = (N-1)T_r + \tau, \quad (8)$$

або з урахуванням (6)

$$\frac{2H}{c \cdot \cos(q_{\min})} = (N-1)T_r + \tau$$

звідки знайдемо кількість імпульсів у такій пачці

$$N = \left\lfloor \frac{2H}{T_r \cdot c \cdot \cos(q_{\min})} - \frac{\tau}{T_r} + 1 \right\rfloor, \quad (9)$$

де $\lfloor \cdot \rfloor$ – операторні дужки округлення у меншу сторону.

Також у такій розглядуваній задачі доцільно говорити про скважність пачок зонduючого сигналу, яку визначимо наступним чином:

$$Q_b = \frac{T_b}{t_b} = \frac{R_{\max} + R_{\min}}{R_{\min}} = \frac{R_{\max}}{R_{\min}} + 1 = \frac{\cos(q_{\min})}{\cos(q_{\max})} + 1. \quad (10)$$

Отримані апріорні відомості про форму обвідної

пачок радіоімпульсів дозволять у майбутньому спростити задачу синтезу алгоритму оцінювання форми сигналу. Це спрощення стане можливим за рахунок переходу від диференціювання по формі сигналу до оцінювання параметрів сигналу і пачок, розумні межі яких можна оцінити відповідно до отриманих формул (6)-(10).

Приклад. Для розуміння порядку величин, які розраховуються виразами (6) - (10), розрахуємо t_b , T_b , N і Q_b для $H=400$ [км], $q_{\min} = 20^\circ$, $q_{\max} = 50^\circ$, $\tau = 3$ [мкс], $T_r = Q\tau = 4\tau$ [мкс]. Використовуючи (6)-(10) отримуємо $t_b = 2,8$ [мс], $T_b = 7$ [мс], $N = 237$, $Q_b \approx 2,46$.

2. Просторова розрізнявальна здатність. Визначення ділянки з можливою фантомізацією радіозображення

Розглянемо декілька геометрій, відмінність між якими полягає у способі огляду.

Бічний огляд поверхні з РСА.

На рис. 5 показано проєкцію головної пелюстки діаграми спрямованості РСА на підстильну поверхню при спостереженні у строго бічному напрямку і схематично зображені лінії рівних дальностей з відстанями по горизонталі (розрізнявальна здатність по горизонталі) між ними Δr_i , $i=1..M$. На рис. 5 позначено H – висота орбіти РСА, L_x – довжина вздовжфюзеляжної антени РСА, ΔR_s – розрізнявальна здатність РСА за похилою дальністю (визначається формою сигналу зондування), Δr_{\min} – відстань між напрямком в надир від проєкції положення фазового центра антени РСА до початку зони огляду, яка визначається кутом q_{\min} . Кут q_{\max} обмежує межу огляду дальністю R_{\max} .

Знайдемо закон зміни горизонтальної розрізнявальної здатності та розахуємо кількість смуг дальності, які укладаються у межах ділянки підстильної поверхні, опроміненої головною пелюсткою діаграми спрямованості РСА.

Для цього запишемо рівність

$$(R_{\min} + \Delta R_s)^2 = H^2 + (\Delta r_{\min} + \Delta r_i)^2, \quad (11)$$

з якої розмір першої ділянки горизонтальної розрізнявальної здатності

$$\Delta r_i = \sqrt{(R_{\min} + \Delta R_s)^2 - H^2} - \Delta r_{\min}, \quad (12)$$

де $R_{\min} = \frac{H}{\cos(q_{\min})}$, $\Delta r_{\min} = H \tan(q_{\min})$.

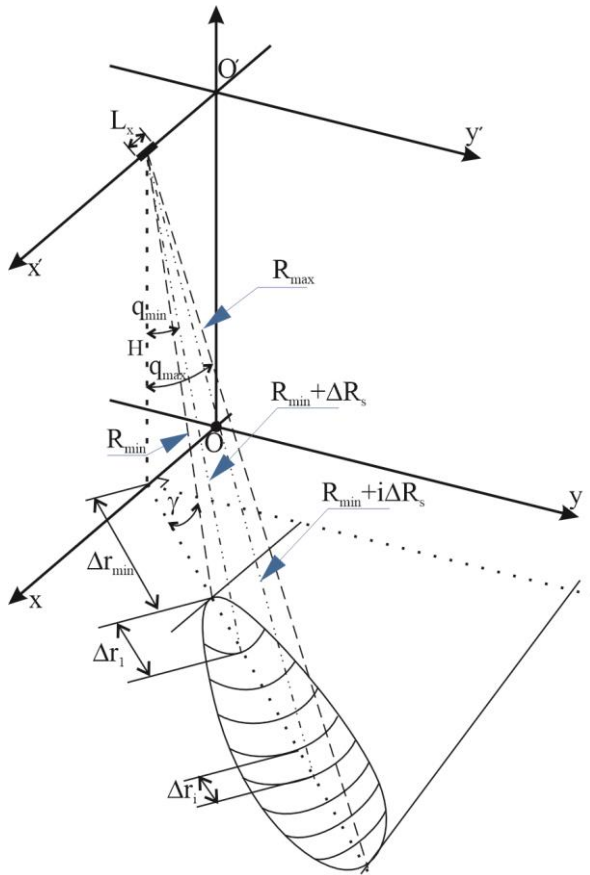


Рис. 5. Геометрія задачі розрахунку кількості і розміру смуг розрізнення по дальності, які вкладаються у ділянку опромінення підстильної поверхні головною пелюсткою діаграми спрямованості антени РСА при бічному огляді

Аналогічно розраховуючи розміри ділянок горизонтальної розрізнювальної здатності по смугам дальності отримаємо наступний вираз для визначення розміру довільної розрізнювальної ділянки

$$\Delta r_i = \sqrt{(R_{\min} + i\Delta R_s)^2 - H^2} - \Delta r_{\min} - \Delta r_1 - \dots - \Delta r_{i-1}. \quad (13)$$

Вочевидь, що кількість ділянок розрізнення обмежується максимальним кутом опромінення головною пелюсткою підстильної поверхні. Тоді запишемо обмеження, з якого визначається кількість M ділянок розрізнення на підстильній поверхні

$$\sum_{i=1}^M \Delta r_i \leq H \frac{\cos(q_{\max})}{\cos(\alpha_{\max})} - \Delta r_{\min}. \quad (14)$$

Приклад. Нехай висота польоту супутника $H = 400$ [км], а РСА реалізує бічний огляд в межах кутів $q_{\min} = 25^\circ$ $q_{\max} = 45^\circ$, а просторове розрізнення по дальності $\Delta R_s = 10$ [м].

Розрахунки горизонтальної розрізнювальної здатності по дальності показані на рис. 6. У розглядуваному випадку $M = 12435$ відліків горизонтальної дальності.

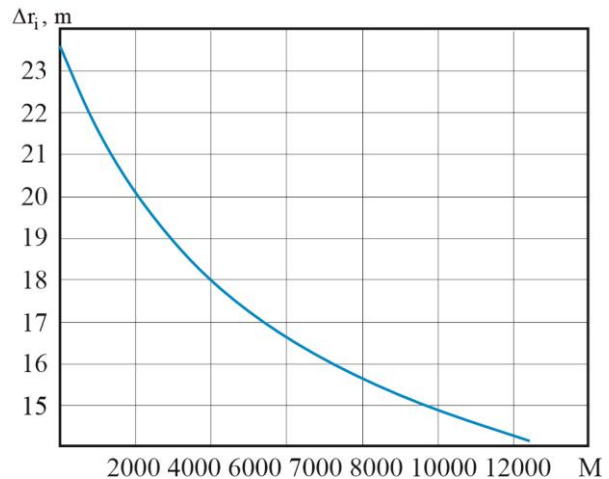


Рис. 6. Залежність горизонтальної розрізнювальної здатності по дальності від номеру і ділянки розрізнення

Передньобічний огляд поверхні з РСА.

Передньобічний огляд не суттєво відрізняється від бічного. Промінь діаграми спрямованості фіксований під кутом γ відносно нормалі до напрямку руху. Формули отримають певну корекцію, яка врахує кут відхилення γ від прямого кута спостереження у бік.

Розглянемо рис. 7, де зображена геометрія дистанційного зондування з РСА при використанні передньобічного огляду поверхні. Усі позначки на рис. 7 такі ж як і на рис. 5.

Слід відзначити, що лінії рівних дальностей на рис. 7 нахилені до напрямку нормалі і це призводить до зменшення часу спостереження окремої ділянки на підстильній поверхні. Проте це зменшення можна частково скомпенсувати методами компенсації «міграції дальності».

У розглядуваній геометрії (див. рис. 7) формули (11) - (14) залишаються без змін. Змінюються лише Δr_{\min} , R_{\min} і R_{\max} наступним чином:

$$\Delta r_{\min} = \frac{H \tan(q_{\min})}{\cos(\gamma)}, \quad (15.a)$$

$$R_{\min} = \sqrt{H^2 + \Delta r_{\min}^2} = H \sqrt{1 + \frac{\tan^2(q_{\min})}{\cos^2(\gamma)}} q_{\max}, \quad (15.6)$$

$$R_{\max} = H \sqrt{1 + \frac{\tan^2(q_{\max})}{\cos^2(\gamma)}}. \quad (15.в)$$

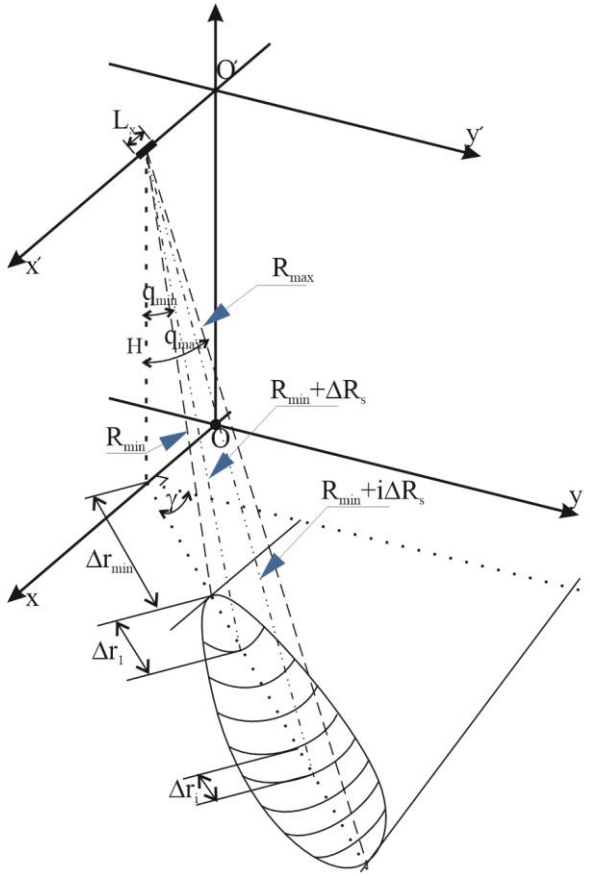


Рис. 7. Геометрія задачі розрахунку кількості і розміру смуг розрізнення по дальності, які вкладаються у ділянку опромінення підстильної поверхні головною пелюсткою діаграми спрямованості антени РСА при бічному огляді

Правильність формул (15) легко перевірити, підставляючи $\gamma = 0$ і враховуючи, що $1 + \tan^2(x) = \frac{1}{\cos^2(x)}$.

Приклад. Розглянемо попередній приклад, де висота польоту супутника $H = 400$ [км], а РСА реалізує передньобічний огляд для різних кутів $\gamma = [10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ]$ (для порівняння також наведено випадок бічного огляду $\gamma = 0^\circ$) в межах кутів $q_{\min} = 25^\circ$ $q_{\max} = 45^\circ$, а просторове розрізнення по дальності $\Delta R_s = 10$ [м]. Розрахунки горизонтальної розрізнювальної здатності по дальності показані на

рис. 8. У розглядуваних випадках при збільшенні кута γ кількість відліків і горизонтальна дальність збільшується, а розрізнювальна здатність по горизонтальній дальності зростає (зменшується розмір ділянок).

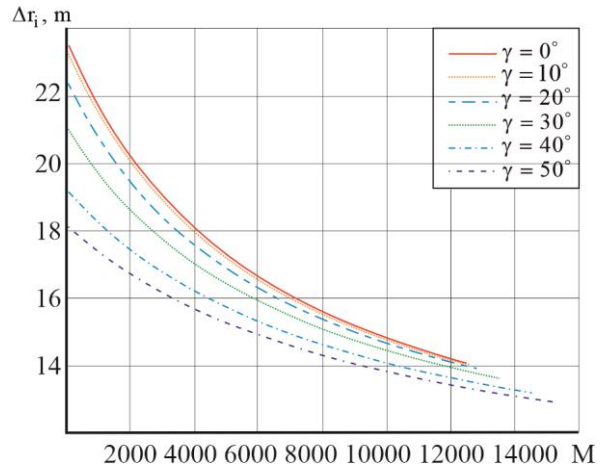


Рис. 8. Залежність горизонтальної розрізнювальної здатності по дальності від номеру і ділянки розрізнення при $\gamma = [10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ]$

Таким чином, при повороті діаграми спрямованості антени відносно нормалі на кут γ розміри горизонтальних розрізнювальних ділянок по дальності зменшуються (розрізнення збільшується), а їхня кількість у межах смуги діаграми спрямованості збільшується. Збільшення розрізнювальної здатності – це зрозумілий фізичний ефект, пов'язаний з тим, що лінії рівної дальності, які описуються проекціями сфер, радіуси яких збільшуються на ΔR_s , на підстильну поверхню при збільшенні радіусу розміщуються ближче одна до одної.

Таким чином, при повороті діаграми спрямованості антени відносно нормалі на кут γ розміри горизонтальних розрізнювальних ділянок по дальності зменшуються (розрізнення збільшується), а їхня кількість у межах смуги діаграми спрямованості збільшується. Збільшення розрізнювальної здатності – це зрозумілий фізичний ефект, пов'язаний з тим, що лінії рівної дальності, які описуються проекціями сфер, радіуси яких збільшуються на ΔR_s , на підстильну поверхню при збільшенні радіусу розміщуються ближче одна до одної.

Не зважаючи на збільшення розрізнювальної здатності по горизонтальній дальності на практиці не доцільно обирати досить великі значення кута γ , адже час спостереження за елементарною ділянкою підстильної поверхні в межах смуг дальності зменшується.

«Прожекторний» огляд поверхні з РСА.

«Прожекторний» огляд поверхні має значну особливість, пов'язану зі стеженням за певною ділянкою поверхні впродовж деякого часу польоту. Промінь діаграми направленості при цьому змінює свій напрямок, як це показано на рис. 9, фіксуючи п'ятно діаграми спрямованості на заданій ділянці підстильної поверхні. При цьому в межах цієї опроміненої ділянки буде змінюватися кількість смуг дальності, що суттєво ускладнює алгоритм оброблення сигналів (потрібно враховувати ефекти «міграції» дальності). Проте у деяких розумних межах стеження за визначеною ділянкою на підстильній поверхні може використовуватися без значного ускладнення алгоритму оброблення сигналів.

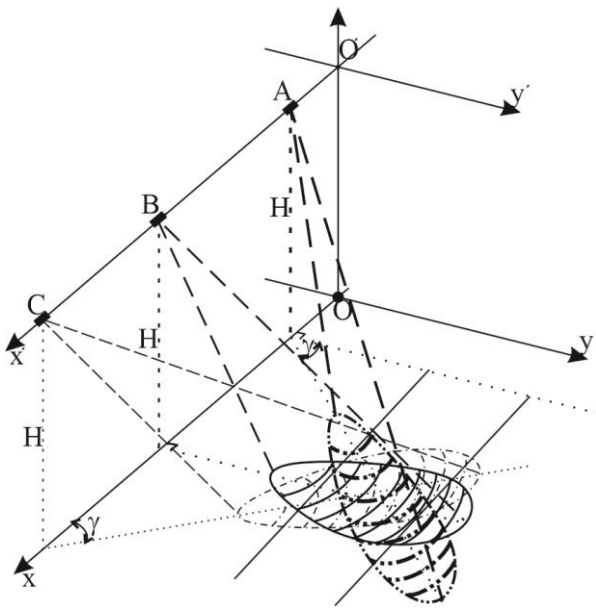


Рис. 9. Пояснення щодо опромінення ділянки при «прожекторному» огляді

З аналізу рис. 9 випливає, що сформувати зображення ділянки підстильної поверхні можна у меншому діапазоні кутів спостереження ніж визначені φ_{\min} і φ_{\max} , що пов'язано з наступним. Для накопичення траєкторного сигналу на шляху польоту з урахуванням стеження за визначеною ділянкою необхідне неперервне перебування цієї ділянки у межах діаграми спрямованості (інакше треба значно ускладнювати алгоритм оброблення сигналів). Цей принцип неперервності порушується на початку і у кінці зони опромінення (див рис. 9) і витримується у центральній частині зони огляду (swath width), де діаграми спрямованості антен заморожені у трьох, показаних на рис. 9, позиціях перетинаються. Цим діаграмам спрямованості відповідають розміщення антен у позиціях А, В, С (див. рис. 9).

Визначити у цьому випадку кількість смуг дальності, по яким можна сформувати радіозображення досить важко. Їхня кількість буде залежати як від допустимого для розробників ускладнення алгоритму оброблення сигналів (використання методів усунення «міграції» дальності і інших корекцій сигналів до оброблення), так і від сектору спостереження за ділянкою. Чим більшим буде кут спостереження за ділянкою, тим меншою буде розмір цієї ділянки і тому треба обирати розумний компроміс при реалізації режиму «прожекторного» огляду з РСА.

Визначення обмежень на розміри ділянки, на якій можна забезпечити фантомне заміщення реальних радіозображень.

Розглянутий матеріал щодо розрахунків горизонтальної розрізняльної здатності важливий для формування сигналу ін'єкції об'єктів у зображення бортових РСА. Для точного розрахунку кількості смуг дальності на підстильній поверхні треба знати розрізняльну здатність за дальністю $\Delta R_s = 10$ та форму діаграми спрямованості РСА (принаймні кути φ_{\min} , φ_{\max}), траєкторію руху РСА. Все це можна з достатньою точністю знати або попередньо оцінити.

З огляду на розташування ФР можна розглядати два основних типи розміщення фантомних об'єктів на радіозображеннях, побудованих РСА.

Перший тип – приймач і передавач ФР розміщені у одному місці.

Цей випадок доцільно застосовувати коли априорі відомо, що траєкторія руху РСА є такою, що п'ятно діаграми спрямованості антени РСА на підстильній поверхні буде проходити по місцю розміщення ФР. У такому випадку імітувати об'єкти на радіозображенні можна як у межах декількох смуг дальності, так і у межах підстильної поверхні, яка займає:

- декілька площ розміром з зону опромінення діаграмою спрямованості антени РСА у випадку використання бічного і передньобічного огляду;
- меншу частину зони опромінення (орієнтовно 1/3 або, навіть, і менше) у випадку використання «прожекторного» огляду.

Для пояснення розглянемо рис. 10. На рис. 10 показана геометрія «взаємодії» у системі «РСА-ФР» при використанні передньобічного огляду поверхні з РСА. Упродовж руху РСА по орбіті з деякою швидкістю \vec{V} змінюється взаємне розміщення РСА і ФР. Остання зміщується відносно діаграми спрямованості з місця розміщення А у місце В. Протягом часу цього переміщення можна розглядати 2 варіанти взаємодії:

- якщо використовується неслідкуюча антенна система, то покрити можна лише в межах п'ятна опромінення між точками А і В на рис. 10;

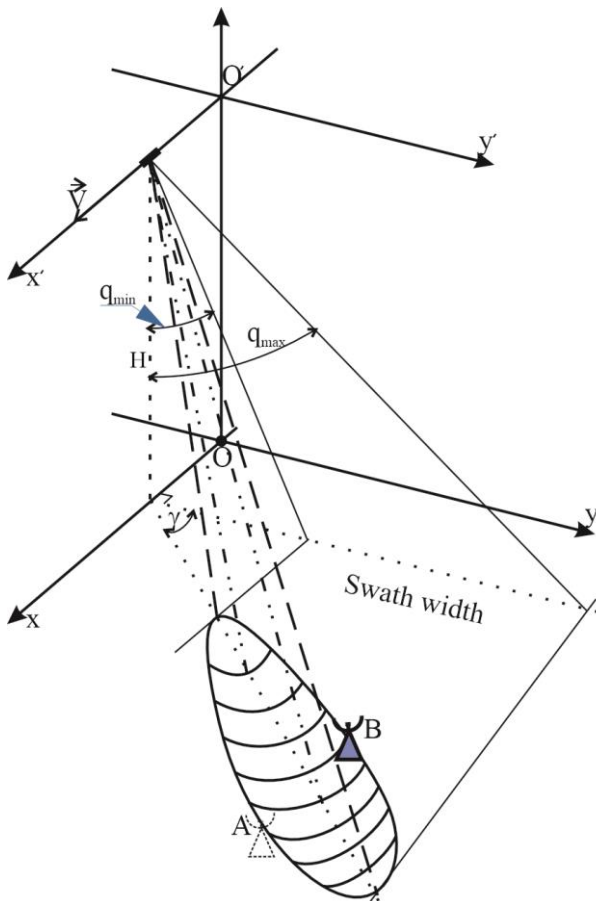


Рис. 10. Геометрія «взаємодії» у системі «РСА-ФР» при використанні передньобічного огляду поверхні з РСА

- якщо використовується слідкуюча антенна система, то з моменту, коли «взаємодія» між РСА і ФР відбулася (див. т. А на рис. 10) можна деякий час супроводжувати РСА підмішуючи сигнал ін'єкції з елементами потрібних об'єктів.

Тобто, при бічному і передньобічному огляді можна вважати, що сформувати фантомний об'єкт на зображенні можна в межах наступних розмірів:

- мінімальний елемент інжектваного фантому – ділянка розрізнення по горизонтальній дальності;

- максимальний елемент інжектваного фантому при використанні неслідкуючої антенної системи у ФР – розмір опроміненої ділянки підстильної поверхні (між А і В на рис. 10);

- максимальний елемент інжектваного фантому при використанні слідкуючої антенної системи у ФР – декілька розмірів опроміненої ділянки підстильної поверхні (між А і В на рис. 10).

Вочевидь, що при використанні «прожекторного» огляду доцільно використовувати стежачу антенну систему у ФР і буде можливість забезпечити ін'єкування об'єкта на площі від одного

розрізняльного елемента по дальності до розміру області перекриття на підстильній поверхні (див. рис. 8).

Другий тип – приймач і передавач ФР розміщені у різних місцях (просторово рознесені).

У випадку просторового розділення приймача і передавача ФР площу, на якій можна реалізувати ін'єкцію об'єктів на радіозображенні, можна значно розширити. Це досягається за рахунок того, що приймач, який розміщений на відстані від передавача у напрямку, звідки очікується рух РСА, вирішує задачу визначення факту опромінення певної ділянки і передає цю інформацію передавачу, який починає випромінювати сигнали ін'єкції. Завдяки цьому випромінювати сигнали підміни можна триваліший час і, відповідно, сформувати більше об'єктів на більшій площі. При цьому важливо забезпечити динамічне регулювання потужності передавача, яка має компенсувати різницю прийому сигналу по бічним пелюсткам діаграми спрямованості РСА та по головній пелюстці.

Другий тип – приймач і передавач ФР розміщені у різних місцях (просторово рознесені).

У випадку просторового розділення приймача і передавача ФР площу, на якій можна реалізувати ін'єкцію об'єктів на радіозображенні, можна значно розширити. Це досягається за рахунок того, що приймач, який розміщений на відстані від передавача у напрямку, звідки очікується рух РСА, вирішує задачу визначення факту опромінення певної ділянки і передає цю інформацію передавачу, який починає випромінювати сигнали ін'єкції. Завдяки цьому випромінювати сигнали підміни можна триваліший час і, відповідно, сформувати більше об'єктів на більшій площі. При цьому важливо забезпечити динамічне регулювання потужності передавача, яка має компенсувати різницю прийому сигналу по бічним пелюсткам діаграми спрямованості РСА та по головній пелюстці.

3. Результати досліджень

Розглянуто основні елементи структурної схеми та визначено які функції мають виконуватися визначеними блоками. Відмічено, що бажано мати апріорні відомості про сигнал РСА, положення РСА та режим огляду, а також оцінювати ці параметри у процесі роботи радару фантомізації. Поточне оцінювання дозволяє не тільки визначити параметри і характеристики, але і виконати синхронізацію сигналу ін'єкування до сигналів, відбитих підстильною поверхнею. При цьому важливо буде розраховувати і потужність сигналу ін'єкування.

Розглянуто геометрію задачі і розраховано такі параметри як час потенційної взаємодії і час реальної

взаємодії у системі «РСА-ФР», які враховують геометрію задачі і залежать як від взаємного переміщення та геометрії задачі взаємодії. Наведено вираз для зміни дальності між РСА і ФР, який розраховано з огляду на використання характерної для РСА кругової орбіти. Наведено приклади, які дозволяють отримати орієнтовні значення цих параметрів.

Увага приділена визначенню обвідної пачки радіоімпульсів та наведено її основні параметри, які також залежать від геометрії застосування радара фантомізації. Така залежність попередньо закладається інженерами на етапі проектування адже особливості задачі обмежують можливості використання і зондувальних сигналів, і розмірів антени, і ін. основних параметрів та характеристик РСА.

Значна увага приділена визначенню кількості смуг розрізнення за дальністю при використанні різних видів огляду підстильної поверхні – бічного, передньобічного і «прожекторного». Кожен з режимів має свої переваги і недоліки але вони впливають на розміри ділянки, на якій можливо організувати ін'єктування об'єктів для радіозображення. Показано, що залежно від режиму є випадки, коли доцільно радар фантомізації розміщувати у одному місці (на одній позиції), а є – коли доцільно робити рознесенням приймач і передавач переходити до просторово-розподіленого застосування ФР. З огляду отриманих результатів зрозуміло, що розміри ділянок, на яких можлива підміна елементів радіозображення визначається, переважно способом огляду поверхні з РСА.

Висновки

Стаття узагальнює та розвиває напрацювання [10, 11], а саме узагальнюються відомості про структурну схему та базові параметри, необхідні у майбутньому для планування взаємодії у системі «РСА-ФР», та вирішено задачу визначення розмірів ділянок на підстильній поверхні. Показано, що значною мірою розмір ділянки, на якій принципово можливо імітувати наявність об'єктів, залежить від виду огляду підстильної поверхні з РСА.

Таким чином, стаття розвиває теорію фантомізації радіозображень, побудованих за допомогою РСА, та розкриває майже усі питання, пов'язані з геометрією застосування радара фантомізації.

Надалі з урахуванням наведених у статті відомостей потрібно вирішувати задача оптимізації окремих блоків радара фантомізації та визначати умови планування процесів ін'єктування об'єктів у сигнал передавача та у радіозображення, що формується РСА.

Внесок авторів: концептуалізація, методологія – **В. В. Павліков**; постановка завдань, аналіз – **В. В. Павліков, П. В. Поздняков**; моделювання, розробка програмного забезпечення, верифікація – **Е. О. Церне, Д. В. Колесніков, П. П. Малашта**; аналіз результатів, візуалізація – **М. С. Перетятко**; написання – підготовка оригіналу, написання – рецензування та редагування – **В. В. Павліков, Д. В. Колесніков**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження фінансувалося Міністерством освіти і науки України. Номер державної реєстрації проекту “*Теорія радіотехнічних систем формування фантомних радіозображень радаром аерокосмічного базування*” 0124U001015.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією цього рукопису.

Література

1. *Synthesis of multispectral images to high spatial resolution: A critical review of fusion methods based on remote sensing physics [Text] / C. Thomas, T. Ranchin, L. Wald, & J. Chanussot // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2008. – Vol. 46, No. 5. – P. 1301-1312. DOI: 10.1109/TGRS.2007.912448.*
2. *Brenner, A. R. Radar imaging of urban areas by means of very high resolution SAR and interferometric SAR [Text] / A. R. Brenner, & L. Roessing // 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – Barcelona, Spain, 2007. – P. 2689-2693. DOI: 10.1109/IGARSS.2007.4423397.*
3. *Status and future trends of active phased array antennas for AIRBUS space-borne SAR systems [Text] / A. Hees, M. Stangl, G. Adamiuk, S. Riegger, & C. Heer // 2019 IEEE International Symposium on Phased Array System & Technology (PAST). – Waltham, MA,*

USA, 2019. – P. 1-6. DOI: 10.1109/PAST43306.2019.9020960.

4. Post refocusing algorithm for high-resolution spaceborne SAR image processing in large rolling terrain [Text] / Y. Gao, T. Xiang, J. Yang, H. Dang, & X. Tan // 2023 8th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP). – Xi'an, China, 2023. – P. 1256-1260. DOI: 10.1109/ICSP58490.2023.10248841.

5. Land cover semantic segmentation of port area with high-resolution SAR images based on SegNet [Text] / Y. Dong, F. Li, W. Hong, X. Zhou, & H. Ren // 2021 SAR in Big Data Era (BIGSAR DATA). – Nanjing, China, 2021. – P. 1-4. DOI: 10.1109/BIGSAR DATA53212.2021.9574376.

6. "It's still just like a toy" – The Czech company that leads the high-end military decoy market [Text] / Radio Prague International. – Available at: <https://english.radio.cz/its-still-just-a-toy-czech-company-leads-high-end-military-decoy-market-8777506> (accessed 17 Aug. 2024).

7. Internal ballistics of high-low pressure decoy launcher with a secondary propellant charge [Text] / D. N. Thai, V. Horák, L. D. Duc, & H. N. Lac // 2019 International Conference on Military Technologies (ICMT). – Brno, Czech Republic, 2019. – P. 1-6. DOI: 10.1109/MILTECHS.2019.8870020.

8. Xiang, H. A special 3D effect method of infrared decoy [Text] / H. Xiang, & W. Peng // 2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology. – Chengdu, 2010. – P. 606-609. DOI: 10.1109/ICCSIT.2010.5564443.

9. The use of corner reflectors to simulate tactical aircraft [Text] / O. Sukharevsky, I. Ryapolov, V. Vasilets, & S. Nechitaylo // 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW). – Ukraine, 2022. – P. 289-292. DOI: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037097.

10. Concept of radars synthesis theory for creating phantom objects in SAR images [Text] / V. Pavlikov, V. Volosiuk, D. Kolesnikov, V. Kosharskyi, H. Cherepnin, & P. Malashta // 2024 14th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Ceske Budejovice. – Czech Republic, 2024. – P. 695-698. DOI: 10.1109/ACIT62333.2024.10712456.

11. Basic geometric relations, parameters, and characteristics of theory for phantoming of SAR images [Text] / V. Pavlikov, S. Zhyla, P. Pozdniakov, D. Kolesnikov, H. Cherepnin, & P. Malashta // 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). – Lviv, 2024.

References

1. Thomas, C., Ranchin, T., Wald, L., & Chausson, J. Synthesis of multispectral images to high spatial resolution: A critical review of fusion methods based on remote sensing physics. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, vol. 46, no. 5, pp. 1301-1312. DOI: 10.1109/TGRS.2007.912448.

2. Brenner, A. R., & Roessing, L. Radar imaging of urban areas by means of very high-resolution SAR and interferometric SAR. *2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Barcelona, Spain, 2007, pp. 2689-2693. DOI: 10.1109/IGARSS.2007.4423397.

3. Hees, A., Stangl, M., Adamiuk, G., Riegger, S., & Heer, C. Status and future trends of active phased array antennas for AIRBUS space-borne SAR systems. *2019 IEEE International Symposium on Phased Array System & Technology (PAST)*, Waltham, MA, USA, 2019, pp. 1-6. DOI: 10.1109/PAST43306.2019.9020960.

4. Gao, Y., Xiang, T., Yang, J., Dang, H., & Tan, X. Post refocusing algorithm for high-resolution spaceborne SAR image processing in large rolling terrain. *2023 8th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP)*, Xi'an, China, 2023, pp. 1256-1260. DOI: 10.1109/ICSP58490.2023.10248841.

5. Dong, Y., Li, F., Hong, W., Zhou, X., & Ren, H. Land cover semantic segmentation of port area with high-resolution SAR images based on SegNet. *2021 SAR in Big Data Era (BIGSAR DATA)*, Nanjing, China, 2021, pp. 1-4. DOI: 10.1109/BIGSAR DATA53212.2021.9574376.

6. "It's still just like a toy" – The Czech company that leads the high-end military decoy market. Radio Prague International. Available at: <https://english.radio.cz/its-still-just-a-toy-czech-company-leads-high-end-military-decoy-market-8777506> (accessed 17 Aug. 2024).

7. Thai, D. N., Horák, V., Duc, L. D., & Lac, H. N. Internal ballistics of high-low pressure decoy launcher with a secondary propellant charge. *2019 International Conference on Military Technologies (ICMT)*, Brno, Czech Republic, 2019, pp. 1-6. DOI: 10.1109/MILTECHS.2019.8870020.

8. Xiang, H., & Peng, W. A special 3D effect method of infrared decoy. *2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology*, Chengdu, 2010, pp. 606-609. DOI: 10.1109/ICCSIT.2010.5564443.

9. Sukharevsky, O., Ryapolov, I., Vasilets, V., & Nechitaylo, S. The use of corner reflectors to simulate tactical aircraft. *2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*, Ukraine, 2022, pp. 289-292. DOI: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037097.

10. Pavlikov, V., Volosiuk, V., Kolesnikov, D., Kosharskyi, V., Cherepnin, H., & Malashta, P. Concept of radars synthesis theory for creating phantom objects in SAR images. *2024 14th International Conference on Advanced Computer Information Technologies*, Czech Republic, 2024, pp. 695-698. DOI: 10.1109/ACIT62333.2024.10712456.

11. Pavlikov, V., Zhyla, S., Pozdniakov, P., Kolesnikov, D., Cherepnin, H., & Malashta, P. Basic geometric relations, parameters, and characteristics of theory for phantoming of SAR images. *2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, 2024, Lviv.

Надійшла до редакції 17.08.2024, розглянута на редколегії 15.10.2024

THEORY OF PHANTOMIZATION OF RADIO IMAGES OF SAR: BASIC INFORMATION AND JUSTIFICATION OF THE SIZES OF THE PHANTOM AREA

*Volodymyr Pavlikov, Pavlo Pozdniakov, Eduard Tserne, Denys Kolesnikov,
Maksym Peretiak, Pavlo Malashta*

The article's **subject** of study is the creation of the foundations of the theory of the formation of false elements in the images of aerospace radio vision systems by injecting informational signs of objects absent on the underlying surface. The **goal** is to substantiate the dimensions of the subsurface areas on which it is possible to simulate objects with different methods of viewing the exploring area from the aerospace radar carrier. **Task**: to develop the geometry of the problem, which will reflect the interaction between the radar with the synthesis of the Synthetic-aperture radar (SAR) and the radar of phantomization (FR); to develop a general structural diagram of the FR; determine the main parameters, taking into account which will allow planning an "interaction" session between the SAR and the FR; to determine the sizes of the underlying surface areas, where it is possible to provide phantomization of radio images formed by SAR with different methods of examination. The **methods** used are mathematical and functional analysis, navigation, and remote sensing. The following **results** were obtained. The geometry of the problem of the interaction between the SAR and the FR was defined; it allowed us to calculate the interaction time between the systems and to establish the law of change of the distance between them at any placement of the SAR in orbit. The influence of the interposition of the considered systems on the expected shape of the SAR sounding signal and the size of the area on which the problem of radio image phantomization arises has been investigated. Examples of calculations of the specified parameters for various types of exploring of the earth's surface by radar from an aerospace carrier are given. **Conclusions**. The article summarizes and develops the theory of phantom radio images constructed using SAR. The obtained results establishing the dependence between the phantomization geometry and such parameters as the potential and actual time of interaction between the systems, the envelope of the bundle of received radio pulses, and the number of separation bands by range are important for further research in this direction, which at the moment it is advisable to focus on solving the optimization problem phantomization of separate blocks of the radar and determining the conditions for planning the processes of injecting objects into the transmitter signal and into the radio image formed by the SAR.

Keywords: ground remote sensing; phantomization of radio images; radio images formation.

Павліков Володимир Володимирович – д-р техн. наук, проф., проректор з наукової роботи, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Поздняков Павло Васильович – канд. техн. наук, доц., Державний науково-дослідний інститут технологій кібербезпеки та захисту інформації Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України, Київ, Україна.

Церне Едуард Олексійович – д-р філос., доц. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна.

Колесніков Денис Вікторович – д-р філос., доц. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна.

Перетяцько Максим Сергійович – асист. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Малашта Павло Петрович – асист. каф. аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Volodymyr Pavlikov – D.Sc. in Radioengineering, Professor, Vice Rector for Science, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: v.pavlikov@khai.edu, ORCID: 0000-0002-6370-1758.

Pavlo Pozdniakov – PhD, Associate Professor, State Scientific and Research Institute of Cybersecurity Technologies and Information Protection SSSCIP of Ukraine Kyiv, Ukraine,
e-mail: ictip@cip.gov.ua.

Eduard Tserne – PhD in Telecommunications and Radio Engineering, Associate Professor of Aerospace Radio-Electronic Systems Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: e.tserne@khai.edu, ORCID: 0000-0003-0709-2238.

Denys Kolesnikov – PhD in Telecommunications and Radio Engineering, Associate Professor of Aerospace Radio-Electronic Systems Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: d.kolesnikov@khai.edu, ORCID: 0000-0002-0135-2695.

Maksym Peretiatko – Assistant of Department of Aerospace Radio-electronic Systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: m.peretiatko@khai.edu, ORCID: 0000-0002-3536-5355.

Pavlo Malashta – Assistant of Department of Aerospace Radio-electronic Systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: p.p.malashta@khai.edu, ORCID: 0009-0000-2652-1507.