



УДК 621.537

В.П. ВОЛОБОЄВ*, В.П. КЛИМЕНКО*

**ЩОДО ПИТАННЯ ПРО НАВІГАЦІЮ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА
ПО РАДІОЛОКАЦІЙНОМУ ПОЛЮ**

*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. У роботі розглянуто новий підхід до пошуку інформаційних параметрів радіолокаційного поля, джерелом якого є радіолокатор із реальною апертурою антени, необхідний для побудови цифрової радіолокаційної карти місцевості, застосовної для навігації літального апарата по траєкторії близько до вертикальної до поверхні Землі. Суть підходу полягає у такому. У зв'язку з освоєнням аналого-цифровим перетворенням гігагерцового діапазону частот з'явилася можливість аналізувати в деталях відбитий радіолокаційний сигнал від підстильної поверхні Землі і об'єктів. Це відкрило нові можливості в пошуку інформаційних параметрів відбитого сигналу (відеоімпульса). Отримано нові інформаційні параметри: інтенсивність відбитого сигналу від об'єкта, тривалість переднього і заднього фронтів відеоімпульса, який відбито від підстильної поверхні Землі і об'єктів, дальність від літального апарата до підстильної поверхні Землі. Запропоновано при горизонтальній траєкторії або близької до неї будувати карту рельєфу ділянки підстильної поверхні Землі і об'єктів на ній за дальністю. А також метод побудови радіолокаційної карти контрасту за інтенсивністю відбитих сигналів як від підстильної поверхні Землі, так і об'єктів. Запропоновано незалежні від зовнішніх умов інформаційні параметри: висоту об'єкта і оцінку висоти нахилу підстильної поверхні Землі розглядати як основні елементи побудови цифрової тривимірної карти місцевості. Отримані результати можна використовувати як вихідний матеріал для теоретичних і практичних досліджень в області розробки всепогодної високоточної навігаційної радіолокаційної системи.

Ключові слова: навігація, літальний апарат, радіолокаційне поле, радіолокатор з реальною апертурою антени, відбитий сигнал від поверхні Землі, інформаційні параметри, радіолокаційна карта місцевості.

Abstract. The paper considers a new approach to the search for information parameters of the radar field, the source of which is a radar with a real antenna aperture. Such aperture is necessary for the construction of a digital radar map of the terrain, applicable for the navigation of an aircraft along a trajectory that is close to being vertical to the Earth's surface. The article reveals the essence of the approach. Because of the development of analog-to-digital conversion of the gigahertz frequency range, it became possible to analyze the radar signal reflected from the underlying surface of the Earth and located on it objects in details. It has opened up new opportunities in the search for information parameters of the reflected signal (a video pulse). There have been obtained some new information parameters, such as intensity of the reflected signal from the object, duration of the leading and trailing edges of the video pulse reflected from the underlying surface of the Earth and located on it objects, distance from the aircraft to the underlying surface of the Earth. It is proposed to construct a relief map of a section of the underlying surface of the Earth and located on it objects in terms of a horizontal trajectory or a trajectory close to it. The paper analyzes a method for constructing a radar contrast map based on the intensity of the signals reflected from the underlying surface of the Earth and located on it objects. There have been proposed such information parameters as the height of an object and an estimate of the height of the slope of the underlying surface of the Earth which are independent of external conditions and which can be considered as the main elements for building a digital three-dimensional map of the area. The obtained results

can be considered as a source material for theoretical and practical research in the sphere of development of an all-weather high-precision navigation radar system.

Keywords: navigation, aircraft, radar field, radar with a real antenna aperture, signal reflected from the Earth's surface, information parameters, radar terrain map.

DOI: 10.34121/1028-9763-2020-3-22-33

1. Вступ

Дослідження методів навігації літального апарата (ЛА) по геофізичних полях місцевості були початі в 50-ті роки минулого століття. До теперішнього часу все ще основним джерелом інформації про стан досліджень у даній області є наукові публікації і патентна література. Можна виділити кілька напрямів у теоретичних дослідженнях рішення задачі навігації ЛА. До першого напрямку слід віднести роботи [1–6], в яких розглядається задача навігації рухомого об'єкта по геофізичних полях. Ці дослідження ведуться в рамках продовження загальних теоретичних робіт в області управління системами в умовах невизначеності та конфлікту. Запропоновано декілька математичних моделей процесу навігації ЛА по горизонтальній або близькій до цієї траєкторії. Методи і алгоритми розглянуті для двовимірних вимірюваного і еталонного геофізичних полів. До іншого напрямку слід віднести роботи [7–11], в яких розглядається задача навігації по радіолокаційному полю. Для вимірювання радіолокаційного поля ділянки поверхні Землі застосовується радіолокатор бокового огляду з синтезованою апертурою антени (РСА). Як математична модель також розглядається задача навігації ЛА при русі по горизонтальній або близькій до неї траєкторії. Вирішуються ті ж завдання, але з урахуванням особливостей застосування радіолокаторів (РЛ). Вимірне і еталонне радіолокаційні поля розглядаються як двовимірні. Для їх поєднання розроблені ефективні кореляційні алгоритми. Слід зазначити, що в доступних інформаційних джерелах практично немає відомостей про розробки всепогодних високоточних навігаційних радіолокаційних систем і практично в жодній роботі не розглянуто рух ЛА на кінцевій ділянці траєкторії польоту ЛА (траєкторії, близької до вертикальної до поверхні Землі). У той час, як це є необхідна вимога всепогодної високоточної навігаційної радіолокаційної системи.

Мета роботи: дослідження можливості застосування радіолокаційної системи всепогодної навігації ЛА на кінцевій ділянці траєкторії польоту.

2. Постановка завдання

Попередньо наводяться відомості щодо функціонування РЛ [7–12], необхідні для формулювання поставленого завдання. З точки зору формування первинного радіолокаційного зображення, відомо два типи РЛ:

- сканування в режимі синтезованої апертури антени;
- сканування в режимі реальної апертури (РРА).

Синтезування апертури антени є технічний прийом, який дозволяє істотно підвищити роздільну здатність радіолокатора в поперечному напрямі або під кутом щодо польоту. Для цього вісь антени жорстко пов'язана з ЛА і орієнтована в поперечному напрямі, а діаграма спрямованості антени (ДСА) у вертикальній площині є ширококутова, в горизонтальній – вузькокутова.

Геометрія радіолокаційного опромінення земної поверхні показана суцільними лініями на рис. 1а. У цьому випадку роздільна здатність за дальністю визначається зондуючим сигналом, що пробігає по поверхні землі і відбивається від об'єктів, розташованих на ній. Тривалість зондуючого сигналу вибирається якомога коротшою.

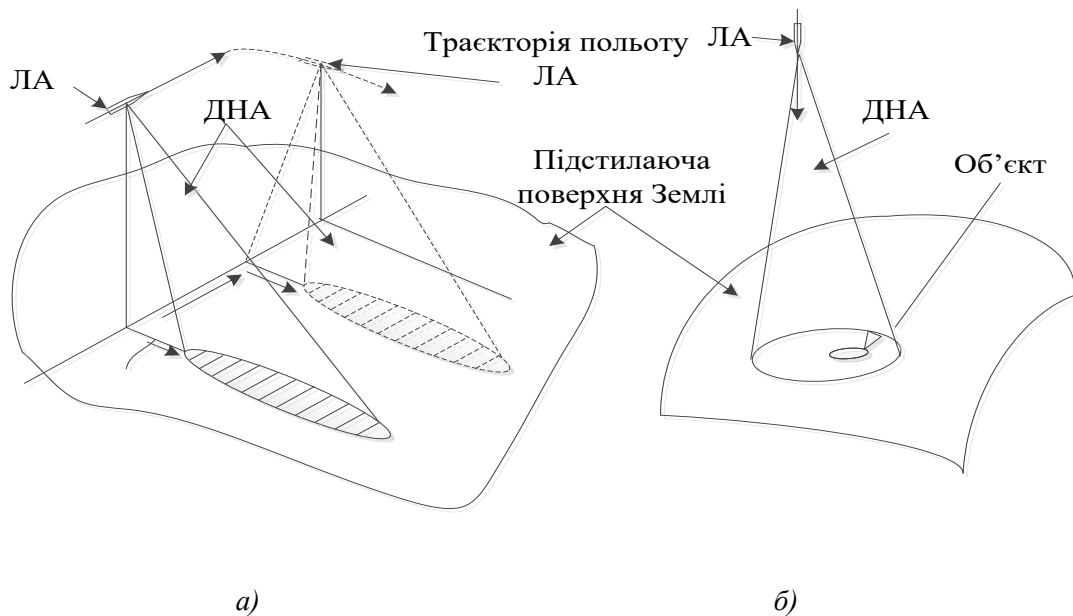


Рисунок 1 – Геометрія радіолокаційного опромінення земної поверхні: а) РСА; б) РРА

У напрямі руху ЛА роздільна здатність за дальністю визначається шириною ДНА у цьому напрямі. Двовимірність сканування місцевості досягається за рахунок руху ЛА. Режим формування карти місцевості з первинної радіолокаційної інформації (РЛІ) називається картографуванням. Карта застосовується для визначення місцезнаходження ЛА в оглядово-порівняльній навігаційній системі шляхом порівняння з еталоном. Як еталон застосовується карта місцевості, отримана в результаті дистанційного зондування РСА поверхні Землі з космосу або повітря, і цифрова, тобто є сумісність карти еталона і місцевості, отриманої від РСА. На рис. 1а штриховими лініями показана геометрія радіолокаційного зондування земної поверхні при русі ЛА по траєкторії, яка наближається до вертикальної щодо земної поверхні. На рис. 1а видно, що РСА знаходиться в непрацездатному стані. ДНА зміщена назад, причому, чим ближче траєкторія наближається до вертикальної по відношенню до поверхні Землі, тим зрушення більше. Горизонтальна складова швидкості руху ЛА зменшена і прямує до нуля при наближенні траєкторії до вертикальної, тобто немає двовимірного сканування. З вищесказаного випливає, що РСА застосуємо тільки в разі руху ЛА по горизонтальній або близькій до неї траєкторії.

У режимі реальної апертури формування первинної РЛІ відбувається за рахунок сканування в азимутальній площині. При скануванні вісь ДНА повертається, займаючи поспідовно положення, які відповідають різним азимутам на земній поверхні. Для сканування застосовується вузько направлена ДНА, причому, чим вона вужче, тим якісніше і детальніше РЛІ, але зате потрібно більше часу на сканування. РРА знаходиться у працездатному стані як при русі ЛА по горизонтальній, так і по близькій до вертикальної траєкторії. У РРА зондуючий сигнал тільки відбивається від підстильної поверхні Землі і об'єктів, розташованих на ній. У цьому випадку РЛІ представлена у тривимірному вимірюванні. Перші дві координати вказують положення точки зондування на поверхні. Третій вимір використовується для відображення відбитого сигналу. З відбитого сигналу від поверхні Землі виділяється тільки один інформаційний параметр, а саме інтенсивність відбитого сигналу, яка залежить від типу підстильної поверхні Землі, розмірів і матеріалу, з якого виконана поверхня, об'єктів, розташованих на поверхні Землі, та інших чинників. На наступному кроці первинна РЛІ перетворюється у двовимірну карту радіолокаційного контрасту. Однак практичне впровадження кореляційно-екстремальних систем навігації по полю радіолокаційного контрасту ускладнюється рядом обставин. З одного боку, це нестабільність

поля радіолокаційного контрасту (залежність від погодних, сезонних умов, візування прийнятого відбитого сигналу, характеристик приймального пристрою РРА). З іншого боку, складність побудови еталона поля, так як необхідно по цифровій карті місцевості побудувати двовимірну карту поля радіолокаційного контрасту. З перерахованих факторів, що впливають на якість і детальність карти радіолокаційного контрасту як реальної, так і еталонної, впливає існування досить значних, важко переборних факторів, що впливають на всепогодну високоточну навігацію ЛА при русі по довільній траєкторії щодо Землі. У даній роботі буде проведено дослідження відбитого сигналу від підстильної поверхні Землі при вертикальному радіолокаційному зондуванні з метою пошуку нових інформативних параметрів, менш залежних від впливу зовнішніх факторів.

3. Інформативні параметри радіолокаційного сигналу, відбитого від поверхні Землі й об'єктів, розташованих на ній

Ефективність цифрової обробки первинної радіолокаційної інформації залежить від параметрів аналого-цифрового перетворювача (АЦП), таких як частота дискретизації $f_{\text{АЦП}}$ й точність перетворення аналогового відеоімпульсу (огиначаючого сигналу, відбитого від ділянки поверхні Землі) у цифрову форму. Необхідність пошуку нових інформативних параметрів відбитого сигналу в залежності від стану рівня розробки АЦП підтверджує такий приклад.

У розробленому на початку 2000-их років РРА [13–16] АЦП мав частоту дискретизації $f_{\text{АЦП}} = 31,25 \text{ мГц}$, точність 12 двійкових розрядів. На зондувальний імпульс тривалістю $t_{\text{и}} = 70 \text{ нсек}$ доводилося, як мінімум, 2 дискретних відліки. Це означає, що інформативним параметром могла бути тільки інтенсивність (потужність) відбитого імпульсу. В [22] наведена таблиця параметрів сучасних АЦП гигагерцового діапазону, що мають точність перетворення 12 двійкових розрядів і більше. При перетворенні з частотою дискретизації 2 GHz на той же імпульс доводиться вже 140 дискретних відліків, тобто для аналізу доступна вся тимчасова діаграма відеоімпульсу, а це відкриває нові можливості в пошуку інформативних параметрів відбитого сигналу від поверхні Землі й об'єктів, розташованих на ній (надалі ділянки поверхні Землі й об'єктів).

Як вихідна інформація розглядається первинна РЛІ, яка представлена у тривимірному вимірі. У перших двох вимірах зазначені координати ділянки поверхні Землі, що зондується, а у третьому вимірі утримується тимчасова характеристика відбитого сигналу, який сформовано таким чином. Одночасно з зондуючим імпульсом запускається дискретизація відповідного відбитого радіолокаційного сигналу, який надходить на вхід приймача РРА. Закінчення дискретизації відбувається із приходом відбитого сигналу від самого далекого об'єкта огляду або через певний інтервал часу. При пошуку інформативних параметрів передбачається, що з первинної РЛІ виділено, у вигляді тимчасової діаграми відеоімпульсу, відбитий сигнал від ділянки поверхні Землі й об'єктів. Умовно прийнято підрозділяти об'єкти на точкові (розміри об'єкта менше перетину діаграми спрямованості антени РРА) і протяжні (розподілені), якщо навпаки. Нижче аналізується виділений відеоімпульс, що складається з таких складових частин:

1. Відеоімпульс від ділянки поверхні Землі або протяжного об'єкта.
2. Відеоімпульс від ділянки поверхні Землі й точкового об'єкта.

Такий підхід відповідає принципу побудови геоінформаційної системи (пошарове подання інформації, яка виводиться на карту).

3.1. Інформативні параметри відеоімпульсу, відбитого від ділянки поверхні Землі

Розглядаються такі випадки відбиття відеоімпульсу від ділянки поверхні Землі або протяжного об'єкта, розташованого:

- перпендикулярно зондувальному імпульсу (вертикальне зондування);
- під кутом до зондувального імпульсу.

3.1.1. Інформативні параметри відеоімпульсу, відбитого від ділянки поверхні Землі або протяжного об'єкта, розташованого вертикально зондуванню

На рис. 2 наведені геометрія радіолокаційного зондування ділянки поверхні Землі й протяжного об'єкта, розташованих вертикально зондуванню, тимчасові діаграми, що огинають, зондувальний імпульс і відеоімпульс. Як випливає з рис. 1а, з погляду радіолокаційного зондування практично непомітно, що зондується: протяжний об'єкт або ділянка поверхні Землі. Тобто, немає можливості визначити висоту об'єкта. У зв'язку з цим, на рис. 2в приводиться тимчасова діаграма, загальна для обох випадків зондування.

Варто відзначити, що тимчасова діаграма (рис. 2б) наведена для того, щоб показати причинно-наслідковий зв'язок між тимчасовою діаграмою, що огинає зондуючий імпульс, і відеоімпульсом. Такі позначення використовуються на рис. 2.

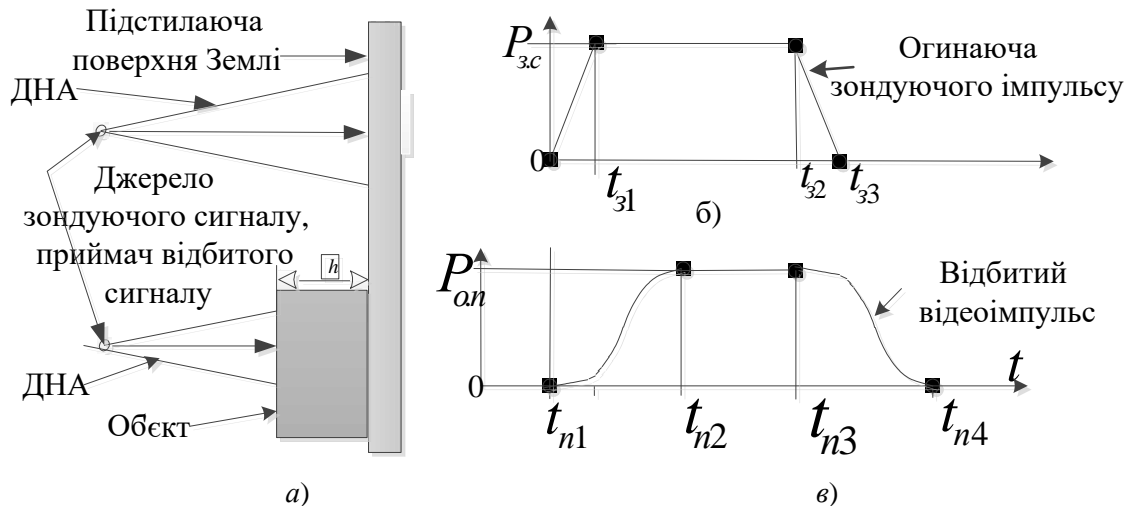


Рисунок 2 – Елементи радіолокаційного зондування ділянки поверхні Землі:
а) геометрія зондування; б) тимчасова діаграма, що огинає зондуючий імпульс;
в) тимчасова діаграма відеоімпульсу

На рис. 2а наведено такі позначення:

H – висота об'єкта.

Тимчасову діаграму, що огинає зондуючий імпульс (рис. 2б), характеризують такі параметри:

P_{zc} – інтенсивність (потужність) зондуючого імпульсу;

t_{31} – тривалість переднього фронту огинаючої зондуючого імпульсу;

t_{332} – тривалість заднього фронту огинаючої зондуючого імпульсу дорівнює

$$t_{332} = t_{33} - t_{32};$$

t_{321} – тривалість огинаючої зондуючого імпульсу дорівнює $t_{321} = t_{32} - t_{31}$.

Перераховані вище параметри є технічні, установлюються при виготовленні.

Відбитий відеоімпульс від ділянки поверхні Землі (рис. 2в), розташованої перпендикулярно зондувальному імпульсу, характеризують параметри:

$P_{o,n}$ – інтенсивність (потужність) сталого рівня відеоімпульсу;

t_{n1} – час до початку відбиття відеоімпульсу від ділянки поверхні Землі;

t_{n2} – час до початку відбиття сталого рівня відеоімпульсу від ділянки поверхні Землі;

t_{n3} – час до кінця відбиття сталого рівня відеоімпульсу від ділянки поверхні Землі;

t_{n4} – час до кінця відбиття відеоімпульсу від ділянки поверхні Землі.

Відлік часу t_{ni} , де $i = 1, 2, 3, 4$, починається з моменту запуску зондуємого імпульсу.

З рис. 2б видно, що

t_{n21} – тривалість переднього фронту відеоімпульсу обчислюється як $t_{n21} = t_{n2} - t_{n1}$;

t_{n43} – тривалість заднього фронту відеоімпульсу є $t_{n43} = t_{n4} - t_{n3}$;

t_{n32} – тривалість відеоімпульсу обчислюється за формулою $t_{n32} = t_{n3} - t_{n2}$.

Як одиниця виміру часу для параметрів t_{ni} , де $i = 1, 2, 3, 4$, використовується період дискретизації перетворювача $T_{АЦП}$, обумовлений як

$$T_{АЦП} = 1.0 / f_{АЦП}. \quad (1)$$

У цьому випадку роздільна здатність за дальністю Δl_d є відстань між сусідніми дискретними відліками АЦП і обчислюється в такий спосіб:

$$\Delta l_d = c / f_{АЦП} = c T_{АЦП}, \quad (2)$$

де c – швидкість світла.

Час t_{n_i} обчислюється як

$$t_{n_i} = n_{n_i} T_{АЦП}, \quad (3)$$

де n_{n_i} – кількість дискретних відліків за час проходження сигналу від початку зондування до моменту відбиття сигналу від i -ого місця.

Дальність l_{n_i} від місця початку зондування до i -місця відбиття сигналу обчислюється як

$$l_{n_i} = n_{n_i} \Delta l_d. \quad (4)$$

Карта рельєфу ділянки поверхні Землі й об'єктів будується при польоті ЛА по горизонтальній траєкторії або близькій до неї. Як витікає з (2), при застосуванні АЦП із частотою дискретизації 2 GHz роздільна здатність за дальністю буде

$$\Delta l_d = 3 \times 10^8 / 2 \times 10^9 = 0.15 \text{ м},$$

тобто побудований рельєф за точністю не поступається рельєфу цифрової карти.

Інтенсивність відбитого імпульсу $P_{o,n}$ є основний інформативний параметр при зондуванні ділянки поверхні Землі [18]. Він залежить від типу поверхні Землі, сезонних, погодних умов та інших факторів. Практична неможливість точного обліку всіх перерахованих факторів привела до необхідності введення спеціальної розрахункової величини – ефективного площі розсіювання (ЕПР).

ЕПР являє собою виражений у квадратних метрах коефіцієнт, який враховує властивості, що відбивають поверхню Землі (об'єкти) і залежні від конфігурації, фізичних властивостей матеріалу поверхні, яка опромінюється. Через це особливе значення набули теоретичні, експериментальні й статистичні методи дослідження характеристик земних покриттів і об'єктів, розташованих на них, які відбивають їхню залежність від різних факторів і розробку методик апріорного визначення ЕПР із такими інформаційними матеріалами, як топографічні карти, фотознімки, кліматичні й погодні зведення з метою побудови радіолокаційної карти контрасту. Стан теоретичних і експериментальних досліджень на сучасний момент досить докладно описано в літературі [12–22].

При побудові карти радіолокаційного контрасту за результатами зондування поверхні Землі й об'єктів основне завдання полягає у знаходженні відповідності між інтенсивністю відбитого відеоімпульсу $P_{o.n}$ від ділянки поверхні Землі й ЕПР цієї поверхні.

Пропонується метод побудови карти радіолокаційного контрасту. Суть методу полягає в такому. Інтенсивність відбитого імпульсу $P_{o.n}$ однозначно залежить від потужності сигналу $P_{o.n_in}$, який прийнято на вході РРА. Цей взаємозв'язок не має математичного опису. Установлюється він експериментально для конкретного РРА, у заводських умовах у результаті стендових випробувань. Якщо цей зв'язок відомий, то за інтенсивністю відбитого сигналу $P_{o.n}$ однозначно визначається потужність сигналу $P_{o.n_in}$, який прийнято на вході РРА.

На наступному кроці визначається ЕПР об'єкта з рівняння дальності радіолокації [2], що встановлює залежність потужності відбитого сигналу $P_{o.n_in}$, прийнятого на вході РРА від різних параметрів радіолокаційної системи, зовнішнього середовища, й має такий вигляд:

$$P_{o.n_in} = \frac{P_f G_f}{4\pi l_{o1}^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi l_{o1}^2} \cdot A_r, \quad (5)$$

де P_f – потужність випромінювання зондуючого імпульсу;

l_{o1} – дальність від прийомного пристрою РРА до об'єкта відбиття;

G_f – коефіцієнт підсилення передавальної антени;

σ – ефективна площа розсіювання об'єкта;

A_r – ефективна площа апертури прийомної антени.

У випадку загальної антени для передачі й прийому коефіцієнт підсилення G_f й ефективна площа апертури антени A_r зв'язані простим співвідношенням:

$$G_f = \frac{4\pi A_r}{\lambda^2}, \quad (6)$$

де λ – довжина хвилі, на якій відбувається випромінювання зондуючого імпульсу.

ЕПР обчислюється з рівняння (5), яке перетворено до виду

$$\sigma = \frac{16\pi^2 R^4}{P_f G_f A_r} D_{i.i_in}. \quad (7)$$

Таким чином, для побудови карти радіолокаційного контрасту є вся необхідна інформація: координати ділянки поверхні Землі, що зондується, й ЕПР.

Новий інформативний параметр t_{n21} і t_{n43} – тривалості переднього і заднього фронтів відеоімпульсу, відбитого від ділянки поверхні Землі і об'єктів. Тривалість фронту за-

лежить від фізичних (електрофізичних) властивостей ділянки поверхні Землі і об'єктів і не залежить від характеристик РРА. Електрофізичні властивості повністю описуються трьома скалярними величинами [18]: діелектрична проникність, магнітна проникність і електропровідність. Ці величини, у свою чергу, залежать від сезонних і погодних умов. Якщо інтенсивність відбитого імпульсу описує усталену реакцію ділянки поверхні Землі і об'єктів на зондуючий імпульс, то тривалості фронтів описують процес встановлення відбитого імпульсу, тобто містять інформацію, що характеризує фізичні властивості ділянки поверхні Землі і об'єктів. Слід зауважити, що в науковій і технічній літературі дослідження зв'язку цього інформативного параметра з фізичними властивостями ділянки поверхні Землі і об'єктів відсутні. Напевне, це пов'язано з тим, що можливість дослідження тимчасової діаграми відеоімпульсу РРА з'явилась відносно недавно, а саме, після не тільки розробки АЦП гігагерцового діапазону, а й застосування його в радіолокації.

3.1.2. Інформативні параметри відеоімпульсу, відбитого від ділянки поверхні Землі, розташованої під кутом до зондувального імпульсу

На рис. 3 наведено геометрію радіолокаційного зондування ділянки поверхні Землі (протяжного об'єкта), розташованої під кутом до зондувального імпульсу, тимчасову діаграму відеоімпульсу.

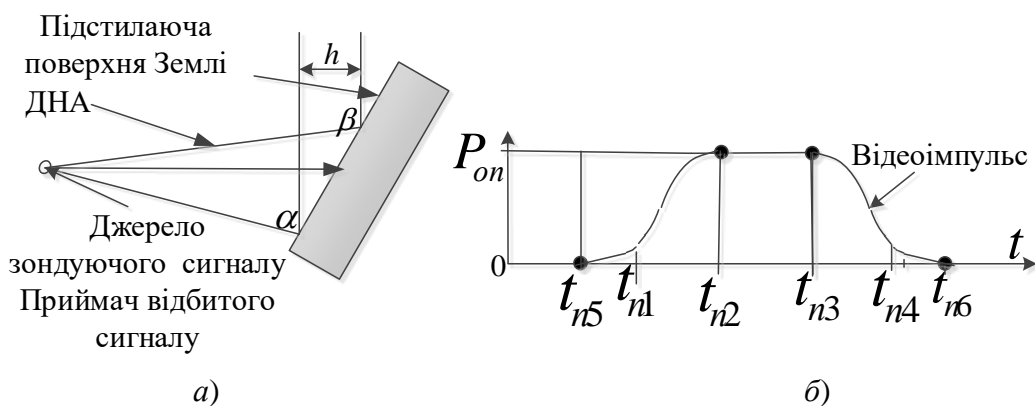


Рисунок 3 – Елементи радіолокаційного зондування ділянки поверхні Землі:
а) геометрія зондування; б) тимчасова діаграма відеоімпульсу

На рис. 3а наведені такі позначення:

h – висота похилої поверхні Землі в межах ДНА;

α – початкова точка дотику зондувального імпульсу з поверхнею Землі;

β – кінцева точка дотику зондувального імпульсу з поверхнею Землі.

При аналізі результатів зондування ділянки похилої поверхні Землі необхідно враховувати той факт, що зондуючий імпульс як накриває, так і залишає ділянку поверхні Землі, пробігаючи по поверхні в межах ДНА. Висота похилої площини визначає час пробігу зондувального імпульсу по похилій поверхні Землі.

З порівняння тимчасової діаграми відеоімпульсу (рис. 3б) з діаграмою відеоімпульсу (рис. 2в) у ній, крім інформативних параметрів, уже описаних у параграфі 3.1.1, є елементи, що містять інформацію про час прольоту зондуючим імпульсом висоти похилої ділянки поверхні Землі, яка накрита ДНА. До таких елементів відносяться:

t_{n5} – час до відбиття початку відеоімпульсу від α – точки ділянки поверхні Землі;

t_{n1} – час до відбиття початку відеоімпульсу від β – точки ділянки поверхні Землі (з переднього фронту);

t_{n6} – час до відбиття кінця відеоімпульсу від α – точки поверхні Землі;

t_{n4} – час до відбиття кінця відеоімпульсу від β – точки поверхні Землі (початок заднього фронту).

Яким чином визначаються на діаграмі моменти часу t_{n1} , t_{n4} , це окреме питання. Для успішного рішення даного питання необхідно провести відповідні експерименти. У даній роботі зазначається, що вони визначені.

Як впливає з рис. 3а, при аналізі результатів зондування ділянки похилої поверхні Землі необхідно враховувати те, що зондувальний імпульс, пробігаючи по поверхні Землі, в межах ДНА як накриває за час t_{15} , так і залишає за час t_{64} ділянку поверхні Землі. Час пробігу t_{15} визначається при накриванні зондуючим імпульсом похилої поверхні Землі в такий спосіб:

$$t_{15} = t_{n1} - t_{n5} = (n_{n1} - n_{n5}) T_{АЦП} = n_{n15} T_{АЦП}, \quad (8)$$

де
$$n_{n15} = (n_{n1} - n_{n5}), \quad (9)$$

а при залишенні t_{64}

$$t_{64} = t_{n4} - t_{n4} = (n_{n6} - n_{n4}) T_{АЦП} = n_{n64} T_{АЦП}, \quad (10)$$

де
$$n_{n64} = (n_{n6} - n_{n4}). \quad (11)$$

Слід зазначити, що час прольоту при зондуванні симетричним імпульсом як при накритті, так і залишенні ділянки похилої поверхні Землі однаковий.

Новий інформативний параметр h – висота ділянки похилої поверхні (рис. 3а). Висота h обчислюється за часом прольоту похилої ділянки поверхні Землі за формулою (4) у такий спосіб:

$$h = n_{n15} \Delta l_d = n_{n64} \Delta l_d. \quad (12)$$

Слід зазначити, що в даному варіанті зондування немає можливості визначити напрямок нахилу поверхні Землі.

3.1.3. Інформативні параметри відеоімпульсу, відбитого від ділянки поверхні Землі і точкового об'єкта

На рис. 4 наведено геометрію радіолокаційного зондування ділянки поверхні Землі і точкового об'єкта, тимчасові діаграми відеоімпульсів, відбитих від ділянки поверхні Землі і точкових об'єктів різної висоти.

На рис. 4а наведені такі позначення: H – висота точкового об'єкта. Відлік висоти виконується від поверхні Землі.

На рис. 4 наведені два варіанти тимчасової діаграми відеоімпульсу від ділянки поверхні Землі з точковим об'єктом. Вибір варіанта визначає час прольоту зондуючим імпульсом висоти H об'єкта. Якщо час більше тривалості зондуючого імпульсу, то тимчасова діаграма містить два окремі відеоімпульси (рис. 4б): відбитий від точкового об'єкта (параметри з індексом о) і від ділянки поверхні Землі (параметри з індексом п). Якщо ні, то тимчасова діаграма відеоімпульсу є сума двох відеоімпульсів (рис. 4в): відбитого від точкового об'єкта (параметри з індексом о) і від ділянки поверхні Землі (параметри з індексом п). Для успішного визначення на тимчасовій діаграмі (рис. 4в) моментів часу t_{ni} , t_{oi} де

$i = 1, 2, 3, 4$, крім теоретичних досліджень, необхідні відповідні експерименти. У даній роботі передбачається, що параметри t_{ni} , t_{oi} визначені.

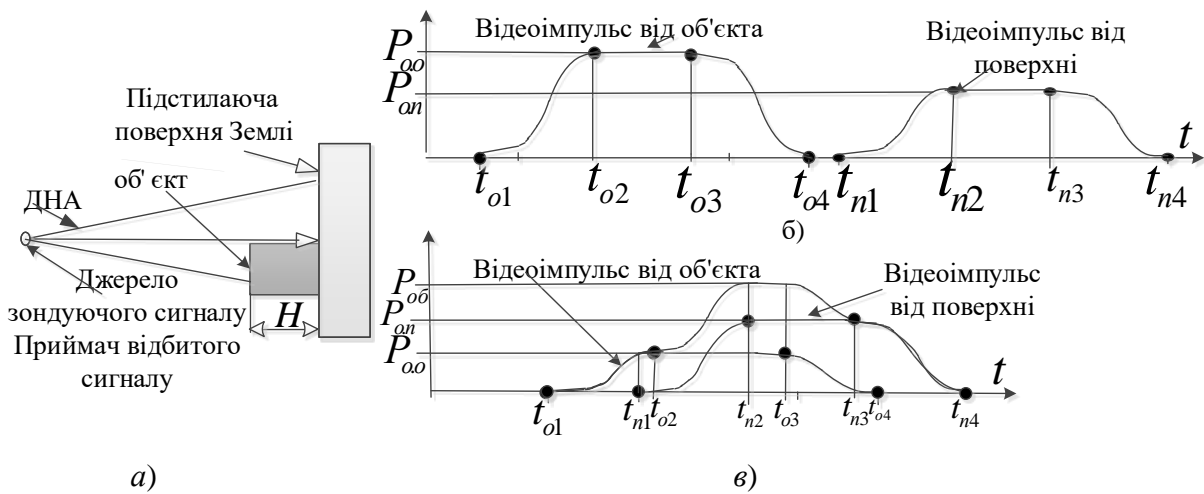


Рисунок 4 – Елементи радіолокаційного зондування ділянки поверхні Землі і точкового об'єкта: а) геометрія зондування; б) тимчасова діаграма відеоімпульсу при часі прольоту висоти точкового об'єкта зонduючим імпульсом більшим, ніж його тривалість; в) тимчасова діаграма відеоімпульсу у протилежному випадку

Як відеоімпульс, відбитий від поверхні Землі, так і від точкового об'єкта, відповідає опису відеоімпульсу (рис. 2в), тому до них застосовуються всі результати, наведені в параграфі 3.1.1. Із цього випливає, що в радіолокаційній карті контрасту як реальній, так і еталонній, повинні бути враховані інформаційні параметри, що характеризують точкові об'єкти. У цій роботі не ставилось завдання розробки радіолокаційної карти контрасту як реальної, так і еталонної, в якій будуть враховані інформаційні параметри, що характеризують точкові об'єкти.

Пропонується інформативний параметр: H – висота точкового об'єкта. Висота точкового об'єкта визначається за часом t_H прольоту висоти об'єкта. Час t_H , у свою чергу, визначається як інтервал часу між моментом часу t_{ni} відеоімпульсу, відбитого від ділянки поверхні Землі, і відповідним моментом часу t_{oi} відеоімпульсу, відбитого від точкового об'єкта, і обчислюється за формулою

$$t_H = t_{ni} - t_{oi} = (n_{pi} - n_{oi}) T_{АПП} = n_H T_{АПП} , \quad (13)$$

де
$$i = 1, 2, 3, 4, \quad n_H = (n_{pi} - n_{oi}) . \quad (14)$$

Варто відзначити, що вибір у формулі (13) значень t_{ni} і t_{oi} , де $i = 1, 2, 3, 4$, визначає можливість їхнього виміру. Висота H точкового об'єкта визначається за формулою (4) у такий спосіб:

$$H = n_H \Delta l_d . \quad (15)$$

Висота точкового об'єкта є основний елемент при побудові рельєфу ділянки поверхні, що підстилає Землю. У цій роботі не ставиться завдання розробки методики зондування ділянки поверхні Землі таким чином, щоб можна було з інформаційними параметрами побудувати рельєф.

4. Висновки

Огляд доступних у відкритій літературі інформаційних джерел показав, що практично немає відомостей про розробки високоточних навігаційних радіолокаційних систем і навігацію по радіолокаційному полю ЛА на кінцевій ділянці траєкторії (близької до вертикальної до поверхні Землі). У даній роботі проведено дослідження можливості застосування радіолокаційної системи всепогодної навігації ЛА як на кінцевій ділянці траєкторії польоту, так і при польоті по горизонтальній траєкторії. З точки зору формування первинного радіолокаційного зображення, відомі два типи сканування ділянки поверхні Землі і об'єктів: сканування в режимі синтезованої апертури антени і сканування в режимі реальної апертури. Оцінка цих режимів показала, що вимогам поставленого завдання задовольняє сканування в режимі реального часу. Кінцевим продуктом цифрової обробки сформованого первинного РЛП, отриманого скануванням у режимі реального часу, є радіолокаційна карта контрасту. Їй властива нестабільність, викликана тим, що в основі карти контрасту лежить залежний від погодних, сезонних умов, візування прийнятого відбитого сигналу і характеристик РРА, інформаційний параметр відбитого сигналу від ділянки поверхні Землі, а саме інтенсивність відбитого сигналу. Освоєння АЦП гігагерцового діапазону частот відкрило нові можливості в пошуку інформаційних параметрів відбитого сигналу від ділянки поверхні Землі і об'єктів, менш залежних від впливу зовнішніх факторів. Пошук у відкритій пресі матеріалів за даною темою показав, що це є практично не досліджена область. У роботі виконано пошук інформаційних параметрів, які характеризують відеоімпульс (огиначаючи відбитого зондуючого сигналу) від ділянки поверхні землі і об'єктів, що піднімаються над поверхнею. Розглянуто окремі випадки, що охоплюють всі поєднання ділянки поверхні і об'єктів, розташованих на ній. Отримані такі результати. Інформаційні параметри - інтенсивність відбитого сигналу від об'єкта, дальність від літального апарата до ділянки поверхні Землі. Метод побудови радіолокаційної карти контрасту за інтенсивністю відбитих сигналів від ділянки поверхні Землі і об'єктів. Побудова еталона радіолокаційної карти контрасту з урахуванням об'єктів є окреме завдання. Параметр тривалості переднього і заднього фронтів відеоімпульсу як відбитого від ділянки поверхні Землі, так і об'єктів. Тривалість фронту залежить від фізичних (електрофізичних) властивостей підстильної поверхні Землі і об'єктів і не залежить від характеристик РРА. Для визначення зв'язку між тривалістю фронту і фізичними параметрами ділянки поверхні Землі і об'єктів потрібні експериментальні дослідження. Пропонується при горизонтальній траєкторії або близькій до неї будувати карту рельєфу ділянки поверхні Землі за дальністю від ЛА до поверхні Землі. Запропоновано стабільні (незалежні від зовнішніх умов) інформаційні параметри:

1. Висота об'єкта.
2. Висота нахилу підстильної поверхні Землі.

Ці параметри є основними елементами побудови цифрової тривимірної карти місцевості. Побудова карти місцевості є окреме незалежне завдання. Отримані результати слід розглядати як вихідний матеріал для теоретичних і практичних досліджень в області розробки всепогодної високоточної навігаційної радіолокаційної системи.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Антимиров В.М. Разработка базового алгоритма подсистемы коррекции по геофизическим полям. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2007. № 1. С. 130–137.
2. Бердышев В.И., Костоусов В.Б. Навигация движущихся объектов по геофизическим полям. *Современная математика и её приложения*. Тбилиси: Институт кибернетики АН Грузии, 2005. Т. 26. С. 15–42.

3. Гасилов В.Л., Костоусов В.Б., Кукушкин А.П. Идентификация состояния движущегося объекта по наблюдениям геофизических полей. *Труды Института математики и механики УрО РАН*. 2006. Т. 12, № 2. С. 53–63.
4. Дешнер А.И. Анализ и синтез алгоритмов высокоточной морской навигации по геофизическим полям: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Владивосток, 2004. 20 с.
5. Юкин С.А. Формирование и обработка радиолокационного изображения поверхности Земли при маловысотном полёте: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Рязань, 2010. 20 с.
6. Соколов А.В., Чеканов Р.Н. Моделирование дальности миллиметровых радиолокационных станций в дождях. URL: <http://jre.cplire.ru/iso/dec02/2/text.html>.
7. Мачнев А.М. Определение угла поворота при наложении изображений с использованием смешанной системы координат. *Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2010. № 42. С. 40–45.
8. Костоусов А.В., Костоусов В.Б. Высокоточная навигация движущихся объектов по радиолокационным изображениям. *Труды ИММ УрО РАН*. 2005. Т. 11, N 1. С. 139–148.
9. Костоусов А.В. Задача навигации по радиолокационным изображениям точечных ориентиров: автореф. дис. ... канд. ф.-м. наук. Екатеринбург, 2006. 19 с.
10. Киреев С.Н., Исаев А.Ю., Нестеров Ю.Г., Пономарев Л.И., Цыганков М.В. Способ навигации летательного аппарата по радиолокационным изображениям земной поверхности с использованием цифровых моделей местности: пат. RU 2364887 С2.
11. Романов А.А. Автоматическое совмещение радиолокационных изображений земной поверхности при отсутствии географической привязки: материалы XI Всероссийской науч.-практ. конф. и VII молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». Ростов-на-Дону, 2016. Т. 1. С. 359–360.
12. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1983. 536 с.
13. Волобеев В.П., Клименко В.П., Лосев В.Д. Компьютерная система обработки сигналов, управления, отображения и контроля двухкоординатной радиолокационной станции кругового обзора. *Математичні машини і системи*. 2005. № 3. С. 67–80.
14. Волобеев В.П., Клименко В.П., Лосев В.Д. Радиолокационная станция воздушного (морского) базирования, работающая в динамически сложных внешних условиях. *Математичні машини і системи*. 2005. № 4. С. 131–142.
15. Бондаренко Е.А., Волобеев В.П., Клименко В.П. Стелс-технологии в кораблестроении и методы противодействия радиолокационных станций берегового (морского, воздушного) базирования. *Математичні машини і системи*. 2006. № 4. С. 73–82.
16. Клименко В.П., Волобеев В.П., Лосев В.Д. Комп'ютерна система обробки сигналів, керування, відображення і контролю двокоординатної радіолокаційної станції кругового огляду. *Стан та перспективи розвитку інформатики в Україні*: колективна монографія. Київ: Наукова думка, 2010. С. 952–959.
17. URL: https://www.analog.com/ru/parametricsearch/11814#/Стандартные_быстродействующие_АЦП_со_скоростью_>20_MSPS_*3ггц_12_разрядов.
18. Павельев В.А., Хаминов Д.В. Рассеяние электромагнитных волн миллиметрового диапазона природными и антропогенными объектами / под ред. д-ра техн. наук В.Л. Солунина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 277 с.
19. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: учебник для вузов. М.: Радиотехника, 2004. 320 с.
20. Верба В.С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Состояние и тенденции развития. М.: Радиотехника, 2008. 442 с.
21. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
22. Скрыпник О.Н., Лежанкин Б.В., Миронов Б.М., Малисов Н.П. Формирование радиолокационной карты подстилающей поверхности путем фильтрации случайных полей. *Научный вестник МГТУ. Радиопизика и радиотехника*. 2008. № 133. С. 60–66.

Стаття надійшла до редакції 05.07.2021