

3. *Марченко Б.Г.* Лінійні періодичні процеси // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – К.: ІЕД НАНУ, 1999. – С. 172-185.
4. *Луценко С.А.* Розвиток теорії моделювання та обробки циклічних сигналів в інформаційних системах: Автореферат дисертації на здобуття д.т.н. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2010. – 36 с.
5. *Щербак Т.Л.* Інформаційна технологія діагностики динаміки процесів електроспоживання організацій у штатному і нештатному режимах: Автореферат дисертації на здобуття к.т.н. – К.: НАУ, 2010. – 20 с.
6. *Марценко С.В.* Математичне моделювання та статистичні методи обробки вимірювань в задачах моніторингу електронавантаження: Автореферат дисертації на здобуття к.т.н. – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. – 20 с.

Поступила 11.9.2013р.

УДК 621.396.96

Д. П. Пашков, Ю. Б. Прібилєв, м. Київ

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ З СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ

Abstract. The article refers to the capabilities of modern radar systems with synthetic aperture. They are widely used in aerospace monitoring systems for remote sensing of the Earth.

Key words: remote sensing of land, radar, synthetic aperture antenna.

Актуальність. Сучасні радіолокаційні засоби, що встановлюються на літаках і космічних апаратах, в даний час представляють один з сегментів радіоелектронної техніки, що найбільше інтенсивно розвиваються [1, 2, 3]. Основні відмінності між космічними та авіаційними радіолокаційними станціями (РЛС) полягають в принципах обробки радіолокаційного сигналу, пов'язаними з різним розміром апертури, особливостями поширення радіолокаційних сигналів в різних шарах атмосфери, необхідністю обліку кривизни земної поверхні і т.і.

Оснoву супутникових систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з використанням РЛС із синтезованою апертурою (РСА) складають розробки методів і апаратури, що забезпечують формування радіолокаційних зображень земної поверхні з високим просторовим розрізненням, які служать інформаційним забезпеченням при вирішенні широкого кола завдань наукового, народногосподарського та оборонного характеру [1, 2]. Отримання таких радіолокаційних зображень стало можливим внаслідок розробки і практичного освоєння специфічного методу радіолокації - методу

синтезу апертури антени. Незважаючи на складності обробки сигналів і відмінності аерокосмічних систем, розробники РЛС із синтезованою апертурою докладають всі зусилля для того, щоб добитися максимальної схожості можливостей даних засобів спостереження.

В даний час бортові РСА дозволяють вирішувати завдання видового спостереження (вести зйомку земної поверхні в різних режимах), селекції мобільних і стаціонарних об'єктів, аналізу змін наземної обстановки, здійснювати зйомку об'єктів, прихованих у лісових масивах, виявлення надповерхових та малорозмірних морських об'єктів [3, 4]. Таким чином, інформативність сучасних космічних РСА з метровим і субметровим просторовим розрізненням, особливості взаємодії радіохвиль з об'єктами спостереження, можливість оперативного отримання інформації незалежно від часу доби і метеорологічних умов, і, нарешті, глобальне охоплення районів зйомки дозволяють зробити висновок щодо актуальності задачі використання космічних засобів радіолокаційного спостереження для вирішення завдань видового спостереження (у поєднанні з інформацією від оптоелектронних датчиків).

Постановка задачі. Виявлення об'єктів у надповерхневих та підповерхневих шарах Землі необхідно для вирішення широкого кола завдань пов'язаних з геологічною розвідкою, пошук корисних копалин, картографування і контроль прокладених комунікацій, моніторингу галузей техногенних та екологічних катастроф та інше.

Рішення завдання підповерхневого картографування з прийнятною роздільною здатністю утруднено двома основними причинами: великим загасанням радіохвиль у підповерхневої середовищі на високих частотах (довжини хвиль близько $4 \text{ см} \div 21 \text{ см}$) і наявністю заважає зображення верхнього шару земної поверхні. Проведемо аналіз отриманих результатів і узагальнимо отримані дані.

Вирішення задачі. Розглянемо принципи та особливості функціонування РСА. За рахунок штучного збільшення апертури бортової антени, основний принцип якого полягає в когерентному накопиченні відображених радіолокаційних сигналів на інтервалі синтезування, вдається отримати високий розрізнення по куту. У сучасних системах розрізнення може досягати десятків сантиметрів при роботі в сантиметровому діапазоні довжини хвиль. Аналогічні значення розрізнення по дальності досягаються за рахунок застосування лінійно-частотної модуляції (ЛЧМ). Інтервал синтезування апертури антени прямо пропорційний висоті польоту носія РСА, що забезпечує незалежність дозволу зйомки від висоти [2, 4].

В даний час існують декілька основних режимів зйомки земної поверхні: оглядовий, що сканує, детальний, інверсний синтезування апертури і інтерферометричний. Розглянемо особливості кожного окремо.

В оглядовому режимі зйомка земної поверхні здійснюється безперервно в смузі захоплення, при цьому поділяють бічний і передньобічний режим (залежно від орієнтації головного пелюстка діаграми спрямованості антени) [4].

Накопичення сигналу здійснюється протягом часу, рівного розрахунковому інтервалу синтезування апертури антени для даних умов польоту носія РЛС.

Режим зйомки, що сканує, відрізняється від оглядового тим, що зйомка ведеться на всій ширині смуги огляду, смугами рівними ширині смуги захоплення. Даний режим використовується виключно в РЛС космічного базування.

При зйомці в детальному режимі накопичення сигналу здійснюється на збільшеному в порівнянні з оглядовим режимом інтервалі. Збільшення інтервалу здійснюється за рахунок синхронного з рухом носія РЛС переміщення головного пелюстка діаграми спрямованості антени таким чином, щоб ділянка, що опромінюється, постійно перебувала у зоні зйомки.

Сучасні системи дозволяють отримувати знімки земної поверхні та розташованих на ній об'єктів з розрізненням порядку 1 м для оглядового і 0,3 м для детального режимів.

Істотне значення на результуючі характеристики РСА (у плані зйомки земної поверхні) роблять застосовувані методи цифрової обробки прийнятого сигналу, важливою складовою яких є адаптивні алгоритми корекції траєкторних спотворень. Саме неможливість витримувати протягом тривалого часу прямолінійну траєкторію руху носія не дозволяє отримувати в безперервному оглядовому режимі зйомки розрізнення, що можуть порівнюватися з детальним режимом, хоча ніяких фізичних обмежень на розрізнення в оглядовому режимі не існує.

Режим інверсного синтезування апертури (ІРСА) дозволяє здійснювати синтезування апертури антени не за рахунок руху носія, а за рахунок руху опромінюваного об'єкту [1, 3]. При цьому мова може йти не про поступальний рух, що характерний для наземних об'єктів, а про маятниковий рух (у різних площинах), що характерний для плавучих засобів. Дана можливість визначає основне призначення ІРСА - виявлення та ідентифікація морських об'єктів. Характеристики сучасних ІРСА дозволяють впевнено виявляти навіть малорозмірні об'єкти, у тому числі підводні об'єкти [2, 4]. Вести зйомку в даному режимі мають можливість всі літаки, що перебувають на озброєнні ЗС США та інших держав, в завдання яких входить патрулювання берегової зони і акваторій. Одержувані в результаті зйомки зображення за своїми характеристиками аналогічні зображенням, що одержані у результаті зйомки з прямим (неінверсним) синтезом апертури.

Режим інтерферометричної зйомки (Interferometric SAR - IFSAR) дозволяє отримувати тривимірні зображення земної поверхні. При цьому сучасні системи мають можливість вести однокрапкову зйомку (тобто використовувати одну антену) для отримання тривимірних зображень. Для характеристики даних зображень крім звичайного розрізнення вводиться додатковий параметр - точність визначення висоти, або розрізнення по висоті [4].

Крім радіолокаційної зйомки відкритих ділянок земної поверхні, бортова РЛС має можливість отримувати зображення сцен, прихованих від очей спостерігача. Зокрема, вона дозволяє виявляти об'єкти, приховані в

лісових масивах, а також, що знаходяться під землею [3]. Таким чином, в останні роки оформилася в якості самостійного наукового напрямку нова галузь радіотехніки - проникаюча радіолокація, яка стає важливим інструментом при дистанційному зондуванні земної поверхні.

Проникаюча РЛС (GPR, Ground Penetrating Radar) - система ДЗЗ, принцип дії якої базується на обробці сигналів, відбитих від деформованих (або різноманітних за своїм складом) ділянок, що перебувають в однорідному (або відносно однорідному) обсязі [3]. Система зондування земної поверхні дозволяє виявляти порожнечі, тріщини, заглиблені об'єкти, виявляти ділянки різної щільності, виділення об'єктів в ґрунті. При цьому енергія сигналу, що віддзеркалений, сильно залежить від поглинаючих властивостей ґрунту, розмірів і форми об'єкту, ступеню неоднорідності граничних областей. В даний час GPR крім комерційної спрямованості розвинувся в вигідну військово-прикладну технологію.

Для поверхонь з низькою діелектричною проникністю (сухий ґрунт, пісок, сніг можливо віддзеркалення від підповерхневих шаруватих структур - проникаюча здатність радіохвиль залежить від коефіцієнтів загасання радіохвиль в середовищі поширення, значення яких наведені в табл. 1), особливо при зондуванні на дециметрових або метрових хвилях [1, 2]. На рис. 1 показані деякі приклади ситуацій, що зустрічаються при підповерхневому зондуванні: горизонтальна шарувата структура, компактний об'єкт (сфера), що розсіює і шорстка поверхня під гладкою межею повітря/середа, що пропускає. Розрахунки сумарних сигналів, відбитих від кордонів середовищ, а головне поділ віддзеркалень від верхньої поверхні і заглиблених утворень, у загальному випадку є складним завданням.

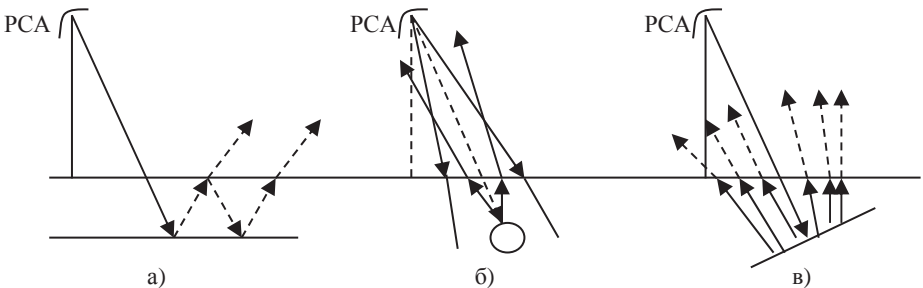


Рис. 1. Геометрія відбиття від глибинних об'єктів з високою провідністю або діелектричної постійній при підповерхневому зондуванні різних середовищ, де: а - плоска горизонтальна поверхня; б - сфера; в - похила шорстка поверхня.

Простіші ситуації виявлення об'єктів і контроль їх геометрії (наприклад, продуктопроводів) під сніговим покривом, побудова карт рельєфу територій, що покриті лісом, не вимагають спеціальних алгоритмів пошарового дешифрування. Навіть в L-діапазоні хвиль роздільна здатність радіолокаційного зображення становитиме близько 10 м.

Особливі перспективи має зондування з застосуванням відеоімпульсного РСА при реалізації в низькочастотній (200 ... 400 МГц) області електромагнітного спектру роздільної здатності порядку 1,5 ... 2 м, що дозволить розділити відбиття від поверхневого шару і глибинних утворень. Зондування під різними кутами падіння дозволить застосувати технології томографічної обробки даних [3].

Таблиця 1.

Коефіцієнт загасання радіохвиль в різних середовищах, дБ/м

Об'єкт спостереження		Довжина хвилі РЛС, см				
		3	10	30...60	100	300
Сніг						
Прісний лід		1,3...2,0				
Морський лід, температура:	-50	270...540	0,3		0,036	
	-400	14...45	0,2...0,48	0,8...0,7	0,6	0,3
Мерзлий ґрунт						0,8...4,2
Кварцовий пісок		1,7...2,0				
Піщаний ґрунт, вологість:	3%	300	25	6...3	2	0,8
	12%	1100	90	20...1	8	
Глинистий ґрунт, вологість:	3%	300	30	30...20	18	
	12%	1400	200	100...80	60	
Сільськогосподарські культури		2...10	1,8...2,5	0,8...1,8	0,07	0,03
Ліси		1,5...2,5	0,35	0,12...0,2	0,07	0,03

При цьому зондування земної поверхні краще робити шляхом опромінення імпульсами з частотою 10 МГц - 1,5 ГГц. Антена, що опромінює, може перебувати на земній поверхні або розташована на борту літального апарату. Частина енергії опромінення відбивається від змін у підповерхневої структурі землі, більша ж частина проникає далі в глибину. Відбитий сигнал приймається, обробляється, і результати обробки відображаються на дисплеї. При русі антени генерується безперервне зображення, що відбиває стан підповерхневих шарів ґрунту. Так як фактично відображення відбувається через відмінності діелектричних проникностей різних речовин (або різних станів однієї речовини), то зондуванням можна виявляти велику кількість природних і штучних дефектів у однорідної масі підповерхневих шарів. Глибина проникнення залежить від стану ґрунту на місці опромінення, від потужності імпульсу і відбивної здатності середовища (об'єкта). Зменшення амплітуди сигналу (поглинання або розсіяння) значною мірою залежить від ряду властивостей ґрунту, основне з яких - її електропровідність. Так, оптимальними для зондування є піщані ґрунти. Набагато менш придатні для цього глинисті і дуже вологі ґрунти. Хороші результати показує зондування сухих матеріалів, таких як граніт, вапняк, бетон.

Розрізнення при зондуванні може бути покращено за рахунок підвищення частоти випромінюваних хвиль. Однак збільшення частоти негативно позначається на глибині проникнення випромінювання. Так, сигнали з частотою

500-900 МГц можуть проникати на глибину 1-3 м і забезпечують розрізнення до 10 см, а з частотою 80-300 МГц проникають на глибину 9-25 м, але розрізнення складає близько 1,5 м. Крім цього бортові РЛС можуть застосовуватися для виявлення і стеження за об'єктами, прихованими в лісових масивах, що дозволяє виявляти малорозмірні об'єкти (рухомі та стаціонарні), приховані кронами дерев. Розрізнення зйомки залежить від частоти і варіюється від 10 м при частоті 20-50 МГц до 1 м при частоті 200-500 МГц [4, 5].

Обробка радіолокаційних зображень. Сучасні методи аналізу зображень дозволяють з досить високою ймовірністю виявляти і виробляти подальшу ідентифікацію об'єктів на отриманому радіолокаційному зображенні. При цьому виявлення можливо на знімках як з високим (менше 1 м), так і з низьким (до 10 м) розрізненням, у той час як для розпізнавання потрібні зображення з досить високим (порядку 0,5 м) розрізненням. І навіть у цьому випадку можна говорити в більшій частині тільки про розпізнавання за непрямыми ознаками, оскільки геометрична форма об'єкту дуже сильно спотворена через наявність сигналу, відбитого від листяного покриву, а також внаслідок появи сигналів зі зміщенням частоти за рахунок доплерівського ефекту, що виникає в результаті коливання листя на вітрі.

Перший рівень передбачає виявлення значних змін і ґрунтується на аналізі амплітудних відліків зображення, що несуть основне візуальну інформацію. Найчастіше в цю групу відносяться зміни, які зможе побачити людина, переглядаючи одночасно два сформованих радіолокаційних зображення. Другий рівень базується на аналізі фазових відліків і дозволяє виявляти зміни, невидимі людському оку. До таких можна віднести появу слідів (машини або людини) на дорозі, зміна стану вікон, дверей («відкрито - закрито») і т.і.

При аналізі фазової картини велику роль відіграє вибір порога спрацьовування детектора. При низькому порозі спрацьовування буде здійснюватись детектування великої кількості паразитних змін, аж до коливання трави на вітрі, що призведе до неможливості отримання потрібної інформації про стан району. Крім того, при низькому порозі будуть позначатися похибки, пов'язані з неоптимальним поєднання зображень, так як жоден алгоритм в даний час не дає абсолютно точної прив'язки одного зображення до іншого.

Перспективні напрями. Однією з цікавих можливостей РСА, є радіолокаційна відеозйомка. У даному режимі дискретне формування апертури антени від дільниці до дільниці, характерне для безперервного оглядового режиму, замінено на паралельне багатоканальне формування. Тобто в кожен момент часу синтезується не одна, а кілька (кількість залежить від розв'язуваних завдань) апертур. Свого роду аналогом кількості сформованих апертур є частота кадрів у звичайній відеозйомці. Дана можливість дозволяє реалізовувати селекцію рухомих об'єктів на базі аналізу отриманих радіолокаційних зображень, застосовуючи принципи когерентного детектування, що є за своєю суттю альтернативою стандартним РЛС, що здійснює селекцію рухомих об'єктів на основі аналізу доплеровських частот у прийнятому сигналі. Ефективність реалізації подібних селекторів рухомих об'єктів досить сумнівна з огляду на

значні апаратно-програмних витрат, тому подібні режими з великою ймовірністю так і залишаться не більше ніж витонченим способом вирішення завдання селекції, незважаючи на можливості відрізнити об'єкти, що рухаються з дуже низькими швидкостями (менше 3 км/год). Безпосередньо відеозйомка в радіолокаційному діапазоні в даний час також не знайшла застосування, знову ж через високі вимоги до швидкодії, тому діючих різних зразків техніки, що реалізують на практиці даний режим, немає.

Логічним продовженням вдосконалення техніки зйомки земної поверхні в радіолокаційному діапазоні є розвиток підсистем аналізу отриманої інформації. Зокрема, важливе значення набуває розробка систем автоматичного аналізу радіолокаційних зображень, що дозволяють виявляти виділяти і розпізнавати наземні об'єкти, що потрапили в зону зйомки. Складність створення подібних систем пов'язана з когерентної природою радіолокаційних зображень, явища інтерференції і дифракції в яких призводять до появи артефактів - штучних відблисків, аналогічних тим, які з'являються при опроміненні об'єкту з великою ефективною поверхнею розсіяння. Крім того, якість зображення радіолокації трохи нижче, ніж якість аналогічного (за дозволом) оптичного зображення. Все це призводить до того, що ефективних реалізацій алгоритмів розпізнавання об'єктів на радіолокаційних зображеннях в даний час не існує, але кількість робіт, що проводяться в даній області, певні успіхи, досягнуті останнім часом, дозволяють припустити, що в недалекому майбутньому можна буде вести мову про інтелектуальні безпілотні бортові апарати, що мають можливість робити оцінку наземної обстановки за результатами аналізу інформації, отриманої власними бортовими радіолокаційними засобами.

Іншим напрямком розвитку є комплексування, тобто узгоджене об'єднання з подальшої спільної обробкою, інформації від декількох джерел. Це можуть бути РЛС, що ведуть зйомку в різних режимах, або РЛС та інші засоби спостереження (оптичні, ІК, багатоспектральні і т. і.).

Висновки. Таким чином, сучасні РЛС з синтезом апертури антени дозволяють вирішувати широкий спектр завдань, пов'язаних з веденням радіолокаційної зйомки земної поверхні і підповерхнею незалежно від часу доби і погодних умов, що робить їх важливим засобом добування інформації про стан об'єктах спостереження.

1. *Алябьев А.А.* Использование материалов радиолокационной космической съемки для информационного обеспечения мониторинга пространственных данных / А.А. Алябьев, В.Т. Коберниченко // Геодезия и картография. – 2007. – NQ5, с. 37-45.
2. *Финкельштейн М.И.* Подповерхностная радиолокация / М.И. Финкельштейн, В.И. Карпунин, В.А. Кутев, В.Н. Метелкин; под ред. М.И. Финкельштейна. // – М.: Радио и связь, 1994. – 216 с.
3. *Мионов В. Л.* Изучение диэлектрических свойств влажных почвогрунтов в СВЧ диапазоне / В.Л. Мионов, С.А. Комаров, Н.В. Рычкова, В.Н. Клещенко // Исследование земли из космоса. – 1994. – №4. – С. 18-24.
4. *Сугак В. Г.* Оценка возможности обнаружения подповерхностных слоистых неоднородностей при зондировании с поверхности земли / В.Г. Сугак // Радиофизика,

1997. – т. 40, № 8. – С. 952 - 962.

5. *Кондратьев К.Я.* О возможности определения характеристик поверхностного слоя почвы по его тепловому радиоизлучению / К.Я. Кондратьев, Ю.М. Тимофеев, Е.М Шульгина // Докл. АН СССР. – Т.194, №6. – С. 1313-1315.

Поступила 16.9.2013р.

УДК 621.56 : 629.7

А. А. Чирва, м. Киев

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ, УСТАНОВЛИВАЕМЫХ В СИСТЕМАХ ПОДГОТОВКИ ВОЗДУХА ПАССАЖИРСКИХ И ТРАНСПОРТНЫХ САМОЛЕТОВ

Abstract. The article presents the basic relations for modeling of thermal processes in heat exchangers used in air treatment systems, and describes some of the features of these devices, which are not taken into account in the simulation, but significantly affect the outlet temperature of heat exchanger.

Актуальность. Для регулирования температур в технических системах применяются теплообменные аппараты, которые в зависимости от взаимного направления течения теплоносителей могут быть прямоточными, противоточными и перекрестноточными. В системах подготовки воздуха (СПВ) для охлаждения отбираемого от двигателя горячего воздуха применяют, в основном, пластинчатые или пластинчато-ребристые теплообменники. Конструктивно они состоят из набора пластин, расположенные одна от другой на некотором расстоянии. Для повышения теплоотдачи и направления потоков воздуха строго по осям теплообменников между пластинами устанавливают оребрение.

При расчетах тепловых и гидравлических характеристик обычно принимается допущение, что тепловые потери в окружающую среду пренебрежимо малы. Теплообменник рассматривается как двухпоточный, т.е. рассматривается только передача тепла от горячего теплоносителя к холодному. Эксперименты, проводимые непосредственно на самолете при различных режимах полета и различных режимах работы СПВ показали, что данное допущение справедливо только при больших значениях расхода воздуха отбираемого от двигателя. При небольших значениях расхода воздуха через горячую линию температура за теплообменником значительно отличалась от расчетных значений полученным по методикам, основанным на приведенных зависимостях. Различие расчетных данных с данными