

УДК 621.396.967

ФЕДОТОВ Б.М., старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, доцент

СЕРЯКОВ І.І., начальник відділу програмно-технічного забезпечення навчально-наукового центру іноземних мов Національного університету оборони України ім. Івана Черняховського

КОВТУН В.І., інженер

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ТРАЄКТОРНИХ СИГНАЛІВ ПРИ СИНТЕЗУВАННІ АПЕРТУРИ МЕТОДОМ ГАРМОНІЙНОГО АНАЛІЗУ

В статті обґрунтована можливість скорочення кількості опорних траєкторій при синтезуванні апертури за методом гармонійного аналізу, що дає можливість скоротити час на отримання радіолокаційного зображення

Ключові слова: синтезування апертури, гармонійний аналіз, віртуальні траєкторії, обробка

Скорочення часу отримання видового зображення ділянок місцевості з розрізнявальною здатністю, достатньою для вирішення задачі розпізнавання малорозмірних об'єктів, є актуальною на теперішній час, з огляду на те що час обробки траєкторної інформації, навіть при сучасному рівні розвитку обчислювальної техніки, не завжди задовольняє користувачів, особливо у військовій сфері. Проблема полягає в великому об'ємі обчислень для отримання високоякісного радіолокаційного зображення сцени знімання в масштабі часу близькому до реального.

Вирішення цієї проблеми на теперішній час здійснюється за двома напрямками. По-перше, це зменшення розміру площі знімання при надвисокому розрізненні. По-друге, це використання методу гармонійного аналізу (ГА) при покадровому (кадровому) синтезуванні апертури [1].

В той же час процес обробки за методом ГА передбачає множення первинно і попередньо оброблених відліків траєкторних сигналів каналів нахиленої дальності на опорні функції, що за своєю суттю є компенсацією відхилень від віртуальних дугових траєкторій синтезування апертури, які відрізняються для кожного каналу нахиленої дальності. Ця операція за своєю сутністю повторює елемент первинної траєкторної обробки, який полягає в компенсації траєкторних відхилень від визначеної, зазвичай прямолінійної траєкторії руху носія радіолокаційної станції із синтезуванням апертури (РСА).

Метою даної статті є розгляд можливості зменшення загального часу отримання радіолокаційного зображення (РЛЗ) в радіолокаційних станціях із

синтезуванням апертури за рахунок об'єднання в часі операцій компенсації траєкторних нестабільностей носія РСА та компенсації викривлення спектру функцій відбиття каналів нахиленої дальності. Це дозволить зменшити час обробки при синтезуванні апертури.

Відомий метод ГА [1] має найменший об'єм обчислень для отримання функції радіолокаційного відбиття при синтезуванні апертури. Обробка траєкторних сигналів за цим методом передбачає попередню фільтрацію відліків (усереднення та вагову обробку) і синтезування апертури за допомогою корекції фази прийнятих, попередньо оброблених сигналів та виконання швидкого перетворення Фур'є (ШПФ).

Розглянемо процес формування і обробки сигналів відбитих від блискучої точки. Відомо, що у випадку коли блискуча точка знаходиться на середній лінії каналу нахиленої дальності відносно центру каналу при дуговій траєкторії синтезування, різниця відстаней до цієї точки, що має координати $Q(x, \theta)$ (див. рис. 1), дорівнює [2]

$$\Delta r = r - r' = TQ - CQ = r_0 + \frac{x^2}{2r_0} + x \sin(\gamma) - r_0 - \frac{x^2}{2r_0} = x \sin(\gamma), \quad (1)$$

де r_0 – відстань до центру каналу при дуговій траєкторії синтезування за методом ГА; r – текуча відстань до блискучої точки на траєкторії синтезування апертури; γ – кут між лінією траверзу та напрямком на центр кадру з довільної точки на траєкторії синтезування апертури.

Для кутів синтезування менше $10^0 \dots 15^0$

$$\Delta r = \gamma \cdot x. \quad (2)$$

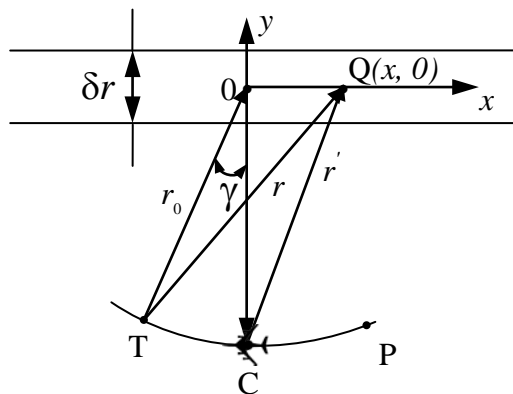


Рис. 1. Визначення функції $\Delta r(\gamma)$ при дуговій траєкторії синтезування

Визначимо зміну відстані до блискучої точки при її довільному знаходженні на ділянці знімання та траєкторії руху носія – дузі кола з центром у середині ділянки, що зондується (див. рис. 2).

$$(TM)^2 = r_0^2 + (OM)^2 + 2r_0 \cdot OM \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \gamma + \mu\right), \quad (2)$$

$$TM = r = r_0 \sqrt{1 + \frac{(OM)^2}{r_0^2} + \frac{2(OM)}{r_0} \sin(\gamma + \mu)} = r_0 + \frac{(OM)^2}{r_0} + (OM) \sin(\gamma + \mu). \quad (3)$$

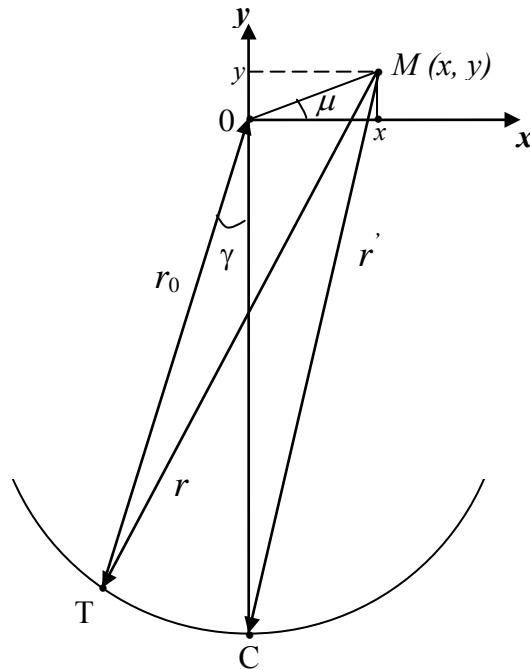


Рис. 2. Визначення функції $\Delta r(\gamma)$ для довільної точки $M(x, y)$ при телескопічному огляді та дуговій траєкторії синтезування апертури

$$\begin{aligned} \Delta r &= TM - CM = OM \cdot \sin(\gamma + \mu) - OM \cdot \sin \mu = OM \cdot \sin \gamma \cdot \cos \mu - \\ &- OM \cdot \sin \mu (1 - \cos \gamma) = OM \cdot \sin \gamma \cdot \frac{x}{OM} - OM \cdot \sin \mu \cdot 2 \sin^2\left(\frac{\gamma}{2}\right) = \\ &= x \cdot \sin \gamma - OM \frac{y}{OM} 2 \cdot \sin^2 \frac{\gamma}{2} \approx \gamma x - 0,5 y \cdot \gamma^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Зміна фази сигналу на дуговій траєкторії синтезування рівняється

$$\Delta \varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r = \frac{4\pi}{\lambda} (\gamma x - 0,5 y \gamma^2). \quad (5)$$

Визначимо максимально припустимий розмір кадру за нахиленою дальністю для дугової траєкторії синтезування апертури при одній опорній функції.

Зі співвідношення (5) для блискучої точки $M(x, y)$ різницева частота прийнятого та зондувального сигналів дорівнює

$$\Omega_{x,y} = \frac{dr}{d\gamma} = \frac{4\pi}{\lambda} (x - 0,5y\gamma). \quad (6)$$

Методологічна похибка в визначенні різницевої частоти прийнятого та зондувального сигналів не повинна перевищувати значення різниці різницевої частот від блискучих точок, які знаходяться одна від одної по координаті шляхової дальності на відстані, що дорівнює половині елементу розрізнення.

$$\text{Тобто} \quad 0,5\delta x = 0,5y\gamma \quad (7)$$

$$\text{та} \quad y_{\max} = \frac{\delta x}{\gamma_{\max}}. \quad (8)$$

Максимальний розмір кадру за нахиленою дальністю при використанні однієї віртуальної траєкторії синтезування дорівнює

$$\Delta R_{\max} = 2y_{\max} = \frac{2\delta x}{\gamma_{\max}}. \quad (9)$$

Максимальний кут візування, який відрховується від лінії траверзу, дорівнює половині кута синтезування апертури $\gamma_{\max} = 0,5\beta = \frac{\lambda}{4\delta x}$, а

$$\Delta R_{\max} = \frac{8(\delta x)^2}{\lambda}. \quad (10)$$

Тобто, одну дугову траєкторію синтезування апертури можливо та доцільно використовувати для декількох каналів нахиленої дальності, кількість яких дорівнює

$$m = \frac{\Delta R_{\max}}{\delta r}. \quad (11)$$

При $\delta r = \delta x$

$$m = \frac{8\delta x}{\lambda}. \quad (12)$$

Досягнута на теперішній час швидкодія бортових процесорів дозволяє в процесі синтезування апертури об'єднати операції компенсації траєкторних нестабільностей і компенсації фазових викривлень відліків спектру функції відбиття, що вимірюються на траєкторії синтезування в каналах нахиленої дальності.

Тобто, з'являється можливість перенести операцію множення на опорну функцію з 2-го етапу цифрової обробки, при синтезуванні апертури, на нульовий етап та здійснювати її одночасно з операціями виміру відбитих сигналів і компенсації траєкторних нестабільностей.

Структурна схема первинної обробки на етапі дискретизації і запам'ятовування відбитих сигналів наведена на рис. 3.

Визначимо лінійний інтервал дискретної зміни величини фазової корекції на траєкторії синтезування апертури. При його визначенні прийемо допустимою

різницю по фазі сигналів, що накопичуються при синтезуванні апертури $\Delta\varphi_{дон} = \pi/4$. Її відповідає допустиме відхилення від опорної траєкторії $\Delta r = \frac{\lambda}{16}$.

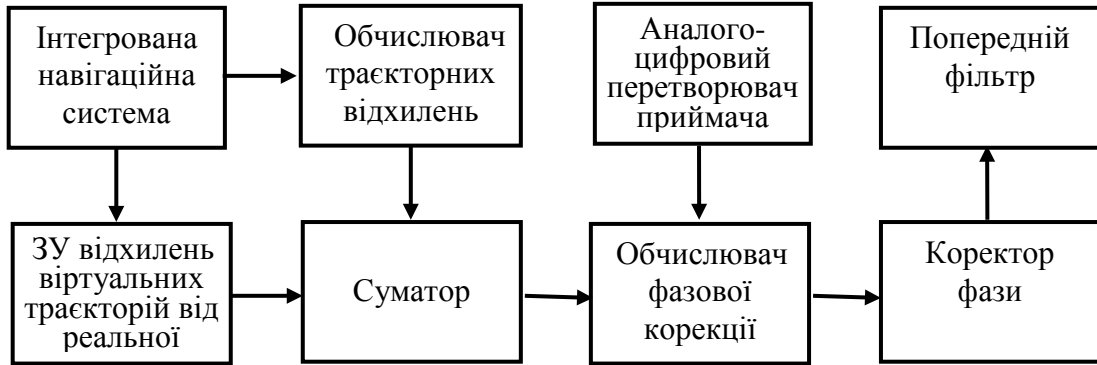


Рис. 3. Структурна схема первинної цифрової обробки прийнятих сигналів

Лінійний інтервал дискретизації ΔL_{max} на траєкторії синтезування можна визначити із співвідношення (див. рис. 4)

$$\Delta r = R_+ - R_- = \sqrt{R_0^2 + (x + \Delta L)^2} - \sqrt{R_0^2 + x^2} = \frac{(x + \Delta L)^2}{2R_0} - \frac{x^2}{2R_0} = \frac{\lambda}{16} \quad (13)$$

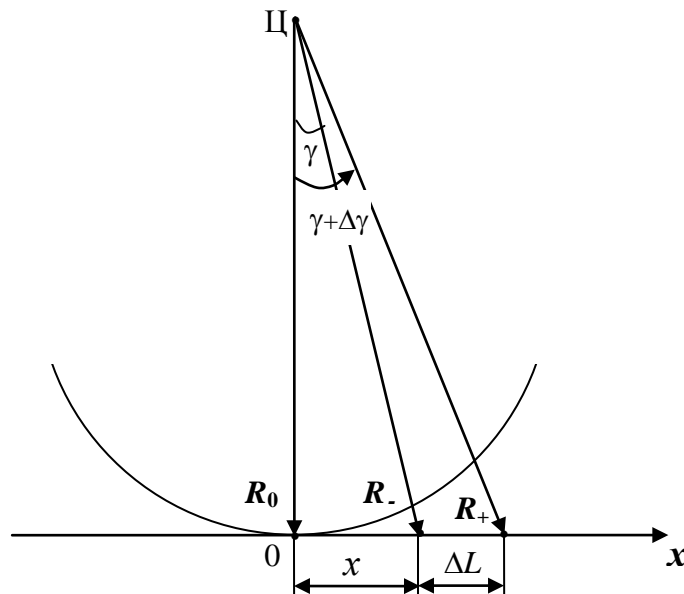


Рис. 4. Визначення мінімального значення максимально допустимого лінійного інтервалу шагу дискретних значень фази для корекції спектру функції відбиття

Визначимо ΔL_{max} із співвідношення (13)

$$\frac{\Delta L_{\max}^2}{2R_0} + \frac{x\Delta L_{\max}}{R_0} = \frac{\lambda}{16} . \quad (14)$$

Вирішуючи це квадратне алгебраїчне рівняння, отримаємо

$$\Delta L_{\max} = -x + \sqrt{x^2 + \frac{\lambda R_0}{16}} . \quad (15)$$

Максимально припустиме значення лінійного інтервалу дискретизації ΔL_{\max} є нелінійною функцією по траєкторії синтезування апертури. Мінімальне значення максимально припустимого інтервалу визначається із співвідношення (15) на краю інтервалу синтезування апертури L_c при $x = L_c/2$. При синтезуванні апертури антени за методом ГА воно дорівнює

$$(\Delta L_{\max})_{\min} = -\frac{R_0\lambda}{8\delta x} + \sqrt{\left(\frac{R_0\lambda}{8\delta x}\right)^2 + \frac{R_0\lambda}{16}} . \quad (16)$$

Виконання корекції відхилень від дугових віртуальних траєкторій синтезування апертури одночасно з компенсацією траєкторних нестабільностей дозволяє зменшити час обробки при синтезуванні апертури методом ГА.

Відносне зменшення часу на обробку сигналу у фільтрі синтезування дорівнює

$$\frac{N(\log_2 N + 1) - N \log_2 N}{N(\log_2 N + 1)} = \frac{1}{\log_2 N + 1} , \quad (17)$$

де N – кількість відліків сигналу в каналі, які використовуються при синтезуванні.

Для типової кількості відліків $2^{10} \dots 2^{12}$ скорочення часу обробки складає (9,1 ... 7,7)% .

Таким чином, використання однієї опорної траєкторії для декількох десятків каналів нахильної дальності в РСА з обробкою сигналів методом ГА дозволяє побудувати структуру смугової РСА з одночасним виконанням операцій компенсації траєкторних нестабільностей і компенсацією відхилень від віртуальних траєкторій синтезування апертури в реальному масштабі часу та скоротити загальний час обробки траєкторних сигналів на 8 ... 9% .

ЛІТЕРАТУРА

1. Федотов Б.М. Додаткові алгоритми радіолокаційних станцій синтезованої апертури надвисокого розрізнення та їх вплив на час ведення розвідки. /Федотов Б.М., Слюсарчук О.О. – НАУ, ЖВІРЕ ім. С.П. Корольова. Збірник наукових праць. Випуск 11. С. 108-117. 2011.
2. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры

антенны /В. Н. Антипов, В. Т. Горяинов, А. Н. Кулин и др. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.; ил.

3. Патент на корисну модель №73752. Україна. МПК G01S 13/90; G06F 7/00; G06F 15/00. Спосіб цифрової обробки траєкторних сигналів локатора з покадровим синтезуванням апертури. / Федотов Б.М., Слюсарчук О.О. Власник патенту Національний Університет оборони України; – № и 2012 02537; заявл. 02.03.12; опубл. 10.10.12, Бюл. №19.

Надійшла до редакції 29. 10. 2014 року