

# РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК: 621.396.1

С. В. Толлопа, д-р. техн. наук, доц.

## МЕТОД СИНТЕЗУ ТА ШВИДКІСНОЇ ОБРОБКИ ТРИВИМІРНИХ ЗОБРАЖЕНЬ В БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ СИСТЕМАХ РАДІОБАЧЕННЯ

*Запропоновано метод синтезу та швидкісної обробки тривимірних зображень в системах радіобачення з дистанційним пілотуванням групи носіїв бортових засобів локації. Використання методу дозволить покращити розділення системи радіобачення за азимутом у передньому секторі огляду системи та забезпечити зниження загальних обчислювальних витрат на формування та обробку радіолокаційних зображень об'єктів спостереження.*

### Вступ

На сьогодні існує низка науково-технічних проблем, які пов'язані зі складністю отримання радіозображень (РЗ) високого розділення і якості в різних режимах спостереження, у тому числі й у передній зоні огляду бортових радіолокаційних засобів (БРЛЗ) систем радіобачення (СРБ).

Вирішення проблеми формування якісного РЛЗ у вищевизначених умовах є на цей час актуальною науково-технічною задачею та передбачає використання досконаліших адаптивних алгоритмів цифрової обробки траєкторного сигналу й самого зображення. Це висуває особливі вимоги до бортового радіолокаційного комплексу (БРЛК), що забезпечує високу обчислювальну продуктивність (до 10 і більше мільярдів операцій у секунду). Крім того, в сучасних БРЛЗ СРБ [1–7]) на великій дальності й висоті польоту, висоту поверхні звичайно не враховують і первинне зображення отримують у вигляді матриці амплітуд відбитих сигналів  $A(i, j)$  у системі двох координат: дальність і доплерівська частота (або азимут). Однак на малих висотах, коли інформація про висоту поверхні стає істотною, такий підхід некоректний.

*Метою статті є розробка методу синтезу й обробки радіолокаційних зображень у передньому секторі огляду СРБ, який був би позбавлений зазначених вище недоліків.*

### Синтез та швидкісна обробка тривимірних зображень в багатопозиційних системах радіобачення

Відомо [1–4], що під час огляду БРЛЗ зони огляду в передньому секторі розділення за азимутом різко падає. Так, при куті огляду  $\theta_H = 6^\circ$  розділення за синтезованою апертурою (СА) в 10 раз гірше, ніж при бічному огляді (рис. 1).

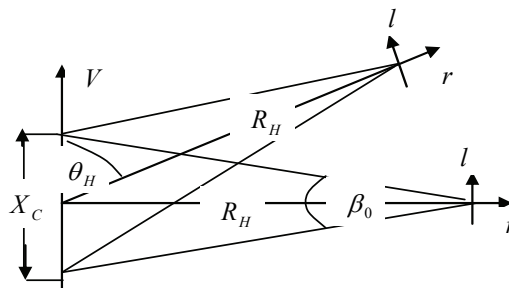


Рис. 1. Система координат сполученої приймально-передавальної антени БРЛЗ:

$X_c$  — розмір синтезованої апертури;  $R_H$  — проекція дальності спостереження на горизонтальну площину;

$\beta_0$  — кутовий розмір синтезованої апертури;  $\theta_H$  — кут огляду об'єкта спостереження

Тому в передньому секторі огляду розділення СА звичайно того ж порядку, що й розділення реальної антени. Наприклад, при  $\theta_H = 0^\circ$  розділення за кутом дорівнює:

$$\delta\theta_C = 1,3\sqrt{\frac{\lambda}{X_C}} = 1,3\sqrt{2\theta_{CO}} = 1,8\sqrt{\frac{\theta_0}{K_{3T}}}, \quad (1)$$

де  $\theta_{CO} = \lambda / 2X_C$  – ширина синтезованої діаграми спрямованості (ДС) при бічному огляді;  
 $K_{3T} = \theta_0 / \theta_{CO}$  – коефіцієнт стиску ДС у результаті синтезування при бічному огляді.

Як впливає з залежності (1), розділення за кутом у передньому секторі огляду  $\delta\theta_C$  стає рівним ширині реальної ДС  $\theta_0$  при  $K_{3T} = 3,4 / \theta_0$ . Так, при  $\theta_0 = 3,4 \cdot 10^{-2}$  рад ( $2^\circ$ ) синтезування апертури в передньому секторі огляду не дає вирашу в розділенні в порівнянні з реальною антеною при  $K_{3T} < 100$ .

Для отримання потрібного розділення в передньому секторі огляду доцільне використання багатопозиційних РСА, наприклад СРБ з керованою групою дистанційно пілотованих літальних апаратів (ДПЛА), які виконують функцію носіїв БРЛЗ (рис. 2). Реалізація алгоритмів управління груповим польотом ДПЛА дозволяє синтезувати площинну апертуру на необхідних, для потрібної роздільної здатності системи за азимутом, на визначених інтервалах часу.

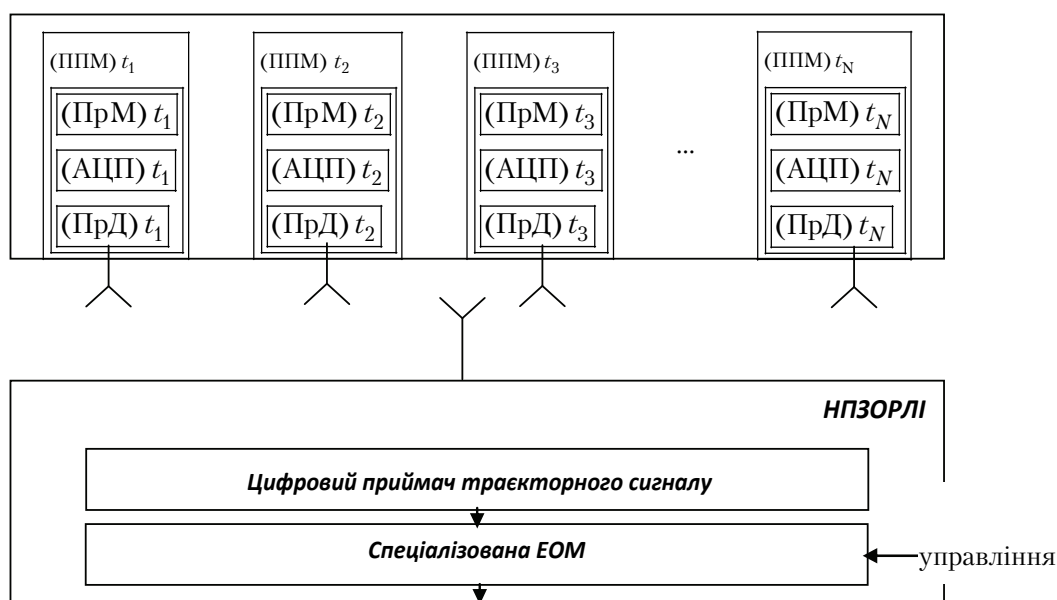


Рис. 2. Спрощена структурна схема СРБ з керованою групою ДПЛА:

$(\text{ППМ})_{t_k}$  – приймально-передавальний модуль БРЛС ДПЛА, який опромінює та приймає сигнал від об'єкта спостереження в момент часу  $t_k$  й, після аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналу з частотою дискретизації  $\nu_0$ , передає його на наземний пункт збору й обробки радіолокаційної інформації (НПЗОРЛІ)

Введення вхідного фільтра-дециматора до складу структури цифрового приймача на ПЗОРЛІ дозволяє знизити частоту дискретизації траєкторного сигналу в  $\nu_1$  раз (рис. 3).

Запропонований у статті метод дозволяє реалізувати формування й високошвидкісну обробку тривимірних зображень об'єктів моніторингу з підвищеним просторовим розділенням у передній зоні огляду. Метод полягає в створенні режиму порядкового огляду контрольованої ділянки простору керованою групою БРЛЗ у комбінації з вузькосмуговою доплерівською фільтрацією прийнятих сигналів, що дозволяє в кожному елементі розділення за дальністю розсікти просторові елементи розділення антени на частини (доплерівські елементи розділення – ДЕР), і формуванні матриці тривимірного РЗ поверхні у вигляді сукупності амплітуд відбитих сигналів, зафіксованих у ДЕР. При цьому за рахунок швидкого електронного

перемикання променя одного із БРЛЗ групи, промінь зміщується за азимутом й кутом місця порядково на ширину ДС у зоні огляду й при кожному  $K, L$ -му положенні променя за азимутом й кутом місця вимірюється амплітуда сигналу  $A(I, J)$  на виході  $J$ -го фільтра доплерівських частот в  $i$ -му елементі розділення за дальністю, тим самим отримується на безлічі значень  $I, J$  двовимірне зображення поверхні  $U_{kl}(i, j)$  ( $I = \overline{1, M}, J = \overline{1, N}$ ) у межах  $K, L$ -го променя БРЛЗ.

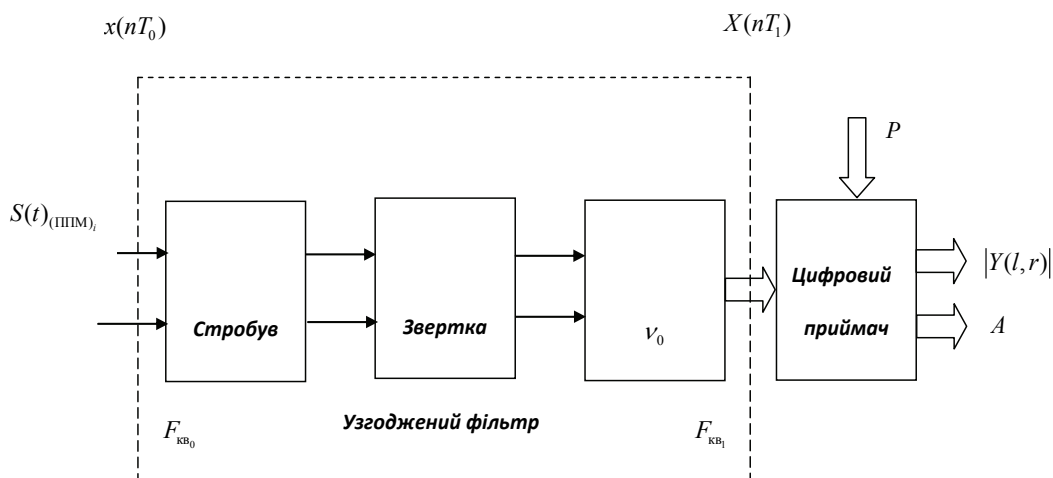


Рис. 3. Узагальнена структурна схема цифрового приймача траєкторного сигналу ПЗОРЛІ

Відмінність методу від існуючих полягає в тому, що для кожної обмірюваної при  $K, L$ -му положенні променя амплітуди  $U_{kl}(i, j)$ , що перевищує поріг виявлення, відбираються  $i, j, k$ -ті елементи дискретизації прямокутної сітки  $x_i, y_j, z_k$  (нумерація  $i, j, k$  відрізняється від нумерації  $I, J, K$ ), сферичні координати яких  $R, \varphi, \theta$  належать області  $K, L, I, J$ -го ДЕР, шляхом перевірки системи нерівностей

$$\begin{aligned} R_j - \Delta R / 2 \leq R \leq R_j + \Delta R / 2, \varphi_j - \Delta \varphi \leq \varphi \leq \varphi_j + \Delta \varphi; \\ \theta(\varphi) - \Delta \theta \leq \theta \leq \theta(\varphi) + \Delta \theta, \theta(\varphi) = \theta_j + b_j (\varphi - \varphi_j), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $R_j, \varphi_j, \theta_j$  — відомі сферичні координати центру  $I, J$ -го ДЕР, причому азимут  $\varphi_j$  відповідає  $J$ -му фільтру частот,  $\Delta R$  — розділення за дальністю,  $\Delta \varphi, \Delta \theta, b$  — відомі для кожного  $K, L$ -го положення променя параметри апроксимації ДЕР. Величина  $U_{kl}(I, J)$  запам'ятовується в матриці амплітуд  $A(i, j)$ , а максимальне значення третьої координати  $z_k$  (висоти) — у матриці  $Z(i, j)$ . Потім ці операції повторюються для всіх  $K, L$ -х положень променя й тим самим формується тривимірне зображення поверхні в зоні огляду у вигляді двовимірних матриць  $A\{i, j\}$  і  $Z\{i, j\}$ ,  $i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$ . Далі отримані матриці прив'язуються до поточного дискретного моменту часу  $t_\mu$ :  $A_\mu(i, j), z_\mu(i, j)$  й передаються послідовно ( $\mu = 0, 1, 2, \dots$ ) на алгоритми просторово-часової обробки для підвищення якості зображень і алгоритми індикації для виведення зображень на екран оператора розглянутої гіпотетичної системи радіобачення.

Передбачається отримання тривимірного зображення поверхні в сферичній системі координат. При цьому для кожної обмірюваної амплітуди  $U_{kl}(I, J)$ , що перевищує поріг виявлення, вибираються  $i, j, k$ -ті елементи дискретизації сферичної сітки, координати яких  $R_j, \varphi_j, \theta_j$  (дальність, азимут, кут місця) належать області ДЕР, і запам'ятовуються величини  $A_{kl}(I, J)$  в матриці амплітуд  $A(i, j)$ , а значення  $\theta_k$  — у матриці третіх координат (кутів місця)  $\theta_{ij}$ . Потім ці операції повторюються для всіх  $K, L$ -х положень променя й тим самим формується тривимірне зображення поверхні в зоні огляду  $A(i, j), \theta(i, j), i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$  в місцевій сферичній системі координат. Отримані матриці  $A(i, j), \theta(i, j)$  передаються на алгоритми

індикації для виведення зображення на екран оператора СРБ.

Алгоритмічно запропонований метод здійснюється у такий спосіб.

1. При кожному  $K, L$ -му положенні променя за азимутом й кутом місця сигнал, що надходить до кожної БРЛЗ групи, в  $I$ -му стробі дальності ( $I = 1, M$ ) після аналого-цифрового перетворення та підсилення на частоті дискретизації  $F_{\text{кв}0}$  передається за допомогою цифрової лінії зв'язку на НПЗОРЛІ СРБ. В ПРМ НПЗОРЛІ сигнал від  $i$ -ї БРЛЗ подається на вхід  $N$  доплерівських фільтрів, у яких здійснюється селекція за частотою. При цьому виконується операція децимації, що передбачає зниження частоти дискретизації в  $\nu_0$  раз до частоти повторення зондуючих імпульсів  $F_{\text{кв}1}$  (у діапазоні від 6,4 кГц до 0,8 кГц в залежно від дальності до об'єкту спостереження).

2. Амплітуда сигналу на виході кожного  $J$ -го фільтра ( $J = 1, N$ ) запам'ятовується в матриці  $U_{kl}(I, J)$  амплітуд  $K, L, I, J$ -го синтезованого просторового елемента розділення.

3. Послідовно в процесі формування матриці  $U_{kl}(I, J)$  щодо кожного  $K, L, I, J$ -го ДЕР, амплітуда якого  $U_{kl}(I, J)$  перевищує поріг виявлення (відповідає відбиттю від поверхні, яка підлягає моніторингу) будується просторовий строб у тривимірній прямокутній системі координат  $x, y, z$  з  $i, j, k$ -ми елементами дискретизації, розміри яких на площині  $x, y$  менше проєкції мінімального ДЕР.

4. Для кожного  $i, j, k$ -го елемента дискретизації в стробі перевіряється належність його координат  $x_i, y_j, z_k$   $K, L, I, J$ -му ДЕР шляхом зіставлення сферичних координат  $R, \varphi, \theta$  точки  $x_i, y_j, z_k$  із границями області  $D$   $K, L, I, J$ -го ДЕР, встановленими заздалегідь у сферичній системі координат кожного ДПЛА з урахуванням вектора швидкості руху носія (носіїв) шляхом перевірки виконання системи нерівностей (2).

5. Якщо  $i, j, k$ -й елемент дискретизації з координатами центру  $x_i, y_j, z_k$  належить області  $D$ , то амплітуда  $U_{kl}(I, J)$  й координата  $z_k$  запам'ятовуються відповідно в матрицях  $A(i, j)$  і  $Z(i, j)$ , де символ  $Z$  позначає третю координату або висоту  $H(i, j)$  в  $i, j$ -й точці з координатами  $(x_i, y_j)$ . Якщо області  $D$  належать кілька точок з однаковими координатами  $x_i, y_j$  й різними  $z_k$ , то в матриці  $Z(i, j)$  запам'ятовується максимальне значення  $z_k$ .

6. У такий спосіб на безлічі  $K, L, I, J$ -х ДЕР формуються матриці,  $A\{i, j\}$ ,  $Z(i, j)$ ,  $i = \overline{1, m}$ ;  $j = \overline{1, n}$ , які являють тривимірне зображення поверхні в зоні огляду. Практично матриця  $U_{kl}(I, J)$  відіграє роль буферної пам'яті. Тому, що формування зображення  $A(i, j)$  і  $Z(i, j)$  іде послідовно в процесі перебору  $K, L, I, J$ -х ДЕР у реальному часі, то заповнення матриці  $U_{kl}(I, J)$  може бути необов'язковим. Формування двох матриць  $A\{i, j\}$  і  $Z(i, j)$  вигідніше, ніж формування однієї тривимірної матриці  $A(i, j, k)$ .

7. Отримані матриці  $A(i, j)$ ,  $Z(i, j)$  прив'язуються до поточного дискретного моменту часу  $t_\mu : A_\mu(i, j)$ ,  $z_\mu(i, j)$ ,  $\mu = 0, 1, 2, \dots$  та передаються на алгоритми просторово-часової обробки та виведення зображення на екран індикатора оператора гіпотетичної СРБ.

8. Якщо просторово-часова обробка не здійснюється, то операції п. 4 виконуються в сферичній системі координат. У цьому випадку координатами центру  $i, j, k$ -го елемента дискретизації є  $R_i, \varphi_j, \theta_k$  — дальність, азимут, кут місця й зіставлення  $R_j, \varphi_j, \theta_j$  із границями ДЕР проводиться без перерахування координат. На алгоритми індикації видаються матриці:  $A(i, j)$  — матриця амплітуд у координатах дальність — азимут і  $\theta(i, j)$  — матриця третьої координати (кута місця).

## Висновки

1. Реалізація запропонованого методу дозволяє істотно покращити розділення за азимутном СРБ у передньому секторі огляду.

2. Запропонований метод може застосовуватися у широкому діапазоні висот польоту ДПЛА. В окремому випадку, коли рух ДПЛА здійснюється на великій висоті, то матриці  $Z(i, j)$  ( $\theta(i, j)$ ) не використовуються, тому що висотою поверхні нехтують, і на індикацію оператору видається одна матриця двовимірного (площинного) РЗ  $A(i, j)$ .

3. Введення до складу структури цифрового приймача НПЗОРЛІ фільтра-дециматора, який знижує частоту дискретизації траєкторного сигналу в  $v_1$  раз, є ефективним інструментом як узгодження частотно-часових характеристик і параметрів траєкторного сигналу й вимірювача, так і мінімізації загальних обчислювальних витрат, підвищення завадостійкості цифрового приймача системи, у тому числі й до власних шумів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Буренин Н. И. Радиолокационные станции с синтезированной антенной / Н. И. Буренин. — М. : Сов. Радио, 1972. — 160 с.
2. Направления развития современных радиолокационных средств и систем разведки наземных целей / Лифанов Ю. С., Саблин В. Н., Федоринов А. Н., Шапошников В. И. // Зарубежная радиоэлектроника. — 1998. — № 5. — С. 3—14.
3. Радиолокационные станции бокового обзора / [А. П. Реутов, Б. А. Михайлов, Г. С. Кондратенков, Б. В. Бойко]; под ред. А. П. Реутова. — М. : Сов. Радио, 1970. — 359 с.
4. Радиолокационные станции воздушной разведки / А. А. Комаров, Г. С. Кондратенков и др. ; под ред. Г. С. Кондратенкова. — М. : Воениздат, 1983. — 152 с.
5. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В. Н. Антипов, В. Т. Горяинов, А. Н. Кулин, Е. Ф. Толстов и др. ; под ред. В. Т. Горяинова. — М. : Радио и связь, 1988. — 304с.
6. Самарин О. Ф. Концепция выполнения маловысотного полета летательных аппаратов с помощью автономных БРЛС / О. Ф. Самарин, В. В. Курилкин // Радиотехника. — 1998. — № 4. — С. 50—54.
7. Сосков А. С. Радиолокаторы с синтезированной апертурой третьего поколения // Вопросы радиоэлектроники. Сер. РЛТ. — 2001. — № 1. — С. 7—19.

Рекомендована кафедрою телекомунікаційних систем та телебачення

Стаття надійшла до редакції 10.04.12  
Рекомендована до друку 20.09.12

**Толіона Сергій Васильович** — доцент кафедри радіомоніторингу та радіочастотного менеджменту.  
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ