РАДІОЛОКАЦІЯ І РАДІОТЕХНІКА

УДК 621.396.612

В.А. Дружинін

Державний університет телекомунікацій, Київ

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВИХ КООРДИНАТ ОБ'ЄКТІВ МОНІТОРИНГУ В БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ СИСТЕМАХ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Розроблено алгоритм виміру кутових координат об'єктів моніторингу в багатопозиційних системах радіолокаційного спостереження зі спроможністю реалізації синтезованої плоскої антенної решітки на визначених інтервалах часу. Алгоритм розроблено з урахуванням факторів визначення координат об'єктів моніторингу в системах радіолокаційного спостереження авіаційно-наземного базування із змінною просторовою конфігурацією.

Ключові слова: *дистанційно пілотований літальний апарат, багатопозиційна система радіолокаційного спостереження, синтезована плоска антенна решітка.*

Вступ

Актуальність роботи визначається тим, що сучасні концепції розвитку радіотехнічних систем із змінною просторовою конфігурацією орієнтовані на створення багатофункціональних засобів спостереження , використання яких дозволило б істотно скоротити терміни отримання якісної інформації про об'єкти моніторингу з урахуванням зростаючих вимог до точності визначення їх параметрів та класифікації у реальному масштабі часу в умовах взаємних завад та радіопротидії. Аналіз публікацій останніх років [1, 2, 3, 4, 5], присвячених розгляду сучасного стану та тенденцій розвитку систем радіолокаційного спостереження (СРЛС) показав, що на цей час значна увага приділяється багатопозиційним системам (БП) із синтезованими плоскими антенними решітками (СПАР). Однак СРЛС з СПАР є багатоканальним аналізатором радіолокаційної обстановки в зоні дії визначеної радіотехнічної системи [6, 7], тому багатопозиційна система спостереження будується з використанням кількох радіолокаційних станцій (РЛС) з СПАР і спеціальних алгоритмів виміру параметрів сигналів, що відбиті від об'єкту спостереження (ОС).

Метою роботи є розробка алгоритмічного апарату визначення кутових координат ОС в багатопозиційній СРЛС із СПАР із необхідною роздільною здатністю системи.

Основна частина

Алгоритм виміру кутових координат ОС в БП СРЛС із СПАР розробляється за умов, що СПАР: формує максимум діаграми спрямованості (ДС) в напрямку кутових координат ОС (θ,φ) у режимі роботи системи на передачу; визначає відношення сигнал/шум S/N за у режимі роботи СРЛС на прийом; визначає амплітуду сигналу $U_{ij}(\bar{\ },\ddot{\ })$ та його фазу $\Phi_{ij}(\theta,\varphi)$ у процесі цифрової обробки сигналів; забезпечує вимірювання кутових координат ОС (θ,φ).

По-перше, при визначенні кутових координат ОС у декартовій (X, Y, Z) або сферичній (R, Θ, φ) системах координат за допомогою СПАР, яка має амплітудну та фазову ДС, можливо здійснювати вимір кутових координат ОС за допомогою амплітудно-фазової ДС СПАР. Необхідно тільки ідентифікувати об'єкт моніторингу за параметрами СПАР та БП СРЛС. Ця процедура складає першу частину алгоритму виміру кутових координат ОС при використанні СПАР.

По-друге, при визначенні амплітудно-фазового розподілу поля по апертурі СПАР за допомогою амплітудно-фазової ДС з'являється можливість контролювати амплітуду та фазу сигналу в каналах кожного випромінювача АР в заданих системах координат X, Y, Z та R, θ, φ і для СРЛС. При цьому необхідно визначити параметри амплітудно-фазової ДС, параметри амплітудно-фазового розподілу поля по апертурі СПАР та параметри амплітуди та фази сигналів в каналах кожного випромінювача антенної системи (в заданих системах координат X, Y, Z, Z та R, θ, φ) і для СРЛС. У цьому полягає друга частина алгоритму виміру кутових координат ОС при використанні СПАР.

По-третє, у разі ідентифікації параметрів амплітудно-фазової ДС, параметрів амплітудно-фазового розподілу поля по апертурі СПАР та параметрів амплітуди та фази сигналів в каналах кожного випромінювача СПАР (по координатах X, Y, Z або R, θ, φ) розподіл сигналів напруги $U_{ij}(\theta,\varphi)$ та їх фаз $\Phi_{ij}(\theta,\varphi)$ по приймальних каналах СПАР-БП СРЛС визначить кутові координати ОС. Для цього необхідно тільки виміряти зазначені параметри відносно фазових центрів випромінювачів як окремих каналів складання сигналів з напругою $U_{ij}(\theta,\varphi)$ та фазою. Алгоритм перемикання та складання сигналів з напругою $U_{ij}(\theta,\varphi)$ та фазою $\Phi_{ij}(\theta,\varphi)$ згідно з цільовими функціями $\max U_{ij}(\theta,\varphi)$ та $\min \Phi_{ij}(\theta,\varphi)$, за допомогою яких контролюється вимір кутових координат ОС, складає третю частину алгоритму виміру кутових координат ОС при використанні СПАР БП СРЛС.

Наведені три частини алгоритму виміру кутових координат ОС при використанні СПАР можуть бути реалізовані як один алгоритм виміру кутових координат ПЦ за допомогою БП СРЛС. Структурна схема алгоритму виміру кутових координат ОС при використанні СПАР показана на рис. 1, а структурна схема БП СРЛС – на рис. 2.

Структурна схема алгоритму виміру кутових координат ОС при використанні СПАР-БП СРЛС містить три складові частини послідовного розрахунку кутових координат ОС. Відповідно до цього необхідна структурна схема БП СРЛС, яка точно б відповідала послідовності розрахунку виміру кутових координат ОС наведена на рис. 2, яка містить: АП – антенний перемикач; ВК – вузол керування; ФД – фазовий детектор; ПНК – перетворювач напруга-код; П – підсилювач; ФМ – фазовий маніпулятор; ФЗС – формувач зондуючого сигналу; ЗГ – задаючий генератор; ЦФ ДСА – цифрове формування ДСА; АПОС – адаптивну просторову обробку сигналів; АЧОС - адаптивну часову обробку сигналів; ПЧОС – просторово-часову обробку сигналів; КП ДСА – керування променем ДСА; СН - систему навігації; ОРЛІ – обробку радіолокаційної інформації.

Використання в структурі СРЛС схеми цифрового формування (ЦФ) ДС на прийом у наземному пункті збору та обробки радіолокаційної інформації (НПЗОРЛІ) вирішує задачі: прийому й запам'ятовування вхідних сигналів підрешіток (*i*-х бортових радіолокаційних засобів) у цифровому вигляді в кожному інтервалі часової дискретизації (рис. 3); обчислення й зберігання вагових коефіцієнтів; формування однопроменевої або багатопроменевої ДС шляхом вагової суперпозиції комплексних вхідних сигналів.

Реалізація схеми ЦФ ДС на прийом у СРЛС передбачає розробку відповідного алгоритмічного апарату, а саме: радіокерування групою (РК) носіїв бортових радіолокаційних засобів (БРЛЗ) на необхідних інтервалах часу для синтезування апертури (СА); синхронізації радіолокаційних складових (РЛС) системи спостереження; спільної обробки отриманої радіолокаційної інформації (РЛІ).

Для ідентифікації структури БП СРЛС, яка спроможна реалізувати СПАР, на визначених інтервалах часу, необхідно здійснити аналітичну формалізацію процесів виміру кутових координат ОС.

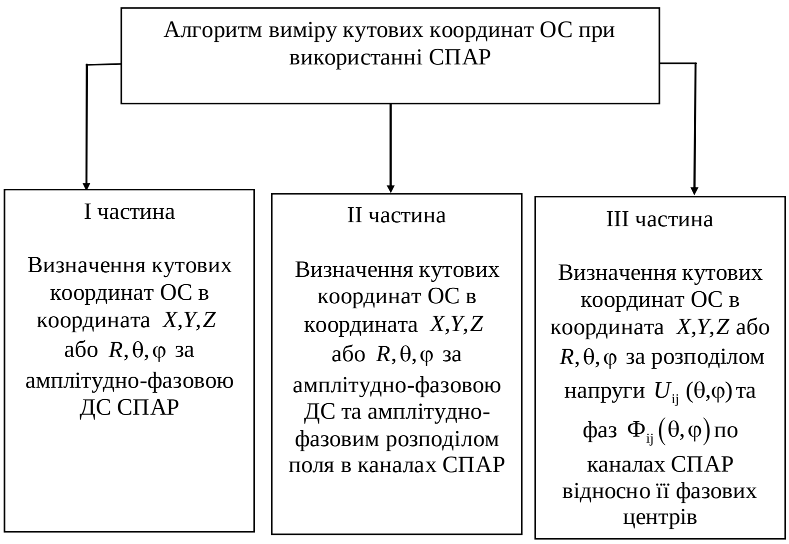

Рис. 1. Структурна схема виміру кутових координат ОС при використанні СПАР

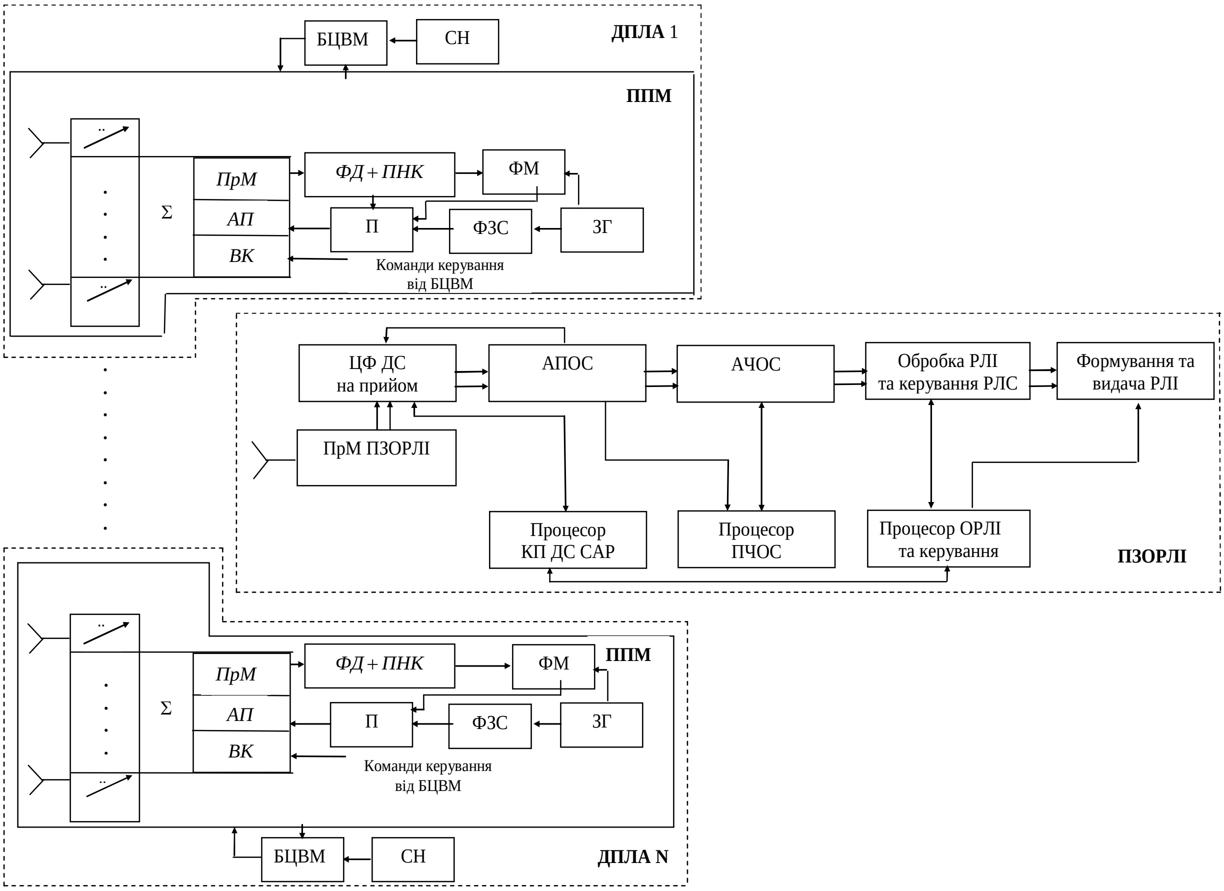

Рис. 2. Структурна схема БП СРЛС

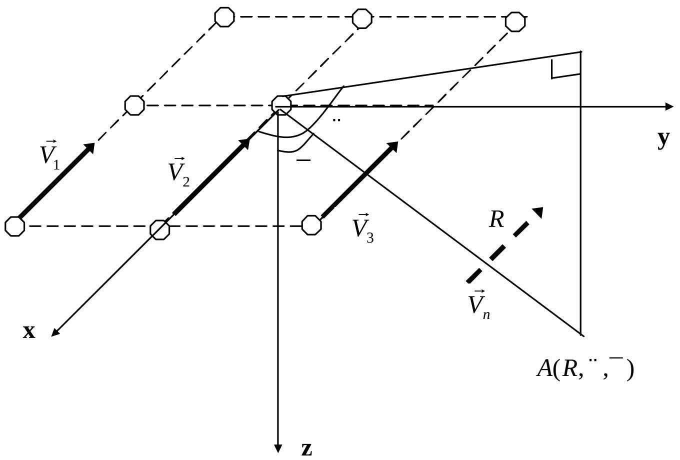

Рис. 3. Ескіз СПАР при керуванні рухомими радіолокаційними вимірювачами БП СРЛС

Перша частина структурної схеми алгоритму формалізується таким чином. Площина апертури СПАР розташована у площині XOY (розміри обмежені координатами X_1X_2-Y_1Y_2, а у сферичній системі з координатами R, θ, φ має в точці O (початок координат) ось OZ (рис. 4). ДС СПАР формується плоским розкривом X_1X_2-Y_1Y_2 в напрямку на ОС відповідно до розв’язання задачі змішаного синтезу антен. Згідно з [6] існують чотири можливі задачі змішаного синтезу антен, коли задані: амплітудна ДС і амплітуда струмів в СПАР; амплітудна ДС і фази струмів в СПАР; фазова ДС і амплітуди струмів в СПАР; фазова ДС і фази струмів в СПАР.

При цьому знаходяться середньоквадратичні відхилення заданої ДС $|f(U)|$ від ДС, яку отримано

$\left|f\left(U^1\right)\right|$ в процесі розв’язання і яка повинна наближатися до потрібної ДС СПАР.

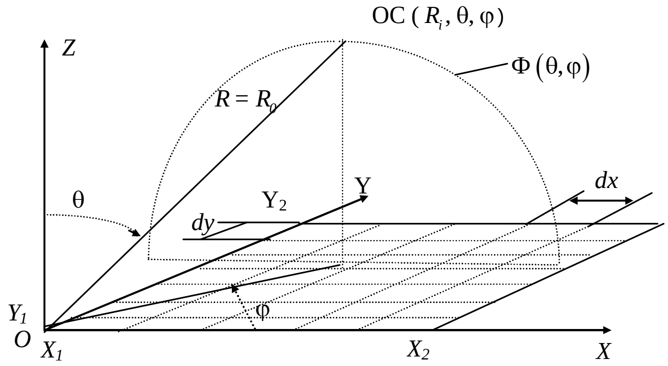

Рис. 4. Визначення координат ОС при використанні СПАР

Здійснювати вимір кутових координат ОС можна за допомогою амплітудно-фазової ДС СПАР за умови ідентифікації її параметрів та параметрів БП СРЛС. Тому необхідно розв’язати дві задачі.

Задача 1. Задані амплітудна ДС $\left|f(U)\right|$ та амплітуда струму $A\left(\xi\right)$:

$$J\left(\psi_i\left(\xi\right)\right)=\int\limits_{u_1}^{u_2}[f^2_{зад}(U)-(\int\limits_{-\sigma}^{\sigma}A(\xi)\cos(U\xi+\psi_i(\xi)d\xi)^2-(\int\limits_{-\sigma}^{\sigma}A(\xi)\sin(U\xi+\psi_i(\xi)d\xi)^2]^2dU\,. \quad (1)$$

Задача 2. Задані фазова ДС $\left|\Phi(U)\right|$ та фаза струму $\psi\left(\xi\right)$:

$$J\left(A_i\left(\xi\right)\right)=\int\limits_{u_1}^{u_2}[tg\Phi^2_{зад}(U)-(\int\limits_{-\sigma}^{\sigma}A_i(\xi)\cos(U\xi+\psi(\xi)d\xi)^2-(\int\limits_{-\sigma}^{\sigma}A_i(\xi)\sin(U\xi+\psi(\xi)d\xi)^2]^2dU. \quad (2)$$

Процес наближення в зазначених задачах повинен бути таким, щоб кожна наступна функція заданих значень амплітуди та фази зменшувала б зміну функціонала $\delta J\left(...\right)$ згідно з [6].

За умовами виміру кутових координат ОС за рахунок реалізації СПАР необхідно скористатися зміною функціонала $\delta J\left(...\right)$ у задачі 2, коли задані фазова ДС $\left|\Phi(U)\right|$ та фаза струму $\psi\left(\xi\right)$. Тоді, згідно з [6],

$$\delta J\left(...\right)=-\varepsilon\int\limits_{-\sigma}^{\sigma}\eta_i(\xi)F(\xi)d\xi\,, \quad (3)$$

$$A_{i+1}(\xi)=A_i(\xi)+\varepsilon\eta(\xi)\,. \quad (4)$$

При цьому суттєве значення має вибір початкового наближення. Для цього необхідно використовувати системи лінійних рівнянь в задачах з заданими фазовою ДС $\Phi(U)$ та розподілом фази струму $\psi\left(\xi\right)$. Тоді, згідно з [6], у рівнянні

$$tg\Phi_{ЗАД}\left(U\right)=\frac{\int\limits_{-\sigma}^{\sigma}A(\xi)\sin(U\xi+\psi(\xi))d\xi}{\int\limits_{-\sigma}^{\sigma}A(\xi)\cos(U\xi+\psi(\xi))d\xi}, \quad (5)$$

інтеграли необхідно замінити сумами. У результаті отримаємо:

$$tg\Phi_{ЗАД}\left(U\right)=\sum_{n=0}^{N-1}\sum_{m=0}^{M-1}A_i(\xi_n)\cos(U\xi_n+\psi(\xi_n))\Delta\xi_n A_j(\xi_m)\cos(U\xi_m+\psi(\xi_m))\Delta\xi_m-$$
$$-\sum_{n=0}^{N-1}\sum_{m=0}^{M-1}A_i(\xi_n)\sin(U\xi_n+\psi(\xi_n))\Delta\xi_n A_j(\xi_m)\sin(U\xi_m+\psi(\xi_m))\Delta\xi_m\,. \quad (6)$$

Визначивши фазову ДС $\Phi(U)$ в декількох точках $U_1, U_2,...,U_n$, отримаємо систему однорідних рівнянь відносно $A\left(\xi_1\right),A\left(\xi_2\right),...,A\left(\xi_n\right)$), при цьому необхідно ввести додаткове неоднорідне рівняння (з вимог нормування) і розв’язати вже неоднорідну систему рівнянь.

При визначенні фазової ДС $\Phi(U)$ ПЕЦАР у режимі роботи БП СРЛС на прийом необхідно спочатку визначити амплітудну ДС $\left|f\left(U\right)\right|$ та амплітуду струму $A\left(\xi\right)$ СПАР у режимі роботи БП СРЛС на передачу відповідно до задачі 1. Вона потрібна для визначення максимуму ДС СПАР в напрямку на об’єкт спостереження з кутовими координатами ОС θ,φ у режимі роботи БП СРЛС на передачу і виміру амплітуди зондуючого сигналу.

Тоді на основі принципу взаємності теорії антен можливо визначити амплітудну ДС $|f(U)|$ та амплітуду струму $A(\xi)$ СПАР у режимі роботи БП СРЛС на прийом, а від неї перейти до фазової ДС Ф(U) антенної решітки.

Згідно з [6] амплітудна характеристика ДС СПАР з вимірюванням кутових складових поля по кутових координатах ОС має дві компоненти:

$$E^{\theta}=j\times\frac{\exp(-jkR)}{2\lambda R}\times\left[\frac{z_0}{\alpha}\cos\theta N_X-\left(\cos\varphi+\frac{z_0}{\alpha}\sin\theta\right)N_Y\right],$$

$$E^{\varphi}=j\times\frac{\exp(-jkR)}{2\lambda R}\times\left[\left(\sin\theta+\frac{z_0}{\alpha}\cos\varphi\right)N_X-N_Y\cos\theta\sin\varphi\right],$$

У спрощеному варіанті під фазовою ДС Ф(U) СПАР можна розуміти кутовий розподіл фази компонент поля випромінювання. Замість функції $\Phi(U)$ можна розглядати $\Phi(\theta,\varphi)$, яка має еквіфазні поверхні поля випромінювання СПАР у просторі:

$$\Phi(\theta,\varphi)=R_0+\frac{\Phi(\theta,\varphi)}{k},$$

де R_0 – радіус сфери з центром системи координат, яка використовується при розрахунках поля СПАР в дальній зоні; $k=2\pi/\lambda$ − хвильове число; λ − довжина хвилі.

За умови розміщення СПАР відповідно до рис. 4

$$\Phi(\theta,\varphi)=k\times(x_0\sin\theta\cos\varphi+y_0\sin\theta\sin\varphi+z_0\cos\theta+a),$$

де x_0, y_0, z_0 − початок координат відносно СПАР; a – константа.

Поверхня $\Phi(\theta,\varphi)$ являє собою сферу, а фазовий центр СПАР співпадає з центром цієї сфери. При випадковому виборі початку координат збігу не буде, тому про наявність фазового центру здійснюється висновок за фактом, чи можна його знайти за рахунок переносу початку координат СПАР [6].

Незалежно від цього фазову характеристику $\Phi(\theta,\varphi)$ ДС ПЕЦАР можливо представити, якщо реєструвати її хвильове поле з відновленням його інтенсивності. Відновлення хвильового поля СПАР, згідно з [6],

$$F(\theta,\varphi)=|F(\theta,\varphi)|\times\exp j\times(\arg F(\theta,\varphi)),$$

здійснюється за допомогою перетворення Гільберта від функції $\ln|F(\theta,\varphi)|$:

$$\arg F(\theta,\varphi)=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\ln|F(\theta,\varphi)'}{(\theta,\varphi)'-(\theta,\varphi)}d\theta' d\varphi+\sum\arg\frac{z-z_i'}{z-z'},$$

де z_i – комплексні нулі функції $|F(z)|$, яка є аналітичним продовженням $F(\theta,\varphi)$ в площині комплексної змінної; $|f(U)|$ – просторовий спектр хвильового поля, яке сформоване кінцевим розподілом поля по координатах X, Y одночасно [6].

При цьому $\theta=kxlz$ – кутова просторова частота поля по осі X, $\varphi=kylz$ – кутова просторова частота по осі Y.

Зв'язок між амплітудою та фазою хвильового поля як в СПАР встановлюється, виходячи з співвідношення [6]

$$\ln F(\theta,\varphi)=\ln|F(\theta,\varphi)|+j\times\operatorname{arctg}F(\theta,\varphi). \quad (7)$$

Перевірка зв'язку дійсної та уявної частин функції $F(\theta,\varphi)$ проводиться за умовами Коші-Римана [6]:

$$\frac{\partial}{\partial\theta}\ln|F(\theta,\varphi)=\frac{\partial}{\partial\varphi}\arg F(\theta,\varphi)$$

$$\frac{\partial}{\partial\varphi}\ln|F(\theta,\varphi)|=-\frac{\partial}{\partial\theta}\arg F(\theta,\varphi).$$

У результаті знаходження $\arg F(\theta,\varphi)$ за [6] встановлюється зв'язок між амплітудною та фазовою ДС , що адекватно зв'язку між амплітудою та фазою сигналу.

За результатами аналізу роботи СПАР, яка реалізована БП СРЛС на деяких інтервалах часу, можна зробити висновок про ідентифікацію їх структурних схем відповідно до алгоритму виміру кутових координат ОС.

Системна методологія розробки алгоритму виміру кутових координат ОС при використанні СПАР, яка реалізована БП СРЛС на деяких інтервалах часу, виконана на основі методу парціальних діаграм.

У цьому випадку апроксимація заданої ДС СПАР проводиться за допомогою спеціальних функцій (парціальних діаграм), для кожної з яких може бути знайдено точне розв'язання задачі синтезу, тобто синтезовано амплітудну ДС СПАР-БП СРЛС в режимі роботи СРЛС на передачу (задача 1, рис. 5, 6). Пошук розподілу джерел випромінювання ОС знаходиться в вигляді суперпозиції парціальних розподілів поля СПАР, які контролюються окремими парціальними діаграмами випромінювачів, тобто синтезується ДС СПАР в режимі роботи СРЛС на прийом (задача 2, рис. 6). Системи парціальних діаграм при рішенні задачі 2 для знаходження функціонала $J(A_i(\xi))$ обираються, виходячи з умов [6].

У цьому випадку ДС СПАР

$$|f(U)|=f(U)\times f_1(U), \quad (8)$$

де $f(U)$ – ДС одного випромінювача СРЛС; $|f_1(U)|$ – ДС множника СПАР БП СРЛС.

Амплітудна ДС кожного випромінювача БП СРЛС являє "кардіоїду", яка "відтиснута" від площини XOZ і має вид ідеального "кола".

ДС множника СПАР БП СРЛС визначається за таким виразом:

$$f_1(U)=\sum_{n=0}^{N-1}\sum_{m=0}^{M-1}a_n a_m e^{ijk(\rho_n+\rho_m)R_i R_j}, \qquad (9)$$

де n, m – порядкові номери випромінювачів; a_n, a_m – коефіцієнти пропорційності комплексним амплітудам струму n-го, m-го випромінювачів; $N\times M$ – кількість випромінювачів по двох координатах СПАР-БП СРЛС; ρ_n, ρ_m – радіус-вектор, який визначає положення центра n-го та m-го випромінювачів СПАР-БП СРЛС; $R_i = R/R,\ R = R/R''$ - радіус-вектори точок спостереження по двох координатах.

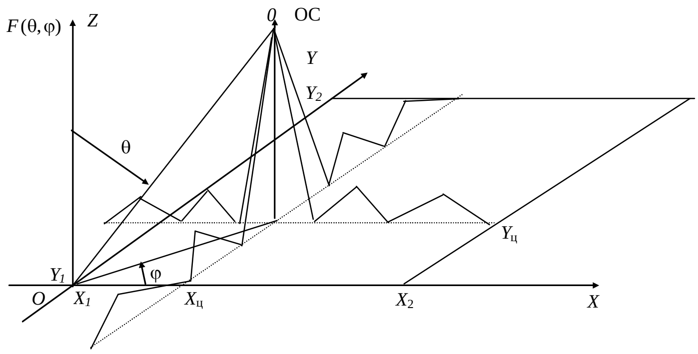

Рис. 5. Синтез ДС СПАР БП СРЛС в режимі роботи СРЛС на передачу – прийом

Ступінь наближення двох функцій $\left|f(U)\right|$ та $F(\theta,\varphi)$ в двох площинах для двох ОС визначається величиною [6]

$$\delta_{Ц} = \int_{-\pi}^{\pi} P(U_n)[F(U_n)-\left|f(U_n)\right|]^2 dU_n, \qquad (10)$$

де $P(U_n)$ – вагова функція, яка регулює ступінь наближення $\left|f(U)\approx F(\theta,\varphi)\cong F(U_n)\right|$ для різних кутових напрямків спостереження, наприклад 2 ОС (рис. 6), по величинах $\delta^1_{Ц}$ і $\delta^2_{Ц}$.

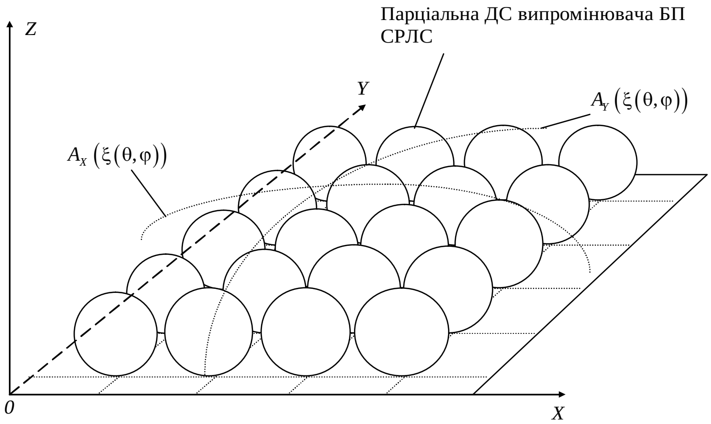

Рис. 6. Синтез ДС СПАР БП СРЛС в режимі роботи СРЛС на передачу – прийом (фрагмент)

Вимірювання координат ОС за допомогою СПАР БП СРЛС повинне проводиться в режимі "передача – прийом". Тому необхідно провести аналіз адекватності процесу вимірювання реальному вимірюванню кутових координат ОС в СРЛС із СПАР, коли визначається максимум відношення сигнал/шум S/N із заданого просторового напрямку ДС θ_{mn},φ_{mn} знаходження ОС та одночасно її кутові координати, відповідні цьому максимуму S/N.

При цьому оцінка енергетичних співвідношень між сигналами та завадами проводиться за допомогою максимуму S/N для заданих імовірності виявлення і помилкової тривоги, а також точності вимірювання кутових координат ОС та його швидкості в СРЛС із СПАР, коли максимум ДС встановлено в напрямку на ОС [8–10]

$$\max\frac{S}{N}(\theta_{mn},\varphi_{mn})=\frac{P_T(\theta_{m\text{т}},\varphi_{m\text{т}})G_T(\theta_{m\text{т}},\varphi_{m\text{т}})}{(4\pi)^3 kTR_1^2(\theta_{m\text{т}},\varphi_{m\text{т}})F_1(\theta_{m\text{т}},\varphi_{m\text{т}})}\times$$
$$\times\frac{G_R(\theta_{m\text{т}},\varphi_{m\text{т}})\lambda^2\sigma(\theta_{m\text{т}},\varphi_{m\text{т}})\tau(\theta_{m\text{т}},\varphi_{m\text{т}})}{R_2^2(\theta_{m\text{т}},\varphi_{m\text{т}})F_2(\theta_{m\text{т}},\varphi_{m\text{т}})L(\theta_{m\text{т}},\varphi_{m\text{т}})}, \qquad (11)$$

де $P_T(\theta_{mn},\varphi_{mn})$ – потужність передавача в напрямку координат ОС, кВт; $k = 1,37\times10^{-23\,3}$ – постійна Больцмана; $T(\theta_{mn},\varphi_{mn}) = (T_A/L_R + T_R + T_E)$ – ефективна температура каналу приймача для заданого напрямку, K; $T_A(\theta_{mn},\varphi_{mn})$ – температура шумів антени для заданого напрямку, K ; $L_R(\theta_{mn},\varphi_{mn})$ – втрати між антеною і приймачем для заданого напрямку, дБ; $T_R(\theta_{mn},\varphi_{mn})$ – ефективна температура шумів антена − приймач для заданого напрямку; $T_R = T_T(1-1/L)$, K ; $\Phi(\theta_{mn},\varphi_{mn})$ – фазова ДС СПАР-БП СРЛС; $T_T(\theta_{mn},\varphi_{mn})$ – температура лінії антена-приймач для заданого напрямку, K ; $T_E(\theta_{mn},\varphi_{mn})$ – ефективна температура шумів приймача для заданого напрямку, $T_E=(NF-1)T_n$, K ; Tn $T_n(\theta_{mn},\varphi_{mn})$ − температура, відносно якої визначається коефіцієнт шуму NF для заданого напрямку; K ; $\tau(\theta_{mn},\varphi_{mn})$ − час спостереження за ОС для заданого напрямку, с; $F_1(\theta_{mn},\varphi_{mn})$, $F_2(\theta_{mn},\varphi_{mn})$ – коефіцієнти поширення радіохвиль для заданого напрямку, дБ; L – коефіцієнт втрат в антено-фідерній системі для заданого напрямку, дБ; σ - ефективна поверхня відбиття ОС для заданого напрямку, м^2; λ − довжина хвилі випромінювача СРЛС, м; R_1^2, R_2^2 − відстані від СРЛС до ОС і від ОС до СРЛС, км; $G_r(\theta_{mn},\varphi_{mn})$ – підсилювання антени БП СРЛС в режимі роботи СРЛС на передачу, дБ; $G_R(\theta_{mn},\varphi_{mn})$ – підсилювання СПАР БП СРЛС в режимі роботи СРЛС на прийом, дБ.

Для визначення максимуму $S/N(\theta_{mn},\varphi_{mn})$ необхідно враховувати загальні умови забезпечення $\max G_r(\theta_{mn},\varphi_{mn}) = D(\theta_{mn},\varphi_{mn})\eta$, де $D(\theta_{mn},\varphi_{mn})$ – коефіцієнт спрямованої дії (КСД), а η − коефіцієнт корисної дії (ККД) антени.

Амплітудна ДС СПАР БП СРЛС , яка задовольняє умову $\max D(\theta_{mn},\varphi_{mn})$, може бути знайдена за формулою

$$F(\theta_{mn},\varphi_{mn}) = FR(\theta_{mn},\varphi_{mn}) + j\times F_J(\theta_{mn},\varphi_{mn}). \quad (12)$$

Фазова ДС СПАР БП СРЛС:

$$\Phi(\theta_{mn},\varphi_{mn}) = \operatorname{arctg} - \frac{F_J(\theta_{mn},\varphi_{mn})}{F_R(\theta_{mn},\varphi_{mn})}, \quad (13)$$

характеризується частковим фазовим центром та його стійкістю. Вважається також, що окремі випромінювачі БП СРЛС мають фазові центри, які визначаються координатами їх розташування в площині XOY (див. рис. 4, 6).

До уваги береться:

1. СПАР БП СРЛС містить $2N+1$ рядів, які паралельні осі Y, та $2M+1$ рядів, які паралельні осі X.

2. Випромінювач БП СРЛС з номером mn має координати $x_m = md_x$ і $y_n = nd_y$, при цьому – $-M \le m \le M$ і $-N \le n \le N$.

3. Множник СПАР БП СРЛС має вид

$$F_k(\theta_{mn},\varphi_{mn}) = f_x(\theta_{mn},\varphi_{mn}) \times f_y(\theta_{mn},\varphi_{mn}), \quad (14)$$

де

$$f_x(\theta_{mn},\varphi_{mn}) = \sum_{m=-M}^{M} I_m e^{im\beta d_x \sin\theta\cos\varphi};$$

$$f_y(\theta_{mn},\varphi_{mn}) = \sum_{n=-N}^{N} I_n e^{in\beta d_y \sin\theta\sin\varphi};$$

$$l_m = \frac{l_{m0}}{l_{00}}, \quad l_n = \frac{l_{n0}}{l_{00}}$$

для прийнятих обмежень на розподіл струмів по випромінювачах.

4. При законі розподілу струмів по випромінювачах

$$I_{mn} = I_{00} e^{-i(m\psi_x + n\psi_y)}, \quad (15)$$

множник СПАР БП СРЛС визначається виразом

$$F_k(\theta_{mn},\varphi_{mn}) = I_{00}^2 \times [\sum_{m=-M}^{M} e^{im(\beta d_{x_m} \sin\theta_m \cos\varphi_m - \psi_x)}] \times [\sum_{n=-N}^{N} e^{in(\beta d_{y_n} \sin\theta_m \sin\varphi_m - \psi_y)}], \quad (16)$$

де ψ_{X_m} ψ_{Y_n}, – зсуви фаз по осях X та Y між сусідніми випромінювачами.

5. СПАР БП СРЛС має максимум ДС в напрямку на ОС 1 θ_{m1},φ_{m1} та на ОС 2 θ_{m2},φ_{m2} і, згідно з [11–14] та рис. 6, алгоритм виміру кутових координат ОС 1 і 2 за допомогою СПАР БП СРЛС визначає відповідні співвідношення:

$$\varphi_{m1} = \operatorname{arctg}(\frac{\psi_{y1} dx_1}{\psi_{x1} dy_1}); \quad (17)$$

$$\theta_{m1} = \operatorname{arctg}\sqrt{(\frac{\psi_{x1}^2}{\beta^2 dx_1^2}) + (\frac{\psi_{y1}^2}{\beta^2 dy_1^2})}; \quad (18)$$

$$\varphi_{m2} = \operatorname{arctg}(\frac{\psi_{y2} dx_2}{\psi_{x2} dy_2}); \quad (19)$$

$$\theta_{m2} = \operatorname{arctg}\sqrt{(\frac{\psi_{x2}^2}{\beta^2 dx_2^2}) + (\frac{\psi_{y2}^2}{\beta^2 dy_2^2})}. \quad (20)$$

6. Формування та зсув головних пелюсток ДС СПАР БП СРЛС по ОС 1 і 2 в режимах передачі – прийому виконується згідно з алгоритмом [8, 10, 11]

$$\chi_{x1} = \beta\cos\gamma_{x1}, \quad \chi_{y1} = \beta\cos\gamma_{y1}; \quad (21)$$

$$\chi_{x2} = \beta\cos\gamma_{x2}, \quad \chi_{y2} = \beta\cos\gamma_{y2}; \quad (22)$$

$$F_{K1}(\chi_{X1},\chi_{Y1}) = \sum_{m=-M}^{M}\sum_{n=-N}^{N} \frac{I_{mn}^1}{I_{001}} e^{im_1 d_{x1}\chi_{x1} + in_1 d_{y1}\chi_{y1}}; \quad (23)$$

$$F_{K2}(\chi_{X2},\chi_{Y2}) = \sum_{m=-M}^{M}\sum_{n=-N}^{N} \frac{I_{mn}^2}{I_{002}} e^{im_2 d_{x2}\chi_{x2} + in_2 d_{y2}\chi_{y2}}. \quad (24)$$

7. Поведінка множників F_{K1}, F_{K2} для $0 \le \theta_m \le \frac{\pi}{2}$ і $0 \le \varphi_m \le 2\pi$ враховується в алгоритмі відомими методами [6–15].

8. КСД СПАР БП СРЛС, згідно з [7, 8], в напрямку на ОС 1 і 2

$$\max D_1(\theta_{mn}, \varphi_{mn}) = \pi \cos\theta^1_{mn} D_{X1}(\theta^1_{mn}, \varphi^1_{mn}) \times \times D_{Y1}(\theta^1_{mn}, \varphi^1_{mn});$$

$$\max D_2(\theta_{mn}, \varphi_{mn}) = \pi \cos\theta^2_{mn} D_{X2}(\theta^2_{mn}, \varphi^2_{mn}) \times \times D_{Y2}(\theta^2_{mn}, \varphi^2_{mn}).$$

9. Для знаходження $\max S/N_1(\theta_{mn}, \varphi_{mn})$ і $\max S/N_2(\theta_{mn}, \varphi_{mn})$ необхідно виразити $\max G_r(\theta_m, \varphi_m)$ для режиму роботи на передачу таким чином:

$$G_r(\theta_m, \varphi_m) = f^2(\theta_m, \varphi_m) \times \times \left[\sum_{m=-M}^{M} \sum_{n=-N}^{N} \frac{I_{mn}}{I_{00}} e^{imd_x\chi_x + ind_y\chi_y} \right]^2 \times \eta(\theta_m, \varphi_m),$$

та $\max G_r(\theta_m, \varphi_m)$ для режиму роботи на прийом:

$$G_{R1}(\theta_{m1}, \varphi_{m1}) = f^2(\theta_m, \varphi_m) \times \times \left[\sum_{m=-M}^{M} \sum_{n=-N}^{N} \frac{I^2_{mn}}{I^2_{00}} e^{im_2 d_{x2}\chi_{x2} + in_2 d_{y2}\chi_{y2}} \right]^2 \times \eta(\theta_m, \varphi_m),$$

$$G_{R2}(\theta_{m2}, \varphi_{m2}) = f^2(\theta_m, \varphi_m) \times \times \left[\sum_{m=-M}^{M} \sum_{n=-N}^{N} \frac{I^2_{mn}}{I^2_{00}} e^{im_2 d_{x2}\chi_{x2} + in_2 d_{y2}\chi_{y2}} \right]^2 \times \eta(\theta_m, \varphi_m)$$

10. Необхідно також враховувати взаємний вплив випромінювачів в режимі прийому (якщо алгоритм виміру кутових координат об’єкту передбачає застосування декількох випромінювачів БП СРЛС), який згідно з [7, 12] та рис. 7 визначається за формулою

$$[Z_{mn}] \times |I_{mn}| = |U_{mn}|, \qquad (25)$$

де $[Z_{mn}]$ – матриця власних та взаємних опорів випромінювачів для кожного ОС; $|I_{mn}|$ – вектор-стовбець-рядок комплексних амплітуд струмів випромінювачів по координатах X або Y; $|U_{mn}|$ – вектор-рядок-стовбець комплексних напруг випромінювачів по координатах X або Y.

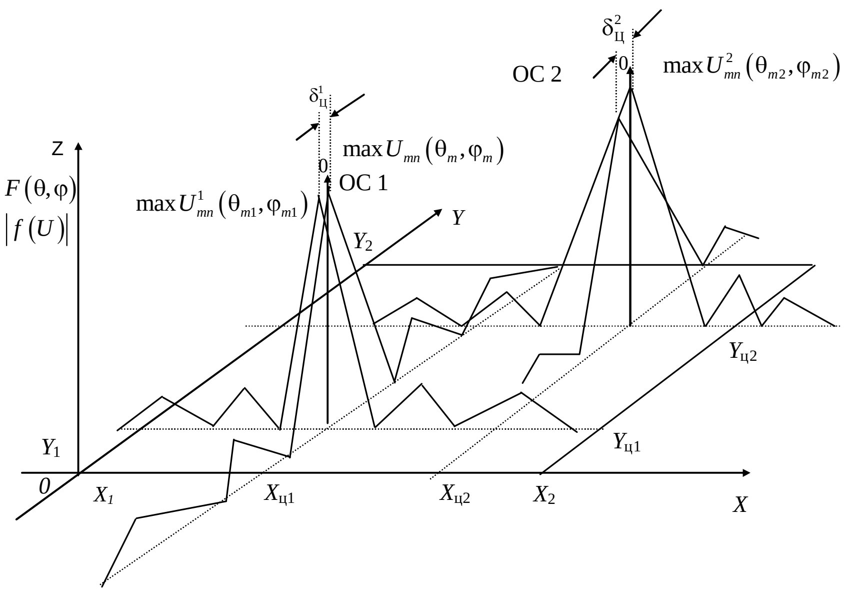

Рис. 7. ДС СПАР в роботі СРЛС на прийом

Для ОС1 $[Z^1_{mn}], [I^1_{mn}], [U^1_{mn}]$ визначаються за виразами:

$$[Z^1_{mn}] = \begin{bmatrix} Z^1_{11}, \ldots, Z^1_{1n} \\ Z^1_{21}, \ldots, Z^1_{2n} \\ ------ \\ Z^1_{m1}, \ldots, Z^1_{mn} \end{bmatrix}, [I^1_{mn}] = \begin{bmatrix} I^1_{11}, \ldots, I^1_{1n} \\ I^1_{21}, \ldots, I^1_{2n} \\ ------ \\ I^1_{m1}, \ldots, I^1_{mn} \end{bmatrix},$$

$$[U^1_{mn}] = \begin{bmatrix} U^1_{11}, \ldots, U^1_{1n} \\ U^1_{21}, \ldots, U^1_{2n} \\ ------ \\ U^1_{m1}, \ldots, U^1_{mn} \end{bmatrix} \qquad (26)$$

Для ОС 2 $[Z^2_{mn}], [I^2_{mn}], [U^2_{mn}]$ відповідно

$$\left[Z_{mn}^2\right] = \begin{bmatrix} Z_{11}^2,...,Z_{1n}^2 \\ Z_{21}^2,...,Z_{2n}^2 \\ ------ \\ Z_{m1}^2,...,Z_{mn}^2 \end{bmatrix}, \left[I_{mn}^2\right] = \begin{bmatrix} I_{11}^2,...,I_{1n}^2 \\ I_{21}^2,...,I_{2n}^2 \\ ------ \\ I_{m1}^2,...,I_{mn}^2 \end{bmatrix}, \quad (27)$$

$$\left[U_{mn}^2\right] = \begin{bmatrix} U_{11}^2,...,U_{1n}^2 \\ U_{21}^2,...,U_{2n}^2 \\ ------ \\ U_{m1}^2,...,U_{mn}^2 \end{bmatrix}.$$

Для ОС 1

$$\begin{cases} I_{11}^1 d_{11}^1 + I_{12}^1 d_{12}^1 + ... + I_{1n}^1 d_{1n}^1 + I_{11}^2 d_{11}^2 + I_{12}^2 d_{12}^2 + ... + I_{1n}^2 d_{1n}^2 = N_{1n}^1 \\ I_{21}^1 d_{21}^1 + I_{22}^1 d_{22}^1 + ... + I_{2n}^1 d_{2n}^1 + I_{21}^2 d_{21}^2 + I_{22}^2 d_{22}^2 + ... + I_{2n}^2 d_{2n}^2 = N_{2n}^1 \\ I_{31}^1 d_{31}^1 + I_{32}^1 d_{32}^1 + ... + I_{3n}^1 d_{3n}^1 + I_{31}^2 d_{31}^2 + I_{32}^2 d_{32}^2 + ... + I_{3n}^2 d_{3n}^2 = N_{3n}^1 \\ .... \\ I_{m1}^1 d_{m1}^1 + I_{m2}^1 d_{m2}^1 + ... + I_{mn}^1 d_{mn}^1 + I_{m1}^2 d_{m1}^2 + I_{m2}^2 d_{m2}^2 + ... + I_{mn}^2 d_{mn}^2 = N_{mn}^1 \end{cases}; \quad (28)$$

Для ОС 2

$$\begin{cases} I_{11}^1 d_{11}^1 + I_{12}^1 d_{12}^1 + ... + I_{1n}^1 d_{1n}^1 + I_{11}^2 d_{11}^2 + I_{12}^2 d_{12}^2 + ... + I_{1n}^2 d_{1n}^2 = N_{1n}^2 \\ I_{21}^1 d_{21}^1 + I_{22}^1 d_{22}^1 + ... + I_{2n}^1 d_{2n}^1 + I_{21}^2 d_{21}^2 + I_{22}^2 d_{22}^2 + ... + I_{2n}^2 d_{2n}^2 = N_{2n}^2 \\ I_{31}^1 d_{31}^1 + I_{32}^1 d_{32}^1 + ... + I_{3n}^1 d_{3n}^1 + I_{31}^2 d_{31}^2 + I_{32}^2 d_{32}^2 + ... + I_{3n}^2 d_{3n}^2 = N_{3n}^2 \\ .... \\ I_{m1}^1 d_{m1}^1 + I_{m2}^1 d_{m2}^1 + ... + I_{mn}^1 d_{mn}^1 + I_{m1}^2 d_{m1}^2 + I_{m2}^2 d_{m2}^2 + ... + I_{mn}^2 d_{mn}^2 = N_{mn}^2 \end{cases}; \quad (29)$$

У цих системах d_{mn}^{12} − значення $f\left(\theta_{mn}, \varphi_{mn}\right)$ для кожного ОС 1 і 2 з заданих напрямків $\theta_{mn}, \varphi_{mn}$, а N_{mn}^{12} – коефіцієнти парціальних діаграм випромінювачів $f\left(\theta_{mn}, \varphi_{mn}\right)$ у кутових секторах спостереження максимуму ДС СПАР по двох ОС 1 і 2 із заданих напрямків $\theta_{mn}, \varphi_{mn}$.

1. Складається система рівнянь, які зв'язують комплексні амплітуди струмів в випромінювачах та коефіцієнти при парціальних ДС для двох ОС.

2. Усі обчислювальні операції у приймальних каналах БП СРЛС є находженням спільних розв'язань систем рівнянь за допомогою розробленого алгоритму. Він включає дії щодо визначення часткових фазових центрів СПАР БП СРЛС, які знаходяться шляхом викреслювання кожного з членів системи рівнянь по m рядках та n стовбцях (рядково-стовбцевий алгоритм обчислення).

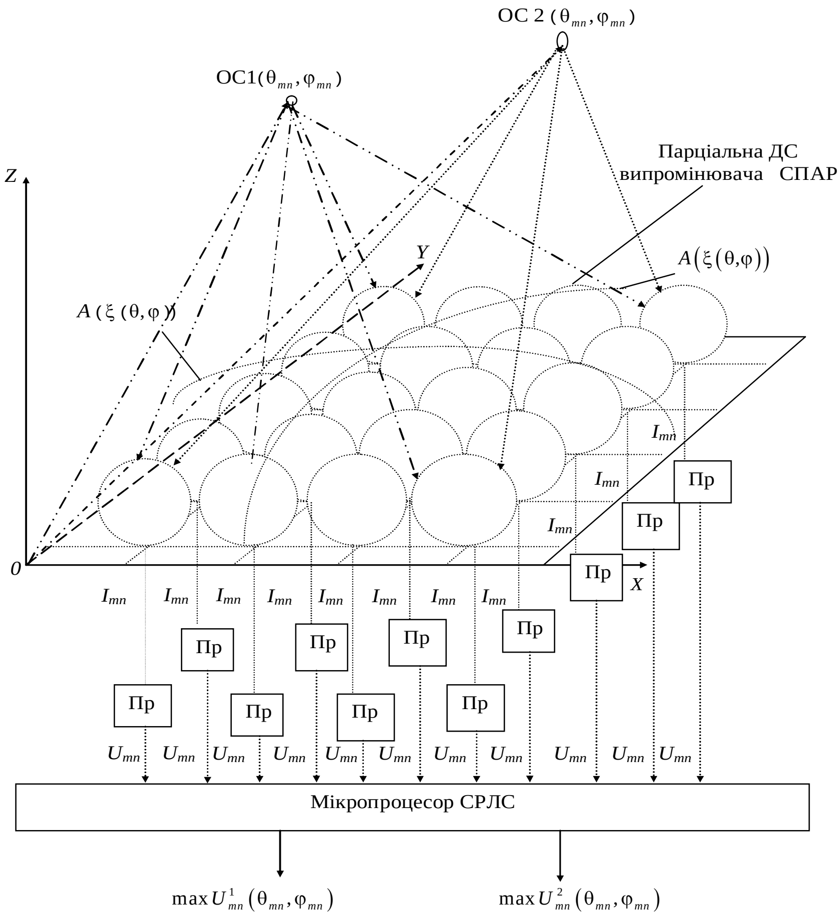

Рис. 8. СПАР в режимі роботи СРЛС на прийом (фрагмент)

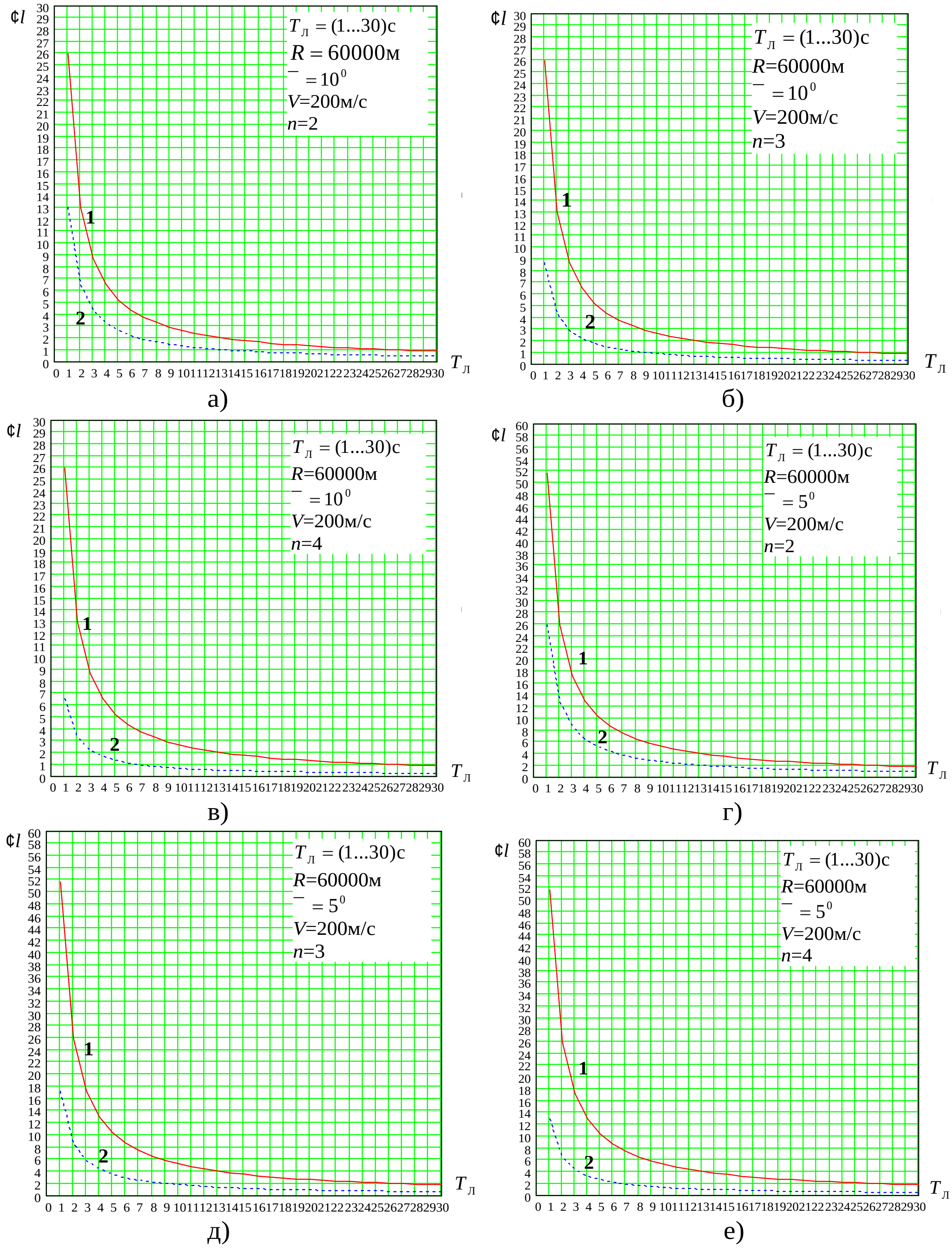

Рис. 9. Порівняльна характеристика залежності роздільної здатності від часу синтезування в режимах реального променю (1-крива), БП локації (2-крива) та допплерівського звуження променю (при заданих умовах $\delta l \le 30$м)

У кожному такому частковому фазовому центрі СПАР БП СРЛС знаходяться відношення амплітуд струмів $I_{mn}(\theta_{mn}, \varphi_{mn})$ та фазові зсуви між ними ψ_{X_m}, ψ_{Y_n}, по осях X та Y сусідніх випромінювачів, за допомогою детермінантів матриці кожного часткового фазового центра СПАР БП СРЛС та матриць визначників $I_{mn}(\theta_{mn}, \varphi_{mn})$ та, ψ_{X_m}, ψ_{Y_n} по осях X та Y для кожного ОС 1 і 2 з заданих напрямків $\theta_{mn}, \varphi_{mn}$.

3. Алгоритм визначає $\max U_{mn}(\theta_{mn}, \varphi_{mn})$ для кожного ОС окремо за формулою

$$\max U_{mn}(\theta_{mn}, \varphi_{mn}) = \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} U_{mn}^{12} \exp j(\psi_{Xmn}^{12} + \psi_{Ymn}^{12}). \quad (30)$$

Амплітудні $\max U^1_{mn}\left(\theta_{mn},\varphi_{mn}\right)$ і $\max U^2_{mn}\left(\theta_{mn},\varphi_{mn}\right)$, а також фазові кутові координати визначаються за виразами

$$\varphi^1_{mn} = \text{arctg}(\frac{\psi_{y1}dx_1}{\psi_{x1}dy_1}) \text{ та } \theta^1_{mn} = \text{arctg}\sqrt{(\frac{\psi^2_{x1}}{\beta^2 dx^2_1}) + (\frac{\psi^2_{y1}}{\beta^2 dy^2_1})}\,,$$

$$\varphi^2_{mn} = \text{arctg}(\frac{\psi_{y2}dx_2}{\psi_{x2}dy_2}) \text{ та } \theta^2_{mn} = \text{arctg}\sqrt{(\frac{\psi^2_{x2}}{\beta^2 dx^2_2}) + (\frac{\psi^2_{y2}}{\beta^2 dy^2_2})}\,.$$

Формула для визначення дисперсії завад квантування в АЦП мікропроцесора згідно з [4, 5] має вид:

$$\sigma^2_{\text{П.КВ.}}(\frac{I^{12}_{mn}}{I^{12}_{00}}) = \frac{1}{3}(\frac{Д\{U^{12}_{mn}\}}{2^{B+1}})\,, \quad (31)$$

де U^{12}_{mn} – динамічний діапазон вхідної напруги АЦП; B – розрядність АЦП.

Шляхом математичного моделювання проведена оцінка ефективності застосування БП прийому РЛІ в БП СРЛС у порівнянні з відомими режимами локації, а саме: реального променю та допплерівського звуження променю. На рис. 9 позначено: $T_Л$ - час локації об'єкту спостереження; R - дальність до об'єкту спостереження; θ - кут огляду об'єкту спостереження в передній зоні огляду; V - швидкість руху носія БРЛЗ; n - кількість носії в групі повітряної радіолокаційної складової системи спостереження.

Проведений аналіз результатів моделювання показав, що застосування БП локації в СРЛС дозволяє значно скоротити час огляду об'єктів спостереження [16].

Висновки

На основі вище викладеного матеріалу можна зробити висновок, що розроблений алгоритм дозволяє вимірювати кутові координати при використанні СПАР-БП СРЛС з дисперсіями (похибками) вимірювання $\delta^1_Ц$, $\delta^2_Ц$ по кожному ОС 1 і 2 згідно з викладеним аналітичним апаратом.

Проведений аналіз результатів моделювання БП прийому РЛІ в СРЛС у порівнянні з відомими режимами локації показав, що застосування БП локації в СРЛС дозволяє значно скоротити час огляду об'єктів спостереження за рахунок підвищення роздільної здатності системи за кутовими координатами.

Список літератури

1. *Верба В.С. Тенденции развития систем радиолокационного наблюдения космического базирования / В.С Верба, Л.Б. Неронский, С.С. Поливанов // Наукоемкие технологии. - 2009. - Т. 10, № 8. - С.3-9.*
2. *Ksendzuk A.V. Modelling SAR primary and secondary processing algorithms. Estimating quality of the processing techniques / A.V. Ksendzuk, V.K Volosyuk, N.S. Sologub // 5-th European Conference on Synthetic Aperture Radar EUSAR 2004, (Ulm, Germany. May 24–28 2004). – Ulm, Germany, 2004. - Vol. 2 - P. 1013-1016.*
3. *Совместный анализ данных оптических и радиолокационных сенсоров: возможности, ограничения и перспективы / Л.Н. Захарова, А.И. Захаров, М.В. Сорочинский, та ін. // Радиотехника и электроника. - 2011. - Т 56, №1. - С. 5–19.*
4. *Synthetic Aperture Radar for Earth and Sea Surface Observations / I.G. Osipov, L.B. Neronskiy, V.E. Turuk, V.I. Andrianov, V.S. Verba, A.V. Korolev, et al. // Proc. of EUSAR'2004, (Ulm, Germany. May 24–28 2004).). – Ulm, Germany, 2004. - V. 1. - P. 59-62.*
5. *Calculated Performance of SAR for High Orbit Spacecraft Using Nuclear Power Supply / I.G. Osipov, L.B. Neronskiy, V.I. Andrianov, V.S. Verba, K.V. Kozlov, V.N. Kurenkov, et al. // Proc. of EUSAR'2006, (Dresden, Germany. May 16–18 2006). - Dresden, Germany, 2006. – P. 67-78.*
6. *Рудаков В.І. Цифровий надвисокочастотний амплiфазометр в багатопозиційних системах радіолокації / В.І. Рудаков, С.В. Толюпа, В.А. Дружинін // Зб. наук. праць ВІТІ НТУУ "КПІ". – № 3. – К.: ВІТІ НТУУ КПІ, 2011. – С. 94–105.*
7. *Справочник по антенной технике. Т1 / [Бахраха Л.Д., Зелкина Е.Г., Фельда Я. Н. и др.]; под ред. Е.Г. Зелкина. - М.: Радиотехника, 1997. - 242 с.*
8. *Варюхин В. А. Основы теории многоканального анализа. - К.: ВА ПВО СВ, 1993. - 172 с.*
9. *Основы построения РЛС / [Под ред. И.А. Коваленко и Б.Ф.Бондаренко]. - К.: КВИРТУ, 1976. - 242 с.*
10. *Рудаков В.И. Цифровой амплифазометр СВЧ для радиотехнических, систем специального назначения / В.И. Рудаков // Известия высших учебных заведений. Сер. Радиоэлектроника. Военные радиоэлектронные технологии. - 2006. - Т. 49, № 4. - С. 68-80.*
11. *Рудаков В.И. Тропосферные системы связи с адаптивными антеннами. - К.: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, "Авионика", 1999. – 295 с.*
12. *Вендик О.Г. Антенны с немеханическим движением луча. Введение в теорию / О.Г. Вендик - М.: Сов. радио, 1965. - 360 с.*
13. *Бахрах Л.Д. Синтез излучающих систем / Л.Д. Бахрах, С.Д. Кременецкий. - М.: Сов. радио, 1974. - 229 с.*
14. *Монзинго Р.А. Адаптивные антенные решетки / Р.А. Монзинго, Т.У. Миллер; пер. с англ.; под ред. В. А. Лексаченко. - М.: Радио и связь, 1986. - 440 с.*
15. *Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин – К.: КВЦ, 2000. – 472 с.*
16. *Дружинін В.А. Проблеми формування та обробки радіолокаційної інформації в системах радіобачення: монографія / В.А. Дружинін. - К.: Логос, 2013. – 230 с.*

Надійшла до редколегії 03.08.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Толюпа, Державний університет телекомунікацій, Київ.

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ МОНИТОРИНГА В МНОГОПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМАХ РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ

В.А. Дружинин

Разработан алгоритм измерения угловых координат объектов мониторинга в многопозиционных системах радиолокационного наблюдения при реализации синтезированной плоской антенной решетки на определенных интервалах времени. Алгоритм разработан с учетом факторов, определяющих измерение координат объектов мониторинга, в системах радиолокационного наблюдения авиационно-наземного базирования с изменяющейся во времени пространственной конфигурацией.

Ключевые слова: *дистанционно пилотируемый летательный аппарат, многопозиционная система радиолокационного наблюдения, синтезированная плоская антенная решетка.*

AN ALGORITHM OF DETERMINATION OF ANGULAR COORDINATES OF MONITORING OBJECTS IS IN THE MULTIPOSITION SYSTEMS OF RADIO-LOCATION SUPERVISION.

V.A. Druzhinin

The algorithm of measuring of angular coordinates of monitoring objects is worked out in the multiposition systems of radio-location supervision during realization of the synthesized flat array on certain time domains. An algorithm is worked out taking into account factors, qualificatory measuring of coordinates of monitoring objects, in the systems of radio-location supervision of the aviation-surface basing with time-varying spatial configuration.

Keywords*: remotedly pilot-controlled aircraft, multiposition system of radio-location supervision, synthesized flat array.*