

АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ В АКТИВНИХ АНТЕННИХ СИСТЕМАХ

В даній статті представлена розробка алгоритму виміру кутових координат повітряних цілей в радіолокаційній багатопозиційній системі при застосуванні цифрового надвисокочастотного ампліфазометра. В якості ампліфазометра можна розглядати плоску цифрову еквідистантну антенну решітку оскільки вона є надвисокочастотним пристроєм який визначає амплітуду та фазу луна-сигналу з будь-якого напрямку. Алгоритм розроблено з урахуванням факторів визначення координат повітряних цілей в багатопозиційній системі.

Ключові слова: багатопозиційна радіолокаційна станція, антенна решітка, кутові координати, алгоритм виміру кутових координат, повітряна ціль, діаграма спрямованості.

Значна увага зараз приділяється багатопозиційним радіолокаційним станціям (РЛС) з плоскими цифровими еквідистантними антенними решітками (ПЕЦАР) [1,2]. Багатопозиційна система будується з використанням кількох РЛС з ПЕЦАР і спеціальних алгоритмів виміру параметрів сигналів, що відбиті від повітряної цілі (ПЦ). ПЕЦАР являє собою надвисокочастотний (НВЧ) пристрій, який визначає амплітуду та фазу луна-сигналу з будь-якого напрямку. Тому ПЕЦАР можна розглядати як цифровий НВЧ ампліфазометр (ЦНВЧА) в багатопозиційній системі (БПС) визначення координат ПЦ.

Метою роботи є розробка алгоритму визначення кутових координат повітряної цілі в багатопозиційній системі з ПЕЦАР-ЦНВЧА.

Алгоритм виміру кутових координат ПЦ в БПС з ПЕЦАР-ЦНВЧА розробляється за умов, що ПЕЦАР:

- формує максимум діаграми спрямованості (ДС) в напрямку кутових координат ПЦ θ, φ у режимі роботи РЛС на передачу;
- визначає відношення сигнал/шум S/N за допомогою ЦНВЧА у режимі роботи РЛС на прийом;
- забезпечує вимірювання кутових координат ПЦ θ, φ .

Подання ПЕЦАР у виді ЦНВЧА можливо тоді, коли вимірювану амплітуду та фазу сигналу, відбитого від ПЦ, кутові координати якої треба вимірювати, можна визначити. Для цього потрібно класифікувати ПЕЦАР з ЦНВЧА з певними припущеннями.

По-перше, при визначенні кутових координат ПЦ у декартовій (X, Y, Z) або сферичній (R, θ, φ) системах координат за допомогою ПЕЦАР, яка має амплітудну та фазову ДС, можливо здійснювати вимір кутових координат ПЦ за допомогою амплітудно-фазової ДС ПЕЦАР. Необхідно тільки ідентифікувати ціль за параметрами ПЕЦАР та ЦНВЧА. Ця процедура складає першу частину алгоритму виміру кутових координат ПЦ при використанні ПЕЦАР.

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

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 ПЦ, складає третю частину алгоритму виміру кутових координат ПЦ при використанні ПЕЦАР-ЦНВЧА.

Наведені три частини алгоритму виміру кутових координат ПЦ при використанні ПЕЦАР можуть бути реалізовані як один алгоритм виміру кутових координат ПЦ за допомогою ЦНВЧА, якій входить до контуру РЛС. Структурна схема алгоритму виміру кутових координат ПЦ при використанні ПЕЦАР показана на рис. 1, а структурна схема ЦНВЧА – на рис. 2.

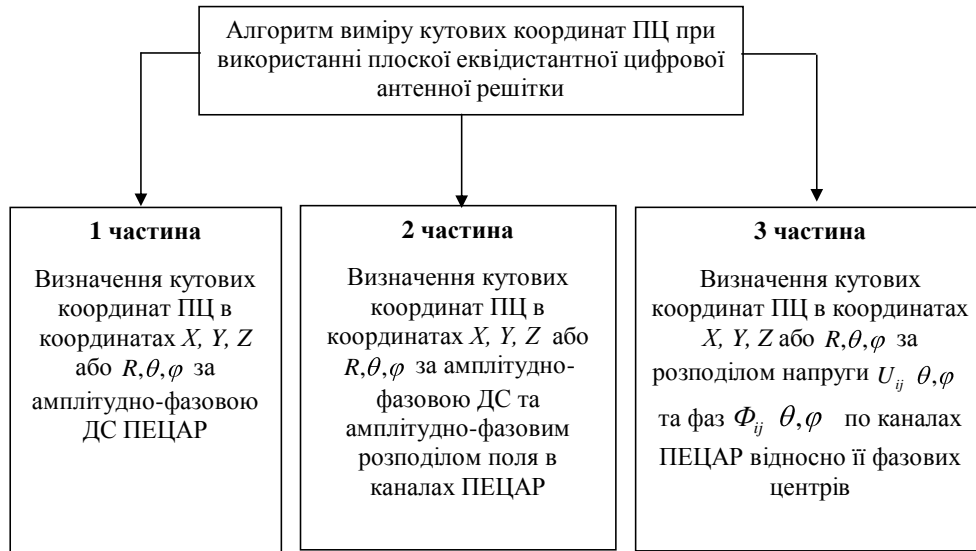


Рис. 1. Структурна схема алгоритму виміру кутових координат повітряних цілей при використанні плоскої еквідистантної цифрової антенної решітки

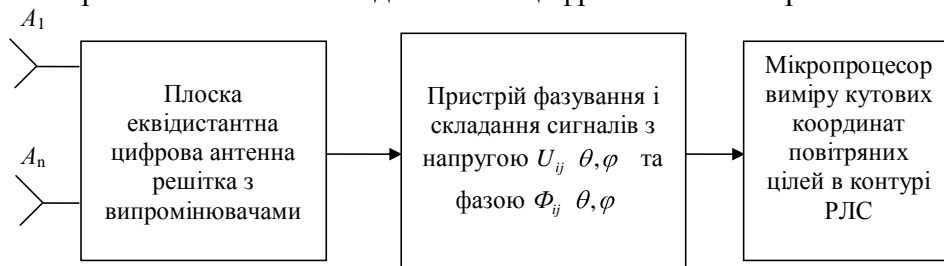


Рис. 2. Структурна схема цифрового НВЧ ампліфазометра в контурі РЛС

Структурна схема алгоритму виміру кутових координат ПЦ при використанні ПЕЦАР-ЦНВЧА містить три складові частини послідовного розрахунку кутових координат ПЦ. Відповідно до цього необхідно розробити структурну схему ЦНВЧА, яка точно б відповідала послідовності розрахунку виміру кутових координат згідно з наведеним алгоритмом та структурній схемі антенної системи в частині її прийому і обробки сигналів на НВЧ та в контурі РЛС. НВЧ частина ПЕЦАР-ЦНВЧА, яка зображена на рис. 2, містить випромінювачі, багатоканальний НВЧ пристрій розподілення сигналів, канали прийому сигналів з виділенням сигналів з напругою U_{ij}, θ, φ та фазою $\Phi_{ij}, \theta, \varphi$. Низькочастотна (НЧ) частина ПЕЦАР-ЦНВЧА містить пристрої обробки сигналу та спряження з мікропроцесором сигналів, який здійснює вимір кутових координат ПЦ в контурі РЛС. Ці дві частини і є основою ЦНВЧА. Перша частина структурної схеми алгоритму формалізується таким чином. Площина апертури ПЕЦАР 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. 3).

ДС ПЕЦАР формується плоским розкритом $X_1X_2 - Y_1Y_2$ в напрямку на ПЦ відповідно до розв'язання задачі змішаного синтезу антен. Згідно з [1] існують чотири можливі задачі змішаного синтезу антен, коли задані: амплітудна ДС і амплітуда струму в ПЕЦАР; амплітудна ДС і фаза струму в ПЕЦАР; фазова ДС і амплітуда струму в ПЕЦАР; фазова ДС і фаза струму в ПЕЦАР. При цьому знаходяться середньоквадратичні відхилення заданої ДС $|f(U)|$ від ДС, яку отримано $|f(U^1)|$ в процесі розв'язання і яка повинна наближатися до потрібної ДС ПЕЦАР.

Здійснювати вимір кутових координат ПЦ можна за допомогою амплітудно-фазової ДС ПЕЦАР за умови ідентифікації її параметрів та параметрів ЦНВЧА. Тому необхідно розв'язати дві задачі.

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

$$J \psi_i \xi = \int_{u_1}^{u_2} [f_{\text{зад}}^2(U) - (\int_{-\sigma}^{\sigma} A(\xi) \cos(U\xi + \psi_i(\xi)) d\xi)^2 - (\int_{-\sigma}^{\sigma} A(\xi) \sin(U\xi + \psi_i(\xi)) d\xi)^2] dU. \quad (1)$$

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

$$J A_i(\xi) = \int_{u_1}^{u_2} [tg\Phi_{\text{зад}}^2(U) - (\int_{-\sigma}^{\sigma} A_i(\xi) \cos(U\xi + \psi(\xi)) d\xi)^2 - (\int_{-\sigma}^{\sigma} A_i(\xi) \sin(U\xi + \psi(\xi)) d\xi)^2] dU. \quad (2)$$

Процес наближення в зазначених задачах повинен бути таким, щоб кожна наступна функція заданих значень амплітуди та фази зменшувала б зміну функціонала $\delta J \dots$ згідно з [1]. За умовами виміру кутових координат ПЦ в ПЕЦАР необхідно скористатися зміною функціонала $\delta J \dots$ у задачі 2, коли задані фазова ДС $|\Phi(U)|$ та фаза струму $\psi \xi$. Тоді, згідно з [1],

$$\delta J \dots = -\varepsilon \int_{-\sigma}^{\sigma} \eta_i(\xi) F(\xi) d\xi, \quad (3)$$

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

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 $\psi \xi$. Тоді, згідно з [1], у рівнянні

$$tg\Phi_{\text{зАд}} U = \frac{\int_{-\sigma}^{\sigma} A(\xi) \sin(U\xi + \psi(\xi)) d\xi}{\int_{-\sigma}^{\sigma} A(\xi) \cos(U\xi + \psi(\xi)) d\xi} \quad (5)$$

інтеграли необхідно замінити сумами. В результаті отримаємо:

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

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

Згідно з [1] амплітудна характеристика ДС ПЕЦАР з вимірюванням кутових складових поля по кутових координатах ПЦ має дві компоненти:

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

$$E^\varphi = i \frac{\exp -jkR}{2\lambda R} \left[\left(\sin \theta + \frac{z_0}{\alpha} \cos \varphi \right) N_x - N_y \cos \theta \sin \varphi \right].$$

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

$$\Phi \theta, \varphi = R_0 + \Phi \theta, \varphi / k,$$

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

За умови розміщення ПЕЦАР відповідно до рис. 3

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

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

Незалежно від цього, фазову характеристику $\Phi \theta, \varphi$ ДС ПЕЦАР можливо представити, якщо реєструвати її хвильове поле з відновленням його інтенсивності. Відновлення хвильового поля ПЕЦАР, згідно з [1],

$$F \theta, \varphi = |F \theta, \varphi| \exp j \arg F \theta, \varphi$$

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

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

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 [1]. При цьому $\theta = kx/z$ – кутова просторова частота поля по осі X , $\varphi = ky/z$ – кутова просторова частота по осі Y .

Зв'язок між амплітудою та фазою хвильового поля як в ПЕЦАР, так і в ЦНВЧА встановлюється, виходячи з співвідношення [1]

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

Перевірка зв'язку дійсної та уявної частин функції $F \theta, \varphi$ проводиться за умовами Коші–Римана [1]:

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

В результаті знаходження $\arg F \theta, \varphi$ за [1] встановлюється зв'язок між амплітудною та фазовою ДС ПЕЦАР, що адекватно зв'язку між амплітудою та фазою сигналу в ЦНВЧА.

Системна методологія розробки алгоритму виміру кутових координат ПЦ при використанні ПЕЦАР-ЦНВЧА виконана на основі методу парціальних діаграм.

В цьому випадку апроксимація заданої ДС ПЕЦАР-ЦНВЧА проводиться за допомогою спеціальних функцій (парціальних діаграм), для кожної з яких може бути знайдено точне розв'язання задачі синтезу, тобто синтезовано амплітудну ДС ПЕЦАР-ЦНВЧА в режимі роботи РЛС на передачу (задача 1, рис. 4, 5).

Пошук розподілу джерел випромінювання ПЦ знаходиться в виді суперпозиції парціальних розподілів поля ПЕЦАР-ЦНВЧА, які контролюються окремими парціальними діаграмами випромінювачів, тобто синтезується ДС ПЕЦАР-ЦСВЧА в режимі роботи РЛС на прийом (задача 2, рис. 5).

В цьому випадку ДС ПЕЦАР-ЦНВЧА

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

де $f U$ – ДС одного випромінювача ПЕЦАР-ЦНВЧА; $|f_1 U|$ – ДС множника ПЕЦАР-ЦНВЧА.

Амплітудна ДС кожного випромінювача ПЕЦАР-ЦНВЧА являє "кардіоїду", яка "відтиснута" від площини XOY і має вид ідеального "кола".

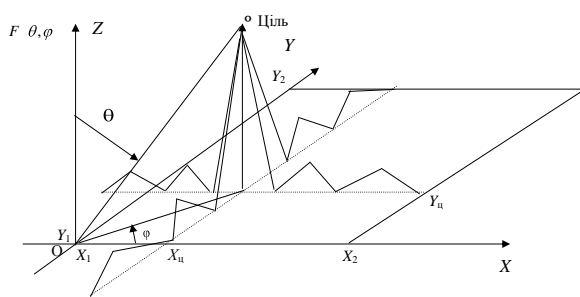


Рис. 4. Синтез ДС ПЕЦАР-ЦНВЧА в режимі роботи РЛС на передачу – прийом

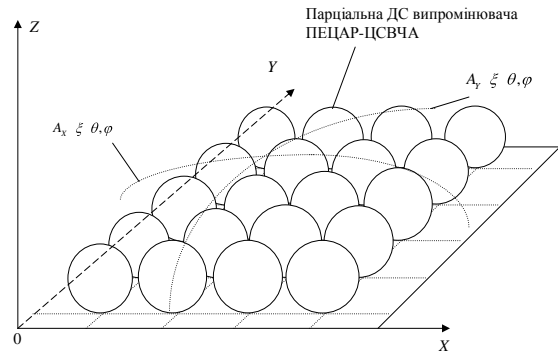


Рис. 5. Синтез ДС ПЕЦАР-ЦНВЧА в режимі роботи РЛС на передачу – прийом

ДС множника ПЕЦАР-ЦНВЧА визначається за таким виразом:

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

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 ПЕЦАР-ЦНВЧА; ρ_n, ρ_m – радіус-вектор, який визначає положення центра n -го та m -го випромінювачів ПЕЦАР-ЦНВЧА; $R_i = R / R', R_i = R / R''$ – радіус-вектори точок спостереження по двох координатах (рис. 3).

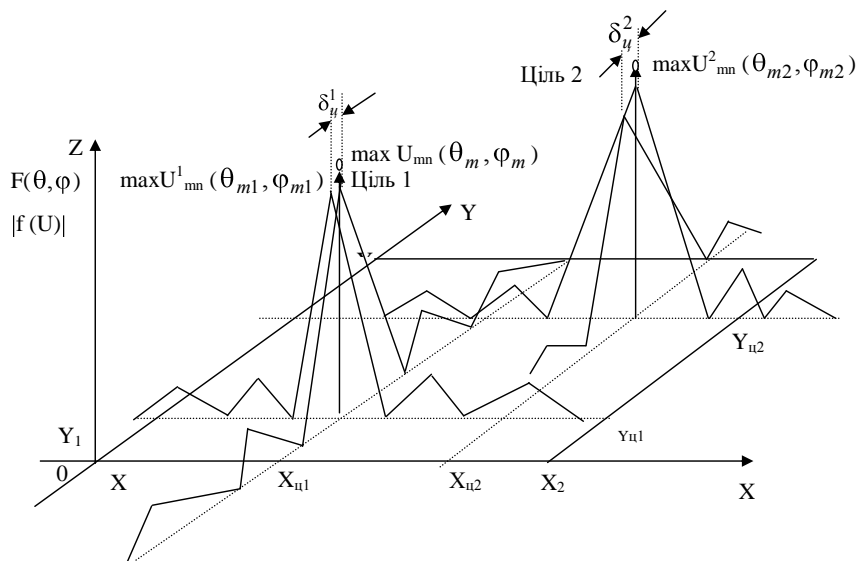


Рис. 6. ДС ПЕЦАР-ЦНВЧА в режимі роботи РЛС на прийом

Ступінь наближення двох функцій $|f(U)|$ та $F \theta, \varphi$ в двох площинах для двох цілей визначається величиною [1]

$$\delta_{\text{ц}} = \int_{-\pi}^{\pi} P(U_n) [F(U_n) - |f(U_n)|]^2 dU_n, \quad (10)$$

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

Вимірювання координат ПЦ за допомогою ПЕЦАР-ЦНВЧА повинне проводитися в режимі "передача – прийом". Тому необхідно провести аналіз адекватності процесу вимірювання реальному вимірюванню кутових координат ПЦ в РЛС з ПЕЦАР-ЦНВЧА, коли визначається максимум відношення сигнал/шум S/N із заданого просторового напрямку ДС $\theta_{mn}, \varphi_{mn}$ знаходження цілі 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 цілі та її швидкості в РЛС з ПЕЦАР-ЦНВЧА, коли максимум ДС встановлено в напрямку на ціль [3–5]:

$$\max_{\theta_{mn}, \varphi_{mn}} S/N = \frac{P_T(\theta_{mn}, \varphi_{mn}) G_T(\theta_{mn}, \varphi_{mn}) G_R(\theta_{mn}, \varphi_{mn}) \lambda^2 \sigma(\theta_{mn}, \varphi_{mn}) \tau(\theta_{mn}, \varphi_{mn})}{(4\pi)^3 k T R_1^2(\theta_{mn}, \varphi_{mn}) F_1(\theta_{mn}, \varphi_{mn}) R_2^2(\theta_{mn}, \varphi_{mn}) F_2(\theta_{mn}, \varphi_{mn}) L(\theta_{mn}, \varphi_{mn})}, \quad (11)$$

де $P_T(\theta_{mn}, \varphi_{mn})$ – потужність передавача в напрямку координат цілі, кВт; $k = 1,37 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постійна Больцмана; $T(\theta_{mn}, \varphi_{mn}) = T_A/L_R + T_R + T_E$ – ефективна температура каналу приймача для заданого напрямку, К; $T_A(\theta_{mn}, \varphi_{mn})$ – температура шумів антени для заданого напрямку, К; $L_R(\theta_{mn}, \varphi_{mn})$ – втрати між антеною і приймачем для заданого напрямку, дБ; $T_R(\theta_{mn}, \varphi_{mn})$ – ефективна температура шумів антена – приймач для заданого напрямку; $T_R = T_T(1 - 1/L)$, К; $\Phi(\theta_{mn}, \varphi_{mn})$ – фазова ДС ПЕЦАР-ЦНВЧА; $T_T(\theta_{mn}, \varphi_{mn})$ – температура лінії антена – приймач для заданого напрямку, К; $T_E(\theta_{mn}, \varphi_{mn})$ – ефективна температура шумів приймача для заданого напрямку, $T_E = (NF - 1)T_n$, К; $T_n(\theta_{mn}, \varphi_{mn})$ – температура, відносно якої визначається коефіцієнт шуму NF для заданого напрямку, К; $\tau(\theta_{mn}, \varphi_{mn})$ – час спостереження за ціллю 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 цілі для заданого напрямку, м²; λ – довжина хвилі РЛС, м; R_1^2 , R_2^2 – відстані від РЛС до цілей і від цілей до РЛС, км; $G_r(\theta_{mn}, \varphi_{mn})$ – підсилювання ПЕЦАР-ЦНВЧА в режимі роботи РЛС на передачу, дБ; $G_R(\theta_{mn}, \varphi_{mn})$ – підсилювання ПЕЦАР-ЦНВЧА в режимі роботи РЛС 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 ПЕЦАР-ЦНВЧА, яка задовольняє умову $\max D(\theta_{mn}, \varphi_{mn})$, може бути знайдена за формулою

$$F(\theta_{mn}, \varphi_{mn}) = F_R(\theta_{mn}, \varphi_{mn}) + jF_I(\theta_{mn}, \varphi_{mn}). \quad (12)$$

Фазова ДС ПЕЦАР-ЦНВЧА

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

характеризується частковим фазовим центром та його стійкістю. Вважається також, що окремі випромінювачі ПЕЦАР-ЦНВЧА мають фазові центри, які визначаються координатами їх розташування в площині XOY (рис. 3, 5).

До уваги береться:

1. ПЕЦАР-ЦНВЧА містить $2N+1$ рядів, які паралельні осі Y , та $2M+1$ рядів, які паралельні осі X .

2. Випромінювач ПЕЦАР-ЦНВЧА з номером mn має координати $x_m = md_x$ і $y_n = nd_y$, при цьому $-M \leq m \leq M$ і $-N \leq n \leq N$.

3. Множник ПЕЦАР-ЦНВЧА має вид

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

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

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

$$I_m = I_{m0} / I_{00}, \quad I_n = I_{n0} / I_{00}$$

для прийнятих обмежень на розподіл струмів по випромінювачах.

4. При законі розподілу струму по випромінювачах

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

множник ПЕЦАР-ЦНВЧА визначається виразом

$$F_k \theta_{mn}, \varphi_{mn} = I_{00}^2 \left[\sum_{m=-M}^M e^{im(\beta d_x \sin\theta \cos\varphi_m - \psi_x)} \right] \left[\sum_{n=-N}^N e^{in(\beta d_y \sin\theta \sin\varphi_m - \psi_y)} \right], \quad (16)$$

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

5. ПЕЦАР-ЦНВЧА має максимум ДС в напрямку на ціль 1 $\theta_{m1}, \varphi_{m1}$ та на ціль 2 $\theta_{m2}, \varphi_{m2}$ і, згідно з [6–10] та рис. 5, алгоритм виміру кутових координат цілей 1 і 2 за допомогою ПЕЦАР-ЦНВЧА визначає відповідні співвідношення:

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

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

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

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

6. Формування та зсув головних пелюсток ДС ПЕЦАР-ЦНВЧА по цілях 1 і 2 в режимах передачі – прийому виконується згідно з алгоритмом [3, 5, 6]

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

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

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

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

7. Поведінка множників F_{K1} , F_{K2} для $0 \leq \theta_m \leq \pi/2$ і $0 \leq \varphi_m \leq 2\pi$ враховується в алгоритмі відомими методами [1–8].

8. КСД ПЕЦАР-ЦНВЧА, згідно з [7, 8], в напрямку на цілі 1 і 2

$$\begin{aligned} \max D_1 \theta_{mn}, \varphi_{mn} &= \pi \cos \theta_{mn}^1 D_{X1}(\theta_{mn}^1, \varphi_{mn}^1) D_{Y1}(\theta_{mn}^1, \varphi_{mn}^1); \\ \max D_2 \theta_{mn}, \varphi_{mn} &= \pi \cos \theta_{mn}^2 D_{X2}(\theta_{mn}^2, \varphi_{mn}^2) D_{Y2}(\theta_{mn}^2, \varphi_{mn}^2). \end{aligned}$$

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:

$$G_r \theta_{mn}, \varphi_{mn} = f^2 \theta_{mn}, \varphi_{mn} \left[\sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \frac{I_{mn}}{I_{00}} e^{im d_{x1} \chi_{x1} + in d_{y1} \chi_{y1}} \right]^2 \eta \theta_{mn}, \varphi_{mn},$$

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

$$\begin{aligned} G_{R1} \theta_{m1}, \varphi_{m1} &= f^2 \theta_{mn}, \varphi_{mn} \left[\sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \frac{I_{mn}^1}{I_{00}^1} e^{im_1 d_{x1} \chi_{x1} + in_1 d_{y1} \chi_{y1}} \right]^2 \eta \theta_{mn}, \varphi_{mn}, \\ G_{R2} \theta_{m2}, \varphi_{m2} &= f^2 \theta_{mn}, \varphi_{mn} \left[\sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \frac{I_{mn}^2}{I_{00}^2} e^{im_2 d_{x2} \chi_{x2} + in_2 d_{y2} \chi_{y2}} \right]^2 \eta \theta_{mn}, \varphi_{mn}. \end{aligned}$$

10. Необхідно також враховувати взаємний вплив випромінювачів в режимі прийому, який згідно з [2, 6] та рис. 7 визначається за формулою

$$Z_{mn} \times |I_{mn}| = |U_{mn}|, \quad (25)$$

де Z_{mn} – матриця власних та взаємних опорів випромінювачів для кожної цілі; $|I_{mn}|$ – 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.

Для цілі $[Z_{mn}^1]$, $[I_{mn}^1]$ і $[U_{mn}^1]$ визначаються за виразами:

$$[Z_{mn}^1] = \begin{bmatrix} Z_{11}^1, \dots, Z_{1n}^1 \\ Z_{21}^1, \dots, Z_{2n}^1 \\ \dots \\ Z_{m1}^1, \dots, Z_{mn}^1 \end{bmatrix}, \quad [I_{mn}^1] = \begin{bmatrix} I_{11}^1, \dots, I_{1n}^1 \\ I_{21}^1, \dots, I_{2n}^1 \\ \dots \\ I_{m1}^1, \dots, I_{mn}^1 \end{bmatrix}, \quad [U_{mn}^1] = \begin{bmatrix} U_{11}^1, \dots, U_{1n}^1 \\ U_{21}^1, \dots, U_{2n}^1 \\ \dots \\ U_{m1}^1, \dots, U_{mn}^1 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

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

$$\begin{aligned}
 I_{11}^1 d_{11}^1 + I_{12}^1 d_{12}^1 + \dots + I_{1n}^1 d_{1n}^1 + I_{11}^2 d_{11}^2 + I_{12}^2 d_{12}^2 + \dots + I_{1n}^2 d_{1n}^2 &= N_{1n}^1; \\
 I_{21}^1 d_{21}^1 + I_{22}^1 d_{22}^1 + \dots + I_{2n}^1 d_{2n}^1 + I_{21}^2 d_{21}^2 + I_{22}^2 d_{22}^2 + \dots + I_{2n}^2 d_{2n}^2 &= N_{2n}^1; \\
 I_{31}^1 d_{31}^1 + I_{32}^1 d_{32}^1 + \dots + I_{3n}^1 d_{3n}^1 + I_{31}^2 d_{31}^2 + I_{32}^2 d_{32}^2 + \dots + I_{3n}^2 d_{3n}^2 &= N_{3n}^1;
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

$$I_{m1}^1 d_{m1}^1 + I_{m2}^1 d_{m2}^1 + \dots + I_{mn}^1 d_{mn}^1 + I_{m1}^2 d_{m1}^2 + I_{m2}^2 d_{m2}^2 + \dots + I_{mn}^2 d_{mn}^2 = N_{mn}^1;$$

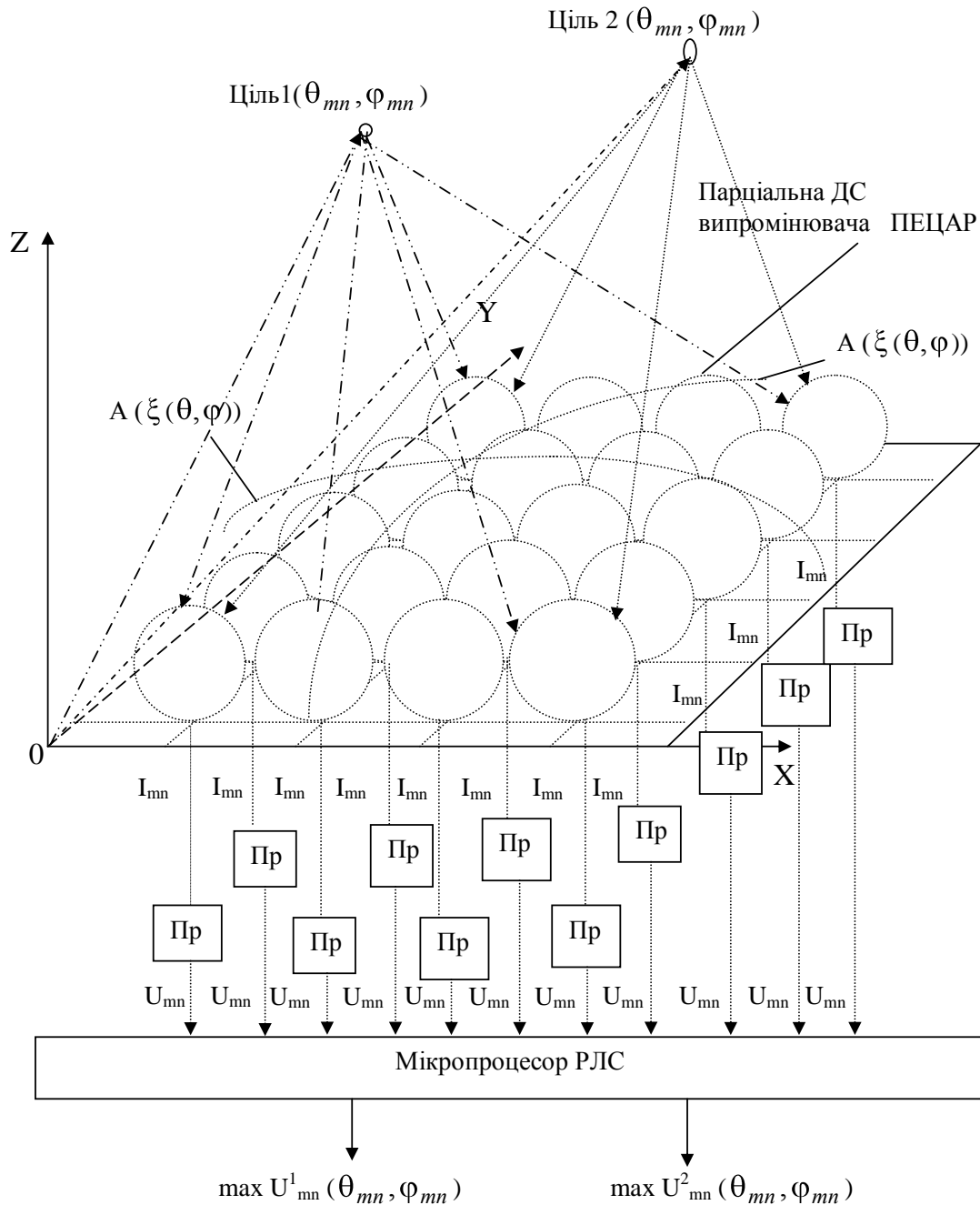


Рис.7. ПЕЦАР-ЦНВЧА в режимі роботи РЛС на прийом (фрагмент)

У цих системах d_{mn}^{12} – значення $f \theta_{mn}, \varphi_{mn}$ для кожної цілі 1 і 2 з заданих напрямків $\theta_{mn}, \varphi_{mn}$, а N_{mn}^{12} – коефіцієнти парціальних діаграм випромінювачів $f \theta_{mn}, \varphi_{mn}$ у кутових секторах спостереження максимуму ДС ПЕЦАР-ЦНВЧА по двох цілях 1 і 2 з заданих напрямків $\theta_{mn}, \varphi_{mn}$.

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

13. Алгоритм визначає c для кожної цілі окремо за формулою

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

Амплітудні $\max_{\theta_{mn}, \varphi_{mn}} U_{mn}^1$ і $\max_{\theta_{mn}, \varphi_{mn}} U_{mn}^2$, а також фазові кутові координати визначаються за виразами

$$\begin{aligned} \varphi_{mn}^1 &= \arctg\left(\frac{\psi_{y1} dx_1}{\psi_{x1} dy_1}\right) & \text{і} & \quad \theta_{mn}^1 = \arctg \sqrt{\left(\frac{\psi_{x1}^2}{\beta^2 dx_1^2}\right) + \left(\frac{\psi_{y1}^2}{\beta^2 dy_1^2}\right)}, \\ \varphi_{mn}^2 &= \arctg\left(\frac{\psi_{y2} dx_2}{\psi_{x2} dy_2}\right) & \text{і} & \quad \theta_{mn}^2 = \arctg \sqrt{\left(\frac{\psi_{x2}^2}{\beta^2 dx_2^2}\right) + \left(\frac{\psi_{y2}^2}{\beta^2 dy_2^2}\right)}. \end{aligned}$$

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

$$\sigma_{\text{п.кв.}}^2 \left(\frac{I_{mn}^{12}}{I_{00}^{12}}\right) = \frac{1}{3} \left(\frac{D\{U_{mn}^{12}\}}{2^{B+1}}\right), \quad (31)$$

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

Висновки. Розроблений алгоритм дозволяє вимірювати кутові координати при використанні ПЕЦАР-ЦНВЧА в контурі РЛС з дисперсіями (похибками) вимірювання $\delta_{\text{ц}}^1$, $\delta_{\text{ц}}^2$ по кожній цілі 1 і 2 згідно з формулою (10).

Література

1. Справочник по антенной технике / Под общ. ред. Л.Д. Бахраха, Е.Г. Зелкина. Т1; под ред. Я.Н. Фельда, Е. Г. Зелкина. – М.: Радиотехника, 1997. – 242 с.
2. Варюхин В.А. Основы теории многоканального анализа / В.А. Варюхин. – К.: ВАПВОСВ, 1993. – 172 с.
3. Основы построения РЛС / под ред. И.А. Коваленко и Б.Ф.Бондаренко. – К.: КВИРТУ, 1976. – 242 с.
4. Рудаков В.И. Цифровой амплифазометр СВЧ для радиотехнических систем специального назначения // Известия высших учебных заведений. Сер. Радиоэлектроника. Военные радиоэлектронные технологии / В.И. Рудаков. – К.:НТУУ «Киевский политехнический институт», 2006. - Т.49, № 4. – С. 68 – 80.
- 5 Рудаков В.И. Тропосферные системы связи с адаптивными антеннами / В.И. Рудаков. – К.: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, "Авионика", 1999. – 295 с.
6. Lohrer A.K. Improved azimuthal resolution of forward looking SAR by sophisticated antenna illumination function design // IEE Proc. Radar, Sonar and Navig. – 1998. – V. 145, № 2. – P. 128–134.
7. William F. Stenberg Electricity and electronics basic. / William F. Stenberg, Walter B. Ford // American technical society Chicago. USA. - 2002 y. - 222 p.
8. 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.