

УДК 535.3

О.В. Карпенко, В.В. Онищенко

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## ЦИФРОВІ АДАПТИВНІ АНТЕННІ СИСТЕМИ НА БАЗІ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК

В статті розглядаються особливості організації просторово-часової обробки сигналів для цифрової адаптивної антенної системи на базі фазованої антенної решітки крупноапертурної багатомодульної широкопasmової радіолокаційної станції короткохвильової частини дециметрового діапазону. Важливим аспектом такої організації є реалізація на першому етапі оптимальної адаптивної процедури придушення джерел завад, які впливають на бічні пелюстки діаграми спрямованості модуля, а на другому етапі – адаптивного придушення джерел завад, що розташовані в головному промені діаграми спрямованості модуля.

**Ключові слова:** цифрова адаптивна антенна система, фазована антенна решітка, радіолокаційна станція, просторово-часова обробка сигналів, діаграма спрямованості.

### Вступ

Фазовані антенні решітки (ФАР) являють собою найбільш ефективні та перспективні антенні системи (АС), які дозволяють здійснювати швидкий огляд простору, здатні забезпечувати багатофункціональний режим роботи, комплексування радіозасобів, адаптацію до конкретних радіоумов, попередню обробку надвисокочастотних (НВЧ) сигналів, електромагнітну сумісність та інше [1, 6].

Основою перспективних радіолокаційних комплексів є цифрові адаптивні антенні системи (ЦААС) на базі ФАР, які дозволяють створювати багатопроементні приймальні структури й є досить гнучкими в керуванні. Крім того, вони добре адаптуються в умовах різного роду перешкод і змінної електромагнітної обстановки. Адаптація відбувається автоматично відповідно до заданого алгоритму. У таких АС одночасно може проводитися обробка складних широкопasmових (ШС) сигналів. Вони містять у собі системи підсилювачів, змішувачів, аналого-цифрових (АЦП) і цифро-аналогових (ЦАП) перетворювачів, за допомогою яких здійснюється цифрове формування діаграми спрямованості (ДС). Загальне керування ЦААС здійснюється за допомогою високопродуктивної обчислювальної системи. У закордонній літературі такі АС мають назву «інтелектуальні антени» [2 – 4].

Слід зазначити, що у 80-90-х роках минулого століття адаптивні ФАР вже досить успішно використовувалися. Вони створювалися на основі аналогових НВЧ технологій або гібридних технічних рішень, що використовували складні та малостабільні діаграмоутворюючі схеми ФАР з тисячами феритових або напівпровідникових фазообертачів (ФО) і великою кількістю подільників і суматорів НВЧ сигналів. Такі схемотехнічні рішення неминуче призводили до прямих втрат енергії корисних сигналів в

антені, особливо при збільшенні її апертури та числа формованих променів, сприяли нестабільності антенних трактів, що позначалося на точності вимірів та ефективності захисту від перешкод.

Аналіз останніх досягнень та публікацій [1 – 5] свідчить про те, що перспективні радіолокаційні станції (РЛС) повинні створюватися на основі ЦААС і мати більш ефективні технічні й економічні характеристики за рахунок:

- використання високоточних цифрових діаграмоутворюючих схем;
- підключення малощумливих підсилювачів (МШП) і підсилювачів потужності безпосередньо до випромінюючих елементів антенної решітки (АР) з мінімальними втратами енергії сигналу;
- можливості керувати в реальному масштабі часу фазовим розподілом у розкритті АР;
- здійснювати швидке керування амплітудно-фазовим розподілом у розкритті як приймальної, так і передавальної ФАР за рахунок використання АЦП та ЦАП, які максимально наближені до поля випромінювачів;
- підвищення точності кутових вимірів;
- можливості адаптивно та гнучко формувати потрібну кількість променів АС з низьким рівнем бічних пелюсток, а також формування «нулів» ДС у напрямках на перешкоди із глибиною додаткового послаблення перешкод до 40-50 дБ;
- використання входів і виходів АЦП та ЦАП для повної цифрової обробки сигналів (ЦОС) і формування складних ШС сигналів за рахунок використання фільтрації, модуляції, демодуляції, кодування, декодування і т.д.

Особливості організації цифрової просторово-часової обробки сигналів (ПЧОС) у таких РЛС обумовлені:

- необхідністю забезпечення високого енергетичного потенціалу РЛС і високої точності вимірю-

вання кутових координат, що призводить до застосування приймальної антени у вигляді крупноапертурної АР з надзвичайно великою кількістю елементів (декілька тисяч і навіть десятків тисяч), що потребує побудови багатомодульної структури АР і, як мінімум, двоетапної процедури ПЧОС у даній РЛС – внутрішньомодульної та міжмодульної;

– високою роздільністю та точністю вимірювання дальності, тобто необхідністю використання ШС сигналів, що, у поєднанні з великими розмірами антени потребує компенсації групового запізнювання сигналів і завад на розкритті ФАР у процесі проведення ПЧОС.

### Результати досліджень

Розглянемо реалізацію ЦААС на базі ФАР для крупноапертурної багатомодульної ШС РЛС короткохвильової частини дециметрового діапазону. З метою спрощення обробки в ній застосовується двоетапна процедура адаптивної просторової і просторово-часової обробки сигналів. При цьому компенсація групового запізнювання сигналів відбувається лише на другому етапі.

На першому етапі шляхом відповідного фазування сигналів гетеродину здійснюється аналогова просторова обробка сигналів (ПОС) всередині кожного  $m$ -го модуля, який являє собою підрешітку з  $n$  приймальними випромінюючими елементами. При цьому загальна кількість випромінюючих елементів  $N_{\Sigma}$  визначається добутком  $m$  на  $n$ .

Схема формування та розведення сигналів гетеродину (рис. 1) має  $N_{\text{сг}}$  каналів, кожен з яких містить ЦАП, яким керує спецобчислювач (СО) і формує на проміжній частоті  $f_3$  сигнал з заданою фазою  $\varphi_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N_{\text{сг}}$ ), а також змішувач, в якому відбувається перетворення частоти сигналів гетеродину з проміжної частоти  $f_3$  на частоту  $f_1$ .

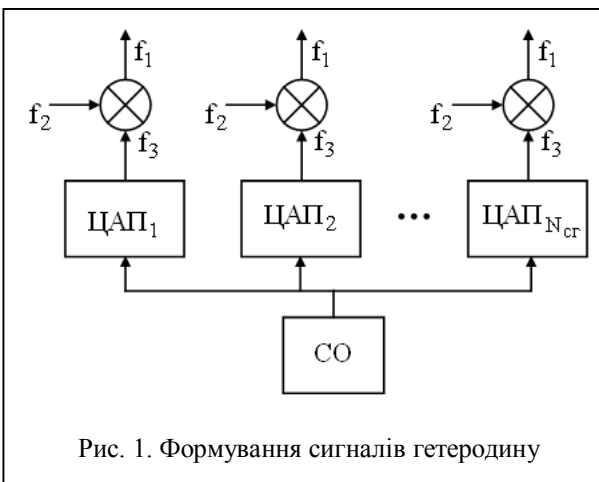


Рис. 1. Формування сигналів гетеродину

Сформовані сигнали гетеродину розводяться по відповідним каналам перетворення частоти сек-

цій ФАР. Таким чином, кожен сформований сигнал розводиться по  $N_{\Sigma}$  змішувачам секцій.

У тракці приймання для кожного випромінювача АР (рис. 2) містяться суматор, МШП і змішувач, у якому відбувається перетворення частоти шляхом перенесення спектру частот вхідного сигналу з частоти-носія на проміжну частоту.

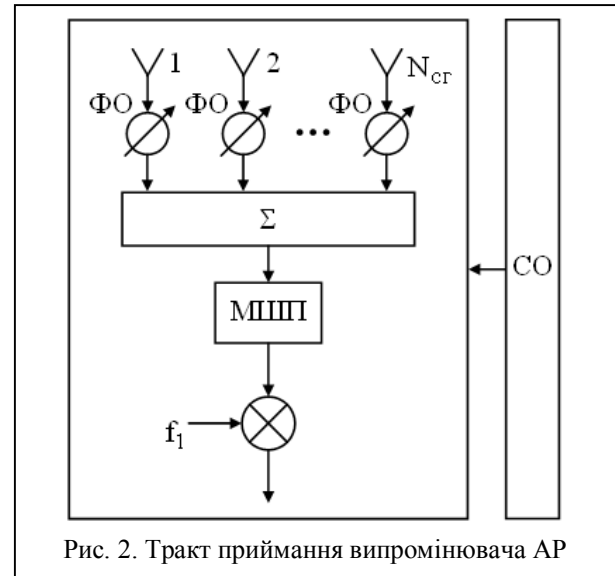


Рис. 2. Тракт приймання випромінювача АР

Можливі два варіанти побудови внутрішньомодульної (секційної) обробки:

– адаптивне придушення завад шляхом формування «нулів» у ДС секції у напрямку джерел завад, які розташовані в бічних пелюстках ДС секції, з використанням інформації про координати джерел завад;

– використання звичайної неадаптованої процедури керування ДС секції.

За умов відносно невеликих розмірів секції використання адаптивного придушення джерел завад, що розташовані в бічних пелюстках ДС секції, дає можливість виконати цю процедуру без урахування групового запізнювання корисних сигналів і завад на апертурі секції. Спільне використання двох стадій адаптивної ПОС дозволяє відчутно спростити апаратуру секції та відповідні алгоритми, за умов збереження високих характеристик завадозахищеності.

На другому етапі в  $m$  модулях ЦААС здійснюється цифрова міжмодульна ПЧОС. При цьому в кожному модулі оброблюються  $m$  просторових каналів.

Для реалізації адаптивного придушення завад використовується СО, в якому виконуються необхідні обчислення фазового керування ДС секції.

Елементна база ЦААС визначається необхідністю аналого-цифрового перетворення та ЦОС у темпі надходження цифрових даних. Незважаючи на високі вимоги до здійснення паралельної ЦОС у модулях і СО, під час реалізації може використовуватися база сигнальних процесорів (СП), які

серійно випускаються різними закордонними фірмами.

Структурна схема приймальної частини ЦААС наведена на рис. 3. До її складу входять блоки:

- приймання та цифрового перетворення;
- попередньої частотно-часової обробки сигналів (ЧЧОС);
- просторової обробки сигналів;
- заключної ЧЧОС.

Блок приймання та цифрового перетворення складається з  $m$  субблоків, кожен з яких має  $n$  просторових каналів та мультиплексор, який поєднує їх для обробки в одному СП попередньої ЧЧОС. Кожен просторовий канал містить тракт приймання та АЦП сигналів. Перенесення спектру високочастотних сигналів виконується з одним або двома перетвореннями.

Блок попередньої ЧЧОС містить  $m$  СП, у кожному з яких для  $n$  просторових каналів проводиться попередня ЧЧОС, яка полягає у формуванні  $r$  частотних каналів у загальній смузі частот  $\Delta f$  зі смугою пропускання  $\Delta f_1 = \Delta f / r$  кожен, та проріджуванні (децимації) вибирань у кожному з  $r$  частотних каналів зі смугою  $\Delta f_1$ .

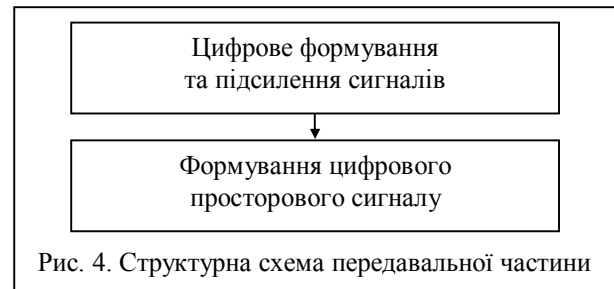
Вихідна інформація кожного процесора низької частоти містить проріджені вибіркові значення  $n \cdot r$  просторових і вузькосмугових (ВС) частотних каналів і  $n$  просторових ШС каналів.

Блок ПОС здійснює формування ВС і ШС променів. Блок цифрового формування та підсилення сигналів має два квадратурні канали цифроаналогового перетворення сигналу, кожен з яких складається з ЦАП і модулятора. При цьому ЦАП перетворює цифровий сигнал, що надходить від блоку формування цифрового просторового сигналу, в аналоговий відеосигнал, а модулятор перетворює відеосигнал в радіосигнал шляхом модуляції проміжної частоти гетеродину  $f_r$ , яка уточнюється в процесі розробки.



У блоці заключної ЧЧОС для кожного з ВС променів у СО виконується матрична ЧЧОС за сигнальними гіпотезами, що відповідають частотному, часовому розрізненню сигналів за їх кодovими значеннями, та відбувається формування підсумкової матриці сигнальної інформації.

Структурна схема передавальної частини ЦААС (рис. 4) складається з блоку цифрового формування та підсилення сигналів і блоку формування цифрового просторового сигналу.



Далі відбувається повторне перетворення частоти та підсилення сигналу на частоті-носії.

Блок формування цифрового просторового сигналу в цифровому вигляді реалізує просторову функцію модуляції випромінюваного вектора вхідних сигналів.

Блок обчислення вагових векторів просторового сигналу на передачу та на приймання відокремлений від приймальної та передавальної частин ЦААС.

Для забезпечення високої заводо захищеності ЦААС вимоги до реальної смуги пропускання частот  $\Delta f$  приймального тракту (за умов проведення попереднього обмеження її в тракті приймання за рахунок фільтрації) та відповідно до частоти дискретизації  $f_d$  під час аналого-цифрового перетворення сигналів повинні в умовах ЧЧОС бути дещо вищими за звичайні, які встановлюються відповідно до теореми відліків. У даному випадку  $f_d$  повинна складати  $(10 \div 20) \Delta f$ .

Це здійснюється з метою компенсації групового запізнювання сигналів, забезпечення спектрального аналізу завад у максимально можливій смузі, яка може бути забезпечена в межах робочого діапазону частот РЛС, а також вирівнювання частотних характеристик приймальних трактів у смузі  $\Delta f$  сигналу, що обробляється.

Розглянемо вимоги до рівнів квантування сигналів у ЦААС. Відомо, що характеристики квантування сигналів встановлюють ціну молодшого розряду під час квантування сигналів і кількість розрядів квантування в АЦП. Величину молодшого розряду можна вважати рівною середньоквадратичному значенню (СКЗ) шуму на вході АЦП. Така величина кроку квантування забезпечує прийнятні характери-

стики якості ЦОС, які характеризуються величиною енергетичних втрат, під час виділення сигналу з шуму, яка складає  $-0,35$  дБ. Вимоги до числа рівнів квантування (числа розрядів квантування в АЦП) визначаються динамічним діапазоном (ДД) спільної лінійної обробки сигналів.

Слід відзначити, що в ЦААС перетворення сигналів у цифрову форму проводиться на більш ранній стадії, ніж у традиційних системах. Це дозволяє реалізувати надто великий ДД спільної лінійної обробки за умов знижених вимог до числа рівнів квантування сигналу в АЦП. У логарифмічному масштабі підсумковий ДД  $D_{\Sigma}$  спільної лінійної обробки сигналів на виході ЦААС можна записати у вигляді наступної суми:

$$D_{\Sigma} = 6 N_{\text{АЦП}} + 10 \lg N_{\Sigma} + 10 \lg N_{\text{ЧЧОС}}, \quad (1)$$

де  $N_{\text{АЦП}}$  – кількість розрядів АЦП;  $N_{\Sigma}$  – ефективна кількість випромінюючих елементів;  $N_{\text{ЧЧОС}}$  – ефективна розмірність ЧЧОС.

З виразу (1) видно, що перший доданок визначає ДД АЦП, другий – збільшення ДД за рахунок ПОС, третій – збільшення ДД за рахунок ЧЧОС. При цьому у якості мінімального рівня сигналу на усіх етапах обробки прийнято СКЗ шуму після завершення обробки кожного етапу.

Крім того, вираз (1) дозволяє визначити вимоги не тільки до числа розрядів АЦП, але й мінімізувати вимоги до розрядної сітки СП на різних етапах обробки сигналу. Це дає змогу суттєво знизити об'єм апаратури ЦОС, що є особливо важливим у випадку застосування матричних помножувачів з фіксованою точкою, продуктивність яких зворотно пропорційна числу розрядів оброблювального сигналу.

## Висновки

Проведений аналіз принципів побудови ЦААС на базі ФАР дозволив визначити основні тех-

нічні рішення та можливі застосування в радіолокаційних системах, а також сформулювати вимоги до трактив приймання й аналого-цифрового перетворення сигналів. Важливим аспектом організації просторово-часової обробки сигналів є реалізація двоетапної процедури ПОС.

На першому етапі (внутрішньомодульній обробці) реалізується оптимальна адаптивна процедура придушення джерел завад, що впливають на бічні пелюстки ДС модуля.

На другому етапі (міжмодульній обробці) здійснюється адаптивне придушення джерел завад, які розташовані в головному промені ДС модуля. Це дає можливість виділяти корисний сигнал в умовах великої кількості завад без використання складної процедури ПЧОС.

## Список літератури

1. *Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Д.И. Воскресенского. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2012. – 744 с.: ил.*
2. *Stutzman Warren L. Antenna theory and design / Warren L. Stutzman, Gary A. Thiele. – 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2013. – 843 p.*
3. *Wulf-Dieter Wirth. Radar Techniques Using Array Antennas. – 2nd Edition. IET Radar, Sonar and Navigation Series 26., 2013. – 558 p.*
4. *Position location: theory, practice, and advances / editors, Seyed A. (Reza) Zekavat, R. Michael Buehrer. – 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2012. – 1256 p.*
5. *Баланис К.А. Введение в смарт-антенны / К.А. Баланис, П.И. Иоанидес. – М.: Техносфера, 2012. – 200 с.*
6. *Вендик О.Г. Фазированная антенная решетка – глаза радиотехнической системы / О.Г. Вендик // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – №2. – С. 115-120.*

Надійшла до редколегії 10.06.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків.

## ЦИФРОВЫЕ АДАПТИВНЫЕ АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

О.В. Карпенко, В.В. Онищенко

*В статье рассматриваются особенности организации пространственно-временной обработки сигналов для цифровой адаптивной антенной системы на базе фазированной антенной решетки для крупноапертурной многомодульной широкополосной радиолокационной станции коротковолновой части дециметрового диапазона. Важным аспектом такой организации является реализация на первом этапе оптимальной адаптивной процедуры подавления источников помех, воздействующих на боковые лепестки диаграммы направленности модуля, а на втором этапе – адаптивного подавления источников помех, расположенных в главном луче диаграммы направленности модуля.*

**Ключевые слова:** цифровая адаптивная антенная система, фазированная антенная решетка, радиолокационная станция, пространственно-временная обработка сигналов, диаграмма направленности.

## DIGITAL ADAPTIVE ANTENNA SYSTEMS ON THE BASE OF PHASED ARRAYS

O.V. Karpenko, V.V. Onyshchenko

*Organization peculiarities of space-time signal processing for digital adaptive antenna systems on the base of the phased array for large-aperture multimodule wideband D-band radar were discussed in the article. The optimal adaptive procedure of cancellation of jams that affect the side lobes of a module radiation pattern is realized on the first stage, and adaptive cancellation of jams located within the main lobe of a module radiation pattern is realized on the second stage.*

**Keywords:** digital adaptive antenna system, phased array, radar, space-time signal processing, radiation pattern.