

УДК 623.762/.764

А.В. Вакаренко, М.М. Нікітін, Р.І. Митяй

Центральний НДІ озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ

## УДОСКОНАЛЕННЯ ЗЕНІТНИХ РАКЕТНИХ КОМПЛЕКСІВ ТАКТИЧНОЇ ЛАНКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК

*Розглядаються відмінні риси і переваги застосування цифрових антенних решіток та РЛС, створюваних на їхній основі. Пропонуються шляхи впровадження технології цифрових антенних решіток при модернізації існуючих та розробці нових зенітних ракетних комплексів тактичної ланки.*

**Ключові слова:** цифрова антенна решітка, радіолокаційна станція, зенітний ракетний комплекс.

### Вступ

Характер розвитку радіолокаційних засобів зенітних ракетних комплексів (ЗРК) визначається з однієї сторони жорсткими вимогами до радіолокаційних станцій (РЛС) як джерела інформації в складі інформаційно-керуючої системи ЗРК, з іншого боку - рівнем технологічних можливостей. На вибір технічного рішення в кожному конкретному випадку впливають економічні показники, обумовлені витратами на розробку, виробництво й експлуатацію даного зразка.

Сучасні РЛС зенітних ракетних комплексів (далі РЛС) повинні ефективно функціонувати в складній сигнально-завадовій обстановці, яка характеризується значною кількістю різноманітних цілей (у тому числі, швидкісних, малорозмірних, низьколетячих), що одночасно знаходяться в зоні спостереження, впливом нестационарних мерехтливих активних шумових та імітаційних завад, в умовах вогневого ураження протирадіолокаційних ракет. Але разом з тим, вони повинні мати високу надійність і бути простими в експлуатації.

Серед основних вимог, що висуваються до перспективних РЛС, відзначимо такі:

можливість виявлення цілей з малою ефективною площею розсіювання на заданій дальності на фоні потужних сигналів і перешкод;

висока розрізнявальна здатність та точність виміру координат, які дозволяють забезпечувати роздільне спостереження близько розташованих цілей (за кутовими координатами, дальністю і радіальною швидкістю), виявлення і вимір координат цілей, замаскованих завадами;

темпи огляду й обробки даних повинні забезпечувати оперативність виявлення, супроводу цілей і своєчасність видачі їхніх координат споживачам.

Перераховані вимоги вказують на основну тенденцію в розвитку РЛС – істотне підвищення інформативності шляхом детального, «тонкого» аналізу інформації, яка надходить до прийомної антени у вигляді електромагнітних полів сигналів і навмисних завад.

Проблема підвищення інформативності РЛС має два основних аспекти. По-перше, виключення втрат інформації, яка знаходиться в сигналах, і по-друге, підвищення ефективності процедури обробки.

Перехід до цифрової обробки сигналів знімає другу проблему підвищення інформативності РЛС, дозволяючи застосувати складні алгоритми з високим ступенем реалізації заданих параметрів і досягти необхідних характеристик системи в цілому.

Разом з тим, у РЛС уся доступна інформація про параметри джерел випромінювання (перевипромінювання) міститься в просторово-часовому розподілі електромагнітного поля. Одноканальний прийом сигналів приводить до втрати інформації, що зосереджена в просторовій картині поля (на етапі передачі сигналу з розкриття антени в пристрій обробки). В односигнальній ситуації (або коли сигнали розрізняються по інших параметрах) інформаційні втрати несуттєві.

У багатосигнальній ситуації ці втрати величезні, тому що амплітудно-фазовий розподіл поля за розкриття антени містить інформацію про кількість і кутові координати джерел сигналів і перешкод. Крім того, інформаційні втрати зв'язані з перекручуваннями сигналу, викликаними обмеженістю динамічного діапазону прийомного тракту РЛС що є особливо характерним для одноканальних систем.

У випадку одночасного впливу декількох сигналів і завад виключити втрати інформації і підвищити ефективність РЛС, можливо за рахунок використання принципів просторово-багатоканальної побудови систем.

Зазначене визначає стратегію вибору шляхів побудови перспективних РЛС: для виключення втрат інформації, що зосереджена в просторовому розподілі поля, необхідно передавати в пристрій обробки сигнали, прийняті сукупністю просторово розподілених датчиків.

**Метою статті** є висвітлення результатів аналізу відмінних рис та переваг застосування цифрових антенних решіток та РЛС, створюваних на їхній основі, а також шляхів впровадження технології циф-

рових антенних решіток при модернізації існуючих та розробці нових зенітних ракетних комплексів тактичної ланки.

### Основний матеріал

З огляду на можливості сучасних засобів обробки сигналів, необхідно на ранній стадії прийому перейти від аналогового сигналу до цифрового коду. Одночасне перетворення аналогових сигналів на виходах просторово розподілених датчиків у цифрові коди забезпечує фіксацію амплітудно-фазового розподілу поля, створеного сукупністю джерел, у розкриті антени. Це дозволяє здійснити детальний аналіз параметрів сигналів, що одночасно діють на прийомну антену, забезпечити зниження інструментальних погрешностей, властивих аналоговим пристроям, і реалізувати більш ефективні багатосигнальні алгоритми обробки інформації.

Отже, найкращою, з точки зору мінімуму втрати інформації, є така структура РЛС, у якій прийомна частина складається з антенної решітки із прийомним модулем у кожному її елементі (сукупність аналогових первинних каналів), з аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) на виході кожного прийомного модуля.

При одночасному спрацьовуванні всіх АЦП формується сукупність кодів, що відповідає миттєвому розподілу поля на антенних елементах решітки (у розкриті антени). Цифровий обчислювальний пристрій по заданих алгоритмах обробляє коди, виділяючи інформацію, що утримується в сигналах. У вітчизняній літературі такі структури одержали назву РЛС із ЦАР [1] або, як прийнято в закордонних джерелах, РЛС із цифровим формуванням променя [2].

Особливості структури цифрової приймальної просторово багатоканальної системи забезпечують РЛС із ЦАР наступними перевагами [1, 2]:

- високою завододо захищеністю, що досягається повним використанням просторових і часових властивостей сигналів і перешкод;

- збільшенням миттєвого динамічного діапазону прийомного тракту (за рахунок просторового цифрового підсумовування), що забезпечує одночасний прийом слабких сигналів на тлі сильних завад;

- можливістю контролю і корекції параметрів прийомних каналів цифровими методами;

- низьким рівнем інструментальних погрешностей і високою точністю виміру параметрів сигналів;

- можливістю миттєво формувати "віяло" просторових променів у межах робочого сектору, що дозволяє здійснювати паралельний огляд простору;

- можливістю адаптувати діаграму спрямованості кожного синтезованого каналу, враховуючи не тільки її необхідний напрямок, але і задану форму, що налаштована під конкретну сигнально-заводову обстановку;

- можливістю реалізації високоєфективних алгоритмів просторово-часової обробки сигналів;

- високою пропускну здатністю;

- високим ступенем уніфікації за структурою, елементної бази й алгоритмів обробки, що створює передумови для зменшення вартості виготовлення й експлуатації РЛС;

- властивістю багатфункціональності;

- високим ступенем автоматизації.

Приймач ЦАР у складі РЛС варто розглядати як просторовий багатоканальний аналізатор [1]. Це створює можливості для реалізації в РЛС із ЦАР алгоритмів просторової багатоканальної обробки сигналів [1], що дозволяє отримати радіолокаційну інформацію в складній сигнально-заводовій обстановці і, тим самим, вирішувати різноманітні специфічні задачі, що не вдається реалізувати в існуючих РЛС. До таких задач можна віднести такі:

- визначення складу цілі (одиначна, групова) та числа цілей у групі;

- виявлення і вимір координат цілі при впливі декількох джерел активних завад з різних напрямків;

- визначення координат близько розташованих цілей з використанням алгоритмів надрозрізнення у просторі і за частотою Доплера;

- стійкий супровід і високоточний вимір кута місця низьколітаючих цілей над добре відбиваючою поверхнею (в основу рішення цієї задачі покладені алгоритми "надрелеєвського" розрізнення у вертикальній площині усередині головного пелюстка антени двох джерел сигналів - цілі і "антиподу").

У РЛС із ЦАР мінімізація втрат при прийомі і застосуванні оптимальних алгоритмів обробки забезпечує точність виміру координат джерел сигналу (кутових координат, дальності) і параметрів їхнього руху (швидкості), яка близька до потенційно досяжної. Здатність розрізнення за кутовими координатами і частотою обмежується відношенням сигнал/шум на вході вимірювача і реально досягає десятків часток ширини головної пелюстки діаграми спрямованості антенної решітки або ширини смуги синтезованого цифрового фільтра, відповідно.

Не дивлячись на значні успіхи в області теорії побудови ЦАР і досягнення позитивних результатів іспиту макетних зразків у колишньому СРСР, запровадження технології ЦАР наприкінці минулого століття одержало інтенсивний розвиток при розробці наземних і корабельних радіолокаційних комплексів протиповітряної і протиракетної оборони в західних країнах [2].

Як приклад можна відзначити РЛС із ЦАР американської системи тактичної ПРО ТНААД (розроблена фірмами Lockheed Martin і Raytheon Company), прийняті на озброєння корабельні РЛС SAMPSON фірми Siemens Plessey, корабельні і сухопутні варіанти оглядової РЛС S1850M (Smart-L) спільної розробки нідерландської фірми Signaal і

консорціуму Alenia Marconi Systems, РЛС ППО російського (Противник-ГЕ) і українського (80К6) виробництва [2].

У класі РЛС малої дальності технологія ЦАР використовується в РЛС Smart-S (фірма Signaal), у сухопутному і корабельному варіантах РЛС GIRAFFE AMB шведської фірми Ericsson Microwave Systems AB, РЛС 1Л122 Нижегородського НІПТ [2].

Переважна більшість приведених прикладів відноситься до РЛС кругового огляду простору, у яких цифрове діаграмоутворення здійснюється тільки у вертикальній площині. Не дивлячись на це, у згаданих РЛС удалося істотно поліпшити такі важливі характеристики, як точність виміру і розрізнення за кутом місця, завододозахисність, швидкість огляду простору. Досягнуте стало можливим завдяки застосуванню широкого у вертикальній площині променю на передачу (а, у деяких випадках, оптимізації ширини променю), деякому збільшенню часу накопичення відбитих сигналів у кожному із синтезованих прийомних променів, цифровому синтезу променів з "прогалиною" у напрямку на джерело активної завади.

Разом з тим, у РЛС із круговим обертанням лишаються не вирішеними проблеми виділення інформації в складній сигнально-завадовій обстановці. Причина полягає в тому, що обертання антени, поперше, обмежує час накопичення сигналів і можливості фільтрації при впливі пасивних завод, а, по-друге, вимагає безперервної адаптації діаграми спрямованості антени при перемінному амплітудно-фазовому розподілі поля активних завод у розкритті антени.

Специфіка структури ЦАР дозволяє реалізувати її у виді модулів, однотипних для різних застосунків [3].

Виділення радіолокаційної інформації в РЛС із ЦАР реалізується цифровими апаратними засобами на основі типових алгоритмів. Стандартне програмне забезпечення складається з програмних блоків, що реалізують наступні основні алгоритми [3]:

- виділення квадратурних складових комплексних амплітуд вихідних напруг прийомних каналів антенної решітки;

- цифрової корекції коефіцієнтів передач прийомних каналів;

- синтезу просторових і частотних каналів ЦАР; первинної обробки (виявлення і визначення числа сигналів і завод, селекція сигналів у присутності завод, вимір кутових координат, дальності і радіальній швидкості джерел сигналів, розпізнавання класів цілей);

- вторинної обробки (ідентифікація оцінок, зав'язування і супровід трас цілей);

- тестування основних модулів і вузлів РЛС;

- візуального відображення інформації.

Універсальність технології ЦАР надає можливість створення РЛС різноманітного призначення. У залежності від дальності дії, заданого частотного

діапазону такі РЛС будуть відрізнятися тільки елементами СВЧ апаратури і потужністю передавача. Головні елементи РЛС: цифрова апаратура й алгоритмічне забезпечення, на які покладається основна вага обробки сигналів, для всіх типів РЛС із ЦАР будуть залишатися практично без змін. При цьому задачі побудови передавального пристрою в значною мірою носять технічний характер.

Ця обставина дозволяє здійснити перехід до широкого впровадження принципів модульності й уніфікації в практику побудови РЛС нового покоління, а саме, створення ряду типових (базових) аналогових, аналого-цифрових, цифрових пристроїв у вигляді відповідних модулів, уніфікованих пристроїв об'єднання цих модулів для створення структури ЦАР необхідного формату [3]. Крім того, здобувають загальний характер рекомендації з побудови передавального пристрою і вигляду РЛС у цілому. При такому підході процес проектування РЛС заданого типу істотно скорочується в часі, спрощується й здешевлюється.

Індивідуальність того або іншого типу РЛС визначається обраними, виходячи з заданих вимог, параметрами зондуючого випромінювання, алгоритмами обробки первинної і вторинної інформації, технічними рішеннями при виборі структури антенної решітки і типу її елемента, системи розведення сигналів, пристрою передачі, обраною організацією взаємодії елементів РЛС і режимами її функціонування.

Одним з перспективних напрямів розвитку технології ЦАР є розробка багатофункціональних РЛС з ЦАР у складі ЗРК, в яких цифрове формування діаграм здійснюється одночасно в двох площинах.

Багатофункціональна РЛС у складі ЗРК, як правило, виконує декілька радіолокаційних функцій в режимі розподілу часу між ними.

Для відомих МФ РЛС із ФАР сполучення режимів виявлення й супроводження декількох цілей зводиться до швидкого переміщення променю в просторі. При цьому на енергетичний контакт із ціллю виділяється мінімально можливий час, що змушує розроблювачів підвищувати енергетичний потенціал РЛС шляхом збільшення потужності передавача й коефіцієнта підсилення антени. Оскільки можливості підвищення енергетичного потенціалу як правило бувають обмежені, у МФ РЛС із ФАР при збільшенні кількості супроводжуваних цілей виникає проблема балансу часу, що виражається у відсутності часового ресурсу для огляду простору.

Однією з найбільш відмітних особливостей МФ РЛС із ЦАР, у яких цифрове діаграмоутворення забезпечує одночасне формування двовимірного віяла прийомних променів у заданому секторі простору, є можливість паралельного огляду. Це дозволяє значно (у порівнянні із МФ РЛС із ФАР) збільшити тривалість опромінення цілі й здійснити одно-

часне когерентне накопичення відбитих сигналів від багатої кількості цілей. Отже, у МФ РЛС із ЦАР на відміну від МФ РЛС із ФАР, може бути відсутній поділ у часі режимів виявлення й супроводження цілей. Тривалість процесу когерентного накопичення в МФ РЛС із дальністю дії в кілька десятків км (наприклад 50...80 км) може становити 20...40 мс. Число когерентно накопичуваних імпульсів з урахуванням реалізації процедури швидкого перетворення Фур'є вибирається 128, 256, 512 і навіть 1024. Таке накопичення приводить до зростання відношення сигнал-шум в 10...30 разів, що забезпечує необхідні показники виявлення РЛС.

Використання процедури тривалого накопичення сигналів у МФ РЛС із ЦАР дозволяє по новому розглянути питання про розрізнявальну здатність РЛС. Для кожного елементарного об'єму простору формується система вузькосмугових частотних фільтрів зі смугою 20...50 Гц. Для РЛС сантиметрового діапазону довжин хвиль це відповідає розрізнявальній здатності за радіальною швидкістю в одиниці метрів у секунду. Зрозуміло, що це створює принципово нові умови для розрізнення сигналів, відбитих від різних рухливих цілей.

Важливою відмінною рисою МФ РЛС із ЦАР, у якій реалізується паралельний огляд простору, є високий темп відновлення радіолокаційної інформації за всіма виявленими цілями. Якщо знімаються обмеження на час первинної обробки сигналів темп відновлення може наближатися до часу зондування простору обраною пачкою імпульсів і буде становити частки секунд. При цьому виникають умови для якісного супроводження трас цілей при вторинній обробці й підвищення точності виміру координат супроводжуваних цілей.

Таким чином, у багатофункціональних РЛС із ЦАР при паралельному огляді простору забезпечується одночасне вирішення завдань як виявлення нових цілей і виміру їхніх координат, так і супроводження раніше виявлених цілей з безперервним уточненням поточних координат.

Для забезпечення впровадження РЛС з ЦАР (у тому числі багатофункціональних) в перспективних

ЗРК або при модернізації існуючих зенітних комплексів необхідно на основі визначених оперативнотактичних вимог (тактико-тактичних вимог) вирішити низку науково-технічних завдань, пов'язаних з формуванням обліку конкретної РЛС в складі комплексу. До таких завдань слід віднести:

- розробку методики обґрунтування характеристик РЛС на підставі заданих тактичних вимог;
- визначення мінімально необхідного формату прийомної ЦАР;
- визначення параметрів зондуючого випромінювання;
- оцінка потрібного енергетичного потенціалу, параметрів передаючого пристрою;
- визначення вимог до алгоритмічного забезпечення та обчислювального пристрою.

Враховуючи складність та новизну зазначених завдань, найбільш доцільним є поступове впровадження РЛС з ЦАР (у тому числі багатофункціональних) при модернізації існуючих та розробці нових зенітних комплексів тактичної ланки.

## Висновок

Таким чином, в умовах постійного підвищення вимог до розвідувальних та вогневих можливостей ЗРК перехід до впровадження технології ЦАР – розумний і реальний спосіб забезпечення зазначених комплексів перспективними радіолокаційними засобами з потрібними тактико-технічними характеристиками.

## Список літератури

1. Варюхин В.А. Основы теории многоканального анализа / В.А. Варюхин. – К.: ВА ПВО СВ, 1993. – 171 с.
2. Слюсар В.И. Цифровые антенные решетки – будущее радиолокации / В.И. Слюсар // Электроника: НТБ. – 2006. – № 1. – С. 37-41.
3. Слюсар В.И. Схемотехника цифровых антенных решеток. – Грани возможного / В.И. Слюсар // Электроника: НТБ. – 2004. – № 8. – С. 34-40.

Надійшла до редколегії 18.03.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.І. Слюсар, Центральний НДІ озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗЕНИТНЫХ РАКЕТНЫХ КОМПЛЕКСОВ ТАКТИЧЕСКОГО ЗВЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

А.В. Вакаренко, Н.Н. Никитин, Р.И. Митяй

*Рассматриваются отличные черты и преимущества цифровых антенных решеток и РЛС создаваемых на их основе. Предлагаются пути внедрения технологии антенных решеток при модернизации существующих и при разработке новых зенитных ракетных комплексов тактического звена.*

**Ключевые слова:** цифровая антенная решетка, радиолокационная станция, зенитный ракетный комплекс.

## AN IMPROVEMENT OF ZENITHAL ROCKET COMPLEXES OF TACTICAL LINK IS WITH THE USE OF TECHNOLOGY OF DIGITAL ARRAYS

A.V. Vakarenko, N.N. Nikitin, R.I. Mityai

*Distinguishing features and advantages of digital arrays are examined and RLS, created on their basis. The ways of introduction of technology of digital arrays are offered during modernization of existing and development of new zenithal rocket complexes of tactical link.*

**Keywords:** digital aerial grate, radio-location station, zenithal rocket complex.