

УДК 621.396

Р.В. Момот, Р.С. Огороков, Г.В. Худов

*Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків***АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ УПРАВЛІННЯ ПРОМЕНЕМ ДІАГРАМИ СПРЯМОВАНOSTІ СУЧАСНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАЦІЙ З ФАЗОВАНИМИ АНТЕННИМИ РЕШІТКАМИ**

*В статті проведено аналіз можливостей управління променем діаграми спрямованості радіолокаційної станції з фазованою антенною решіткою. Наведено стислі історичні відомості щодо створення першої антенної решітки з можливістю управління діаграмою спрямованості. Розглянуто сучасні радіолокаційні станції з фазованою антенною решіткою, що знаходяться на озброєнні країн співдружності (Росія та Україна).*

**Ключові слова:** радіолокаційна станція, фазована антенна решітка, діаграма спрямованості, фазовий зсув, зона виявлення.

**Вступ**

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** У відповідності до Воєнної доктрини України [1] основною метою підготовки держави до збройного захисту національних інтересів є досягнення рівня обороноздатності, достатнього для стримування інших держав від застосування воєнної сили проти України, а в разі воєнного конфлікту – відсічі збройної агресії, ліквідації (локалізації, нейтралізації) збройного конфлікту. Одним з пріоритетних напрямків підготовки держави до збройного захисту національних інтересів є підвищення оперативних і бойових (спеціальних) можливостей Збройних Сил (ЗС) України шляхом оснащення їх відновленими, модернізованими і новими системами озброєння, військової і спеціальної техніки [1]. У теперішній час одним з напрямком розвитку сучасних радіолокаційних станцій (РЛС) є використання РЛС з фазованими антенними решітками (ФАР) з електронним управлінням променем діаграми спрямованості (ДС) та використанням при обробці інформації елементів теорії сумісного пошуку і виявлення об'єктів спостереження [2 – 5].

**Мета статті** – проаналізувати можливості управління променем ДС у сучасних РЛС з ФАР з метою підвищення ефективності ведення розвідки повітряного простору.

**Аналіз останніх досягнень та публікацій.** Фазована антенна решітка – тип антен, у вигляді групи антенних випромінювачів, в яких відносні фази сигналів змінюються комплексно, так, що ефективне випромінювання антени посилюється в якомусь одному, бажаному напрямку і подавляється у всіх інших напрямках [6].

Управління фазами (фазування) дозволяє [6]:

– формувати (при досить різноманітних розташуваннях випромінювачів) необхідну ДС ФАР (наприклад, гостронаправлену ДС – промінь);

– змінювати напрям променя нерухомою ФАР і здійснювати швидко, у ряді випадків практично безінерційне, сканування – коливання променя;

– управляти в певних межах формою ДН – змінювати ширину променя, інтенсивність (рівні) біч-

них пелюсток тощо (для цього в ФАР інколи здійснюють також управління амплітудами хвиль окремих випромінювачів).

Ці та деякі інші властивості ФАР, а також можливість застосовувати для управління ФАР сучасні засоби автоматики та обчислювальної електроніки зумовили їх перспективність і широке використання у радіозв'язку, радіолокації, радіонавігації, радіоастрономії і т. д. ФАР, що містять велику кількість керованих елементів, входять до складу різних наземних (стаціонарних і рухливих), корабельних, авіаційних і космічних радіопристроїв. Ведуться інтенсивні розробки в напрямку подальшого розвитку теорії і техніки ФАР і розширення області їх застосування [6].

**Основний розділ**

**Постановка задачі і викладення матеріалів дослідження.** Форми, розміри і конструкції сучасних ФАР вельми різноманітні. Їх різноманітність визначається як типом використовуваних випромінювачів, так і характером їх розташування. Сектор сканування ФАР визначається ДН її випромінювачів. У ФАР з швидким ширококутним коливанням променя зазвичай використовуються слабонапрямлені випромінювачі: симетричні і несиметричні вібратори, часто з одним або декількома рефлекторами (наприклад, у вигляді спільного для всієї ФАР дзеркала); відкриті кінці хвилеводів, щілин, рупорні, спіральні, діелектричні стрижневі, логоперіодичні і інші антени. Іноді великі за розмірами ФАР складають з окремих малих ФАР (модулів). ДС останніх орієнтується в напрямку основного променя всієї ФАР. У ряді випадків, наприклад, коли допустиме повільне відхилення променя, використовують гостронаправлені антени з механічним поворотом (наприклад, так звані «повноповоротні дзеркальні»). В таких ФАР відхилення променя на великий кут виконують за допомогою повороту всіх антен і фазування випромінюваних ними хвиль. Фазування цих антен дозволяє також здійснювати в межах їх ДН швидко коливання променя ФАР.

Залежно від необхідної форми ДН і необхідного просторового сектора сканування в ФАР застосовують різне взаємне розташування елементів: вздовж

лінії (прямої або дуги); по поверхні (наприклад, плоскої – у т.н. плоских ФАР; циліндричної; сферичної) в заданому обсязі (об'ємні ФАР) [6].

Ідея, що променем системи когерентних випромінювачів можна управляти, змінюючи розподіл фаз на випромінювачах була озвучена давно [7]. Одна з перших антен з немеханічним керуванням діаграмою спрямованості була побудована для трансатлантичної радіотелефонної лінії зв'язку в 1937 році. Дана антена являла собою систему ромбічних антен, розташованих вздовж прямої на ділянці довжиною близько 1,5 км [7]. Управління діаграмою спрямованості здійснювалося зміною фазових співвідношень між струмами в окремих ромбах. Високої швидкості керування променем системи ромбічних антен не було потрібно.

Розвиток радіолокації поставив завдання управління діаграмою спрямованості антени протягом інтервалів часу, вимірюваних спочатку мілісекунди, а потім мікросекунди і навіть частками мікросекунди [7].

Наскільки можна судити по відомим публікаціям [7], перша антена з електронним скануванням для застосування в радіолокації була здійснена в Ленінградському електротехнічному інституті (ЛІЕТІ) в 1955 році в групі під керівництвом проф. Ю.Я. Юрова (1914-1955).

В основу принципу дії антени було покладено управління фазами хвиль в декількох випромінювачах антени за допомогою фазообертачів, що містять феритові елементи. Якраз в ті роки в електроніці різних частот почалося широке застосування феритів – залізовмісних окислів металів, які є діелектриками, але володіють магнітними властивостями, близькими до властивостей заліза.

Роботи по радіолокаційному використанню антен з електронним скануванням велися і в США [7]. Перша публікація про фазообертач на основі фериту, призначеному для застосування в антені з електронним скануванням, з'явилася в кінці 1954 року [7], а публікації по самій антені – в 1956-1957 роках [7].

Проблема розробки антени з електронним скануванням складається з двох складових частин [7]: 1) вибір числа випромінювачів і конфігурації їх розміщення; 2) розробка фазообертачів, керуючих фазою електромагнітної хвилі в випромінювачах.

Антена представляла собою решітку з чотирьох діелектричних випромінювачів, надвисокочастотна (НВЧ) хвиля до яких подається через фазообертачі, що представляють собою відрізки прямокутних хвилеводів, частково заповнених феритом. Феритові вкладиші знаходились в змінному полі електромагнітів. Зовнішнє магнітне поле змінює магнітну проникність фериту. Зміна магнітної проникності середовища, в якому поширюється хвиля, змінює фазову швидкість хвилі, в результаті виникає необхідний фазовий зсув.

**Особливості побудови сучасних ФАР.** Збудження випромінювачів ФАР проводиться за допомогою фідерних ліній, або за допомогою вільно розпо-

всюджуючих хвиль (у так званих квазіоптичних ФАР), фідерні тракти розміщені поряд з фазообертачами, іноді містять складні електричні пристрої (діаграмостворюючі схеми), що забезпечують збудження всіх випромінювачів від декількох входів, що дозволяє створити в просторі відповідні цим входам скануючі промені (в багатопробієвих ФАР) [8].

Квазіоптичні ФАР, в основному, бувають двох типів [8]: прохідні (лінзові), в яких фазообертачі і основні випромінювачі збуджуються (за допомогою допоміжних випромінювачів) хвилями, що розповсюджуються від загального випромінювача, і відбивні – основний і допоміжні випромінювачі суміщені, а на виходах фазообертачів встановлені відбивачі. Багатопробієві квазіоптичні ФАР містять кілька випромінювачів, кожному з яких відповідає свій промінь у просторі. Іноді в ФАР для формування ДС застосовують фокусуючі пристрої (дзеркала, лінзи). Розглянуті вище ФАР іноді називаються пасивними.

Найбільшими можливостями керування характеристиками, володіють активні ФАР в яких до кожного випромінювача або модулю підключений керований по фазі (іноді і по амплітуді) передавач або приймач. Управління фазою в активних ФАР може проводитися в трактах проміжної частоти або в колах порушення когерентних передавачів, гетеродинних приймачів тощо. Таким чином, в активних ФАР фазообертачі можуть працювати в діапазонах хвиль, відмінних від частотного діапазону антени; втрати в фазообертачах в ряді випадків безпосередньо не впливають на рівень основного сигналу. Передавальні активні ФАР дозволяють здійснити складання в просторі потужностей когерентних електромагнітних хвиль, що генеруються окремими передавачами. У прийомних активних ФАР спільна обробка сигналів, прийнятих окремими елементами, дозволяє одержувати повнішу інформацію про джерела випромінювання.

У результаті безпосередньої взаємодії випромінювачів між собою, характеристики ФАР, при коливанні променя, змінюються. Для боротьби зі шкідливими наслідками взаємного впливу випромінювачів в ФАР іноді застосовують спеціальні методи компенсації взаємного зв'язку між елементами.

До кінця вісімдесятих років ХХ сторіччя створення такої системи вимагало застосування великої кількості пристроїв, через що фазовані решітки, повністю керовані електронікою, використовувалися, головним чином, у великих стаціонарних радарів, типу масивного BMEWS (Ballistic Missile Warning Radar) і дещо меншого американського морського радара протиповітряної оборони SPY-1 Aegis, встановленого на крейсерах класу Ticonderoga і пізніше на протичовнових кораблях Arleigh Burke [7].

Єдиними відомими застосуваннями на літаках був великий радар "Заслон", встановлений на радянському перехоплювачі МіГ-31, і радар нападу на Rockwell B-1B Lancer [7]. У теперішній час дані РЛС застосовуються на Су-35 та F-22. Такі радары не встановлювалися на літаках головним чином із-за

їх великої ваги, оскільки перше покоління технології фазованих решіток використовувало звичайну радарну архітектуру. У той час як антена змінилася, все інше ще залишалася незмінним, але були додані додаткові обчислювачі, щоб керувати фазообертачами антени. Це призвело до збільшення ваги антени, кількості обчислювальних модулів, а також підвищило навантаження на систему електроживлення.

Вигоди застосування фазованих решіток, однак, виправдовували додаткову вартість. Фазовані решітки могли в єдиній антени робити роботу декількох антен майже одночасно. Широкі промені могли використовуватися для пошуку цілі, вузькі – для супроводу, плоскі промені у формі віяла для визначення висоти, вузькі спрямовані промені для польоту з ландшафту (В-1В). У ворожій зоні електронної протидії вигоди було ще більше, оскільки фазовані решітки дозволяють системі розміщувати «нуль» – область нульової чутливості приймача, на частоті джерела перешкод і таким чином блокувати її від попадання в приймач [7]. Інша вигода – те, що немає більше потреби механічно повертати антену в напрямку цілі, що дозволило підвищити швидкості огляду простору на порядки, а також збільшити термін служби системи, так як з введенням фазування частково відпала потреба в громіздких механізми орієнтації полотна в просторі. Зазвичай багатостороння антена могла забезпечити охоплення в 360 градусів, нерухомими антенами, що охоплюють всі напрямки відразу.

Ця технологія також надавала менш очевидні вигоди. Одна можна швидко «оглянути» маленьку ділянку неба, щоб збільшити ймовірність виявлення маленької і швидкісної цілі (на відміну від антени, що повільно обертається, яка може сканувати специфічний сектор лише один раз за оберт, який складає секунди). Ціль з малою ефективною поверхнею розсіювання (ЕПР), наприклад, низьколетячу крилату ракету, майже неможливо помітити при таких умовах. Здатність фазованої решітки до майже миттєвої зміни напрямку та форми променя, фактично додає новий вимір до супроводу цілей, оскільки різні цілі можуть бути відслідковані різними променями, кожний з яких переплітається вчасно з періодично скануючим променем огляду простору. Наприклад, промінь огляду простору може охоплювати 360 градусів періодично, тоді як супроводжуючі промені можуть стежити за індивідуальними цілями незалежно від того, куди в цей час спрямований промінь огляду простору.

Фазовані решітки, як і всі фізичні об'єкти, мають і обмеження [8]. Основне обмеження – діапазон кутів, на які промінь може бути відхилений. Практично, межа становить 45 – 60 градусів від перпендикуляра до площини антени. Відхилення променя на великі кути значно погіршує основні характеристики антенної системи (коефіцієнт направленої дії (КНД), ширину і форму основного пелюстка ДС). Це пояснюється двома ефектами. Перший з них – зменшення ефективної довжини (ширини) антени із

зростанням кута відхилення променя. У свою чергу, скорочення довжини решітки в поєднанні зі зменшенням коефіцієнта посилення антени зменшує здатність виявлення цілі на відстані.

Другий ефект менш очевидний і викликаний виглядом випромінювання вибраних елементів, щілин, які випромінюють менше зі збільшенням кута по вертикалі, таким чином скорочуючи енергію що випромінюється та чутливість [8]. В результаті, при граничних значеннях кутів, промінь істотно ослаблений і дефокусований. Це скорочення настільки істотно, що в типовій ситуації складає скорочення посилення антени, і отже випромінювань потужності та чутливості до 25% при 60 градусах від вертикалі [8].

**Можливості сучасних РЛС з ФАР.** Мобільна радіолокаційна станція чергового режиму “Небо-СВУ” призначена для контролю повітряного простору, виявлення, визначення координат і супроводу широкого класу сучасних повітряних об'єктів: літаків стратегічної і тактичної авіації, малопомітних цілей, в т.ч. виконаних за технологією "стелс", розпізнавання класів цілей, визначення їх державної приналежності, пеленгації постановників активних шумових перешкод, при роботі як у складі автоматизованих систем управління протиповітряної оборони (ППО), так і автономно [9].

В РЛС реалізовані [9]:

- активна твердотільна фазована антена решітка з приймально-передавальним модулем в кожному випромінюючих елементів, аналого-цифровим перетворенням луна-сигналів в кожному рядку і можливістю програмного керування променем діаграми спрямованості у вертикальній площині для досупроводження балістичних цілей;

- повністю цифрова просторово-часова обробка сигналів;

- гнучка адаптація системи обробки сигналів до заводової обстановці і технічним станом станції;

- високоефективна цифрова система селекції рухомих цілей (СРЦ), що забезпечує стійку проводку повітряних об'єктів при наявності інтенсивних пасивних перешкод і гідрометеоутворень;

- адаптивне придушення бокових пелюстків діаграми спрямованості.

Діапазон хвиль – метровий.

РЛС 64Л6 “Гамма-С1” є трьох координатною, сантиметрового діапазону РЛС оглядового типу. Дана РЛС була побудована на зміну комплексу далекомір-висотоміра з радіолокаційною станцією П-37, і висотоміром ПРВ – (13/16) [9].

Антенна система РЛС розташована на машині М1 – це плоска фазована антена решітка з електронним скануванням передавального і приймального променів діаграми спрямованості РЛС у вертикальній площині. Реалізований послідовний огляд простору дозволяє програмним способом керувати в просторі випромінюваної РЛС енергією. Передавальний пристрій побудовано на сучасному вітчизняному електровакуумному приладі – багатопроменевому широ-

космоуговому клістріні, що має досить велику вихідну потужність, високу надійність, а також володіє показниками щодо електромагнітної сумісності та масогабаритними характеристиками на рівні кращих світових зразків. Апаратура РЛС забезпечує високий ступінь автоматизації процесів виявлення цілей і керування режимами роботи. Вибір режимів роботи РЛС здійснюється за результатами аналізу цільової та завадової обстановки автоматично або оператором.

Цифрова система обробки РЛС передбачає [9]:

- автоматичне виявлення цілей;
- автоматичний і напівавтоматичний захоплення і супровід виявлених цілей;
- автоматичне та напівавтоматичне керування режимами роботи РЛС;
- автоматичне керування каналом визначення державної належності і ототожнення його інформації з даними по супроводжуванім цілям.

РЛС 79К6 (80К6) – рухома трикоординатної радіолокаційної станції кругового огляду малих, середніх і великих висот з координатним і трасовим виходами, що працює автономно або у складі регіональних і національних автоматизованих систем управління (АСУ).

РЛС призначена для використання [10]:

- у складі зенітно-ракетних військ для видачі цілевказівок зенітно-ракетним комплексам;
- в якості інформаційного ланки в підрозділах військово-повітряних сил і ППО для контролю та управління повітряним рухом.

РЛС забезпечує [10]:

- виявлення, супровід і вимір трьох координат повітряних об'єктів та їх шляхової швидкості в умовах без перешкод і при впливі природних організованих активних і пасивних перешкод, а також в умовах їх комбінованого впливу;
- визначення державної приналежності повітряних об'єктів, отримання від своїх літаків індивідуальної і польотної інформації, її відображення і видачу споживачам;
- відображення і видачу споживачам визначення кутомісцевих і азимутальних пеленгів на поставники активних завод;
- видачу інформації на автономні засоби відображення і взаємодія з командними пунктами регіональних і вищестоящих національних АСУ.

#### **АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ УПРАВЛІННЯ ПРОМЕНЕМ ДІАГРАМИ СПРЯМОВАНІСТІ СУЧАСНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАЦІЙ З ФАЗОВАНИМИ АНТЕННИМИ РЕШІТКАМИ**

Р.В. Момот, Р.С. Окороків, Г.В. Худов

*В статті проведено аналіз можливостей управління променем діаграми спрямованості радіолокаційної станції з фазованою антенною решіткою. Наведено стислі історичні відомості щодо створення першої антенної решітки з можливістю управління діаграмою спрямованості. Розглянуто сучасні радіолокаційні станції з фазованою антенною решіткою, що знаходяться на озброєнні країн співдружності (Росія та Україна).*

**Ключові слова:** радіолокаційна станція, фазована антенна решітка, діаграма спрямованості, фазовий зсув, зона виявлення.

#### **OPPORTUNITY ANALYSIS OF BEAM DIRECTIONAL DIAGRAMS LANDLINE MODERN RADAR WITH A PHASED ANTENNA ARRAY**

R.V. Momot, R.S. Okorokov, G.V. Khudov

*The article analyzed the possibilities of beam control diagram of the radar with a phased antenna array. The brief historical information about the creation of the first array with the ability to control radiation pattern. Modern radars with phased array that are in service with the Commonwealth (Russia and Ukraine).*

**Keywords:** radar, phased array, pattern, phase shift, zone of detection.

## **Висновки і напрямки подальших досліджень**

Таким чином, у теперішній час одним з напрямком розвитку сучасних РЛС є використання РЛС з ФАР, що дозволяє використовувати електронне управління променем ДС та використовувати при обробці інформації елементи теорії сумісного пошуку і виявлення об'єктів спостереження. У подальших дослідженнях необхідно розглянути особливості побудови ФАР для підвищення ефективності ведення радіолокаційної розвідки повітряного простору.

## **Список літератури**

1. *Воєнна доктрина України. Указ Президента України № 390/2012 «Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 8 червня 2012 року «Про нову редакцію Воєнної доктрини України» / Наука і оборона. – № 2. – 2012. – С. 3-11.*
2. *Голкин Д.В. Совместная байесовская оптимизация поиска и обнаружения объектов в радиолокационных системах / Д.В. Голкин, Г.В. Худов // Успехи современной радиоэлектроники. – М., 2003. – № 11. – С. 23-32.*
3. *Голкин Д.В. Совместная байесовская оптимизация поиска и обнаружения объектов в космических радиолокационных системах дистанционного зондирования Земли / Д.В. Голкин, Г.В. Худов // Космична наука і технологія. – К., 2003. – Т. 9, № 4. – С. 84-93.*
4. *Худов Г.В. Особенности оптимизации двухальтернативных решений при совместном поиске и обнаружении объектов / Г.В. Худов // Проблемы управления и информатики. – 2003. – № 5. – С. 51-59.*
5. *Способ сумісного пошуку і виявлення радіолокаційних об'єктів: Пат. 71735 А України.*
6. *Большая Российская Энциклопедия. Авиация: Энциклопедия / под ред. Г.П. Свищева. – М., 1994.*
7. *Вендик О.Г., Парнес М.Д. Под редакцией Л.Д. Бахраха. Антенны с электронным движением луча(введение в теорию). – С. Петербург ЛЭТИ, 2001. – 252 с.*
8. *Саонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. Учебник. – М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.*
9. *[Електрон. ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.rusarmy.com/pvo/rls.html>.*
10. *[Електрон. ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: [http://www.iskra.zp.ua/index.php?option=com\\_content&view=article&id=6&Itemid=3&lang=ru](http://www.iskra.zp.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=6&Itemid=3&lang=ru).*

Надійшла до редколегії 28.06.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Д.В. Голкін, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.