

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ РАДІОЗВ'ЯЗКУ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ АДАПТИВНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК

В статті обґрунтовується необхідність застосування адаптивних антенних решіток для підвищення ефективності функціонування систем радіозв'язку та інших радіотехнічних систем. Визначені напрямки удосконалення систем радіозв'язку з адаптивними антенними решітками.

Борисов И.В., Гурский Т.Г., Ильинов М.Д., Гриценко К.Н. Повышение эффективности функционирования систем радиосвязи за счет использования адаптивных антенных решеток. В статье обосновывается необходимость применения адаптивных антенных решеток для повышения эффективности систем радиосвязи и других радиотехнических систем. Определены направления усовершенствования систем радиосвязи с адаптивными антенными решетками.

I. Borisov, T. Hurskyi, M. Ilyinov, K. Hrytsenok. The increasing of effectiveness of radio communication systems due to using of adaptive antenna arrays. The necessity of adaptive antenna arrays using to increase effectiveness of radio communication systems and others radio technical systems is substantiated in the article. The directions of perfecting of radio communication systems using adaptive antenna arrays are defined.

Ключові слова: адаптивна антенна решітка, діаграма направленості, діаграмоутворення, радіозв'язок.

У даний час розвиток таких галузей науки і техніки як зв'язок, радіолокація, радіоастрономія та навігація неможливо уявити без впровадження нових досягнень у антенній техніці.

Використання антенних решіток дозволяє підвищити коефіцієнт підсилення антени, створювати антени з керованими діаграмами направленості, здійснювати електричне сканування променем у просторі і формування багатопроменевої діаграми направленості у рамках єдиної антенної системи.

Метою статті є аналіз застосування антенних решіток у системах радіозв'язку та інших радіотехнічних системах, визначення напрямків удосконалення таких систем.

Антенними решітками (АР) прийнято називати випромінюючі системи у вигляді великого числа дискретних випромінювачів, розташованих упорядкованим чином. Окремі випромінювачі, що утворюють решітку, і є, як правило, слабонаправленими антенами, називаються елементами решітки. Збудження їх може бути здійснене з визначеним зсувом за фазою й довільними рівнями (амплітудами) відносно деякого елемента, взятого у якості опорного. Як правило, АР складаються з однотипних, однаково орієнтованих по максимуму випромінювання елементів [1].

При цьому в більшості практичних випадків необхідно, щоб гостра направленість антени поєднувалась з високою швидкістю переміщення антенного променя в просторі в заданому секторі кутів за визначеним законом. Таке переміщення головного пелюстка діаграми направленості (ДН) називають скануванням.

Розглянемо структурну схему АР, представлена на рис. 1 [1, 2]. Потужність з виходу передавача надходить на діаграмоутворюючу схему (ДУС), де за командами управляючого пристрою здійснюється її розподіл у потрібній пропорції між випромінювачами решітки, а також забезпечення необхідних фазових зсувів між струмами в них. Для вирішення цієї задачі в ДУС застосовуються дільники потужності, фазообертачі, комутатори, атенюатори та інші елементи.

За способом розміщення елементів у просторі решітки підрозділяють на такі класи:

- 1) **лінійні**, коли елементи розташовані на одній прямій;
- 2) **плоскі**, коли елементи розташовані на одній площині;
- 3) **поверхневі**, коли елементи розміщені на поверхні складної форми.

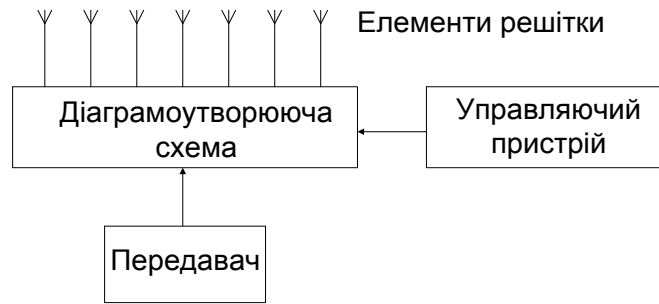


Рис. 1. Структурна схема антенної решітки

За способом збудження АР підрозділяють на синфазні (фази полів (струмів) на розкриті елементів збігаються) і не синфазні.

За напрямком максимального випромінювання лінійні решітки бувають **поперечні** (максимальне випромінювання збігається з нормаллю до лінії розташування елементів) і **поздовжні** (випромінювання збігається з лінією розташування елементів).

Адаптивні антенні решітки (ААР) – антенні решітки, параметри яких (у першу чергу, характеристика направленості) автоматично змінюються таким чином, щоб забезпечити якнайкращі умови прийому корисного сигналу на фоні змінних зовнішніх впливів (завад), або передачі сигналу, виходячи із задач, що вирішуються радіоелектронним засобом [2] (наприклад, якщо це радіостанція – сформувати максимум ДН у напрямку на кореспондента та мінімуми – у напрямках на інших користувачів, найближчих до неї; для радіолокаційної станції – сформувати максимум у напрямку на об’єкт спостереження).

Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку цього виду антенної техніки є цифрові антенні решітки (ЦАР), які виконують діаграмоутворення за допомогою цифрової обробки сигналу, що забезпечує можливість адаптивного формування багатопроменевої діаграми направленості.

Розглянемо основні переваги, що можна досягнути при впровадженні ААР в системи радіозв’язку.

Підвищення завадозахищеності СРЗ. За останні десятиліття засоби й методи підвищення завадозахищеності в системах радіозв’язку (СРЗ) одержали потужний розвиток. Це пояснюється головним чином, радіоелектронною обстановкою, що погіршується з кожним роком, проблемою електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів і активізацією методів радіоелектронної боротьби, які реалізуються високоефективними постановниками навмисних завад [3].

Сучасні пристрої формування навмисних завад мають невеликі масо-габаритні показники й можуть випромінювати в потрібному режимі й з необхідною потужністю в автоматичному або напівавтоматичному режимі певний тип завади. Різні види навмисних завад застосовуються для подавлення радіозасобів в різних режимах роботи (з різними видами сигналів і способами їх обробки).

Тому для ефективної роботи систем радіозв’язку в умовах складної завадової обстановки використовуються адаптивні антенні решітки (ААР) [2 – 7].

Принцип зменшення впливу навмисної завади на засіб радіозв’язку (ЗРЗ) за рахунок просторової фільтрації показано на рис. 2, де φ_{01} – напрямок від джерела завад на ЗРЗ (напрямок орієнтації головного пелюстка антени станції завад), φ_{10} – напрямок приходу завади в антену ЗРЗ, φ_{21} – напрямок приходу корисного сигналу в антену ЗРЗ. Використання ААР для підвищення завадозахищеності засобів радіозв’язку засноване на врахуванні розходжень у напрямках приходу завади φ_{10} і корисного сигналу φ_{21} . Такі розходження на практиці існують завжди, за винятком ситуацій, коли напрямки приходу завад і корисного сигналу збігаються. Розходження у напрямках приходу обумовлюють відмінність в

амплітудно-фазовому розподілі струмів завад і корисного сигналу на виходах рознесених у просторі антенних елементів ААР. У свою чергу, використання відмінностей в амплітудно-фазовому розподілі струмів корисного сигналу й завад дозволяє так сформувати діаграму направленості ААР, що в напрямку приходу корисного сигналу буде сформований максимум, а в напрямках приходу завад відповідно мінімуми („нулі”) її ДН, як показано на рис. 2 та на рис. 3 [3], де F – ступінь ослаблення рівня сигналу в антені відносно максимального значення.

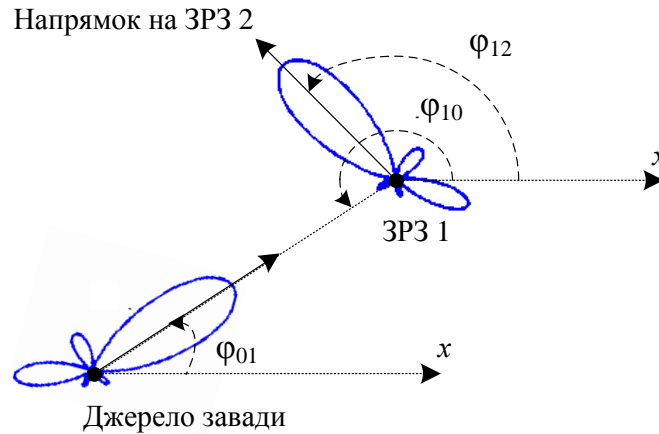


Рис. 2. Подавлення завад за рахунок просторової фільтрації у приймальній антені

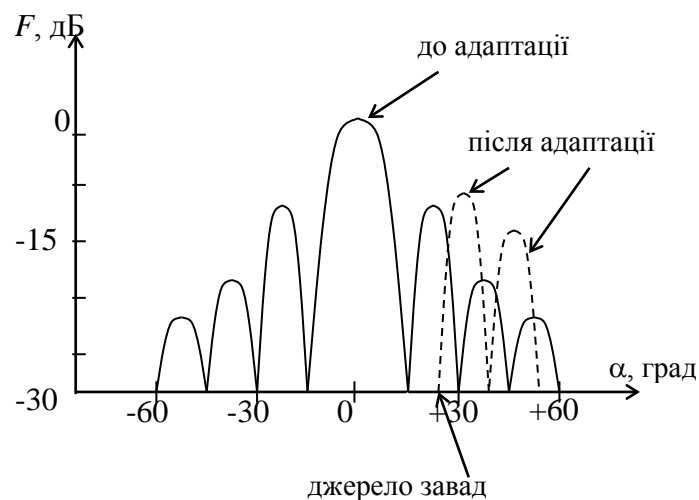


Рис. 3. Принцип адаптивної зміни діаграми направленості

Адаптивна антена без апріорної інформації про завадову ситуацію автоматично виявляє присутність джерел завад і придушує їхні сигнали, поліпшуючи тим самим умови прийому корисного сигналу. Придушення завад досягається за рахунок формування глибоких провалів у ДН антени в напрямку на джерела завад. Умови прийому корисного сигналу при цьому трохи погіршуються внаслідок спотворення форми й розширення головного пелюстка ДН [3].

Основними характеристиками адаптивних антен є кількість каналів, коефіцієнт придушення завад і час адаптації [2]. Кількість рознесених за напрямками джерел завад, що придушуються, відповідає кількості каналів. Залежно від числа керованих елементів, антенні решітки поділяються на частково або повністю адаптивні. Якщо в антенній решітці

управляють всіма елементами, то вона повністю адаптивна. У частково адаптивній антенній решітці управляють 10 – 50 % її елементів. Якщо ж в управлінні приймає участь менше, ніж 10 відсотків елементів, то такий пристрій відноситься до багатоканальних автокомпенсаторів бічних пелюстків.

Ефективність ослаблення завади на вході приймача визначається коефіцієнтом подавлення, який, головним чином, залежить від міжелементної відстані антенної решітки, ширини смуги частот завади й частотно-залежного міжканального розузгодження в смузі частот завади, а також від розрядності фазообертачів і числа діючих джерел завад [3].

Підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу. З кожним роком радіоелектронна обстановка погіршується через зростання кількості радіоелектронних систем та засобів. Забезпечення їх електромагнітної сумісності прямо пов'язане з підвищенням ефективності використання радіочастотного ресурсу (РЧР) [8].

Максимальне використання відведеної смуги частот стає можливим за рахунок роботи багатьох абонентів на одній несучій при просторовому рознесенні споживачів інформації.

Цифрове формування променів у ЦАР (що є ключовою особливістю її функціонування) дає можливість ефективної реалізації динамічної адаптації зони покриття за рахунок оперативного перенацілювання „цифрових” променів. Віяло променів, сформованих, наприклад, за допомогою алгоритмів швидкого перетворення Фур'є, по суті, є сукупністю просторово-частотних фільтрів, що виконують одночасну селекцію сигналів, які приймаються в широкому просторовому секторі [9].

Глибока адаптивна компенсація завад, яка може бути реалізована завдяки формуванню „нулів” діаграми направленості у напрямку джерела завад, дозволяє збільшити відношення сигнал/шум та зменшити рівні потужності передавачів, що, у свою чергу, покращує загальну електромагнітну сумісність.

Відносно схемотехнічних рішень необхідно відзначити один з основних напрямків наступної реалізації технології ЦДУ – розробка гібридних ЦАР [8]. При цьому разом із ЦАР використовуються рефлектори й аналогові діаграмоутворюючі схеми. Такий підхід вже реалізований у системі супутникового зв'язку Inmarsat-4.

Проблема підвищення пропускної спроможності каналів зв'язку на сьогоднішній день у більшості випадків зводиться до розширення смуги пропускання. Однак такий підхід викликає проблеми електромагнітої сумісності (ЕМС) і дефіциту частотного ресурсу.

При використанні технології ЦДУ рішенням такої проблеми є частотне ущільнення каналів зв'язку на основі надрелеєвського розділення сигналів [9]. Множинний доступ абонентів у таких системах засновано на просторовому надрозрізненні сигналів за напрямками приходу.

Боротьба з багатопророменевою. Використання ЦАР дозволяє ефективно вирішувати завдання придушення сигналів, що заважають, при багатопророменевою поширенні радіохвиль, істотно знизити глибину завмирань, підвищити інтенсивність корисних сигналів за рахунок орієнтації максимумів діаграми спрямованості антени в напрямку абонентів (у тому числі і тих, що рухаються). В роботі [10] показано можливості алгоритму обробки прийнятого сигналу в багатоканальній системі, придатного як для зміни діаграми направленості, так і для компенсації ефектів багатопророменевою розповсюдження. Крім необхідності формувати вузьку діаграму направленості, для приймачів також актуальною є проблема забезпечення стійкого прийому при наявності в прийнятому сигналі не тільки вихідного інформаційного сигналу, але й перевідбитих його копій, що виникають внаслідок багатопророменевою поширення. Можна спробувати сформувати ДН таким чином, щоб з прийнятого випромінювання виділявся тільки промінь прямої видимості або найбільш сильний промінь в разі відсутності прямої видимості між приймачем і передавачем, а сигнали, інших променів придушувалися. Разом з тим, перевідбиті сигнали є ослабленими і затриманими копіями вихідного сигналу. Якщо вирівняти затримку всіх сигналів, що надходять різними шляхами, то при когерентному додаванні сумарна корисна енергія

виявиться вище, ніж у випадку, якщо виділяти тільки один промінь, а решту – придушувати. Таким чином, ААР у цьому випадку може дозволити підвищити дальність зв'язку в умовах щільної міської забудови, і виконуватиме задачу РАКЕ-приймача, що використовується у системах CDMA.

Підвищення ефективності функціонування стільникових систем. Використання ААР на базових станціях (БС) систем стільникового радіозв'язку дозволяє підвищити завадостійкість приймання на 25 – 30 дБ [5], чого, у більшості випадків, достатньо для відновлення нормального функціонування у випадку появи потужної завади. При цьому погіршується (або навіть призупиняється) обслуговування всіх мобільних станцій (МС) у певному кутовому секторі через формування провалу ДН у напрямку на заваду. Величина цього кута залежить від особливостей конструкції ААР, зокрема, від числа антенних елементів і їхнього розносу один від одного, й може скласти 10 – 20°.

Для того, щоб обслуговування МС не припинилося, можна запропонувати формування надлишкового підсилення у вузькому секторі ААР сусідньої БС. Після закінчення дії завади, ААР формують початкову кругову або секторну ДН.

Переваги використання ААР у стільникових системах [3]:

1) можливість формування необхідної форми площі обслуговування БС (сектора обслуговування) за рахунок управління ДН ААР, що дозволить скоротити число БС в умовах сильно пересіченої місцевості (великого міста) без погіршення якості обслуговування користувачів;

2) можливість динамічного перерозподілу частотних каналів по території обслуговування БС, а також всієї зони обслуговування, що, у більшості випадків, дозволить знизити число частотних каналів, які використовуються у зоні обслуговування в 2 – 3 рази;

3) можливість зменшення середньої величини напруженості поля в зоні обслуговування в 3 – 4 рази за рахунок адаптивного управління ДН ААР на передачі БС у необхідних напрямках і зниження потужності випромінювання на передачі БС, у зв'язку із чим поліпшується електромагнітна сумісність;

4) при виконанні п. 3 знижується середній рівень міжстанційних завад у зоні обслуговування, завдяки цьому відношення сигнал/шум на вході приймачів БС підвищується, що, у свою чергу, призводить до зниження автоматично регульованої потужності абонентських пристроїв навіть у найбільш складних умовах, що звичайно потребують максимальної вихідної потужності;

5) при виконанні п. 4 можливо реально забезпечити виконання санітарно-гігієнічних норм щодо мінімального впливу опромінення на організм людини у всій зоні обслуговування, а також збільшити тривалість часу дії стільникових телефонів без підзарядки;

б) можливість за рахунок ААР точного визначення місця розташування будь-якого користувача (до декількох метрів), у цей час ця точність визначається площею сектора обслуговування, тобто становить від 0,5 до 10 кілометрів.

Використання ААР у радіомережах, що самоорганізуються. В останні роки все більшого поширення набувають пакетні радіомережі, що самоорганізуються (ПРС) – MANET (mobile ad-hoc networks) [11].

Пакетні радіомережі, що самоорганізуються, представляють собою динамічну топологію побудови мереж мобільного радіозв'язку, яка передбачає відсутність фіксованої інфраструктури та централізованого управління.

Всі вузли мережі мобільні і обмінюються інформацією безпосередньо між собою або застосовують ретрансляцію пакетів, що передаються. Вузлами ПРС називають радіостанції, оснащені радіоконтролером, які реалізують функції маршрутизації.

В даний час ПРС знаходяться поза конкуренцією за оперативністю розгортання, мобільністю і широтою можливих додатків, а в багатьох випадках представляють собою єдине економічно виправдане рішення [12].

Відомими недоліками роботи ПРС на основі радіостанцій з ненаправленими антенами є наступні [11, 12]: неможливість забезпечення сучасних вимог до якості обслуговування внаслідок необхідності ретрансляцій, непостійності пропускної спроможності радіоканалу, залежності пропускної спроможності від відстані між рухомими радіостанціями, потужності передачі, кількості сусідніх вузлів та рівня створюваного ними трафіку та ін.

Сучасні тенденції удосконалення ПРС полягають у застосуванні адаптивних антенних систем, які дозволяють підвищити пропускну здатність радіомережі та якість обслуговування користувачів [11 – 13].

Для практичної реалізації зазначених вище переваг необхідна розробка відповідних алгоритмів управління радіостанцією з діаграмою направленості, яка адаптивно формується, що дозволить підвищити зв'язність і пропускну спроможність ПРС.

Встановленню зв'язку в ПРС з направленими антенами передують попереднє виявлення радіостанції, що веде передачу, прийнятною [12]. Далі визначається напрямок приходу сигналу при роботі на прийом і відбувається формування ДН при роботі на передачу і прийом обома станціями, як показано на рис. 4.

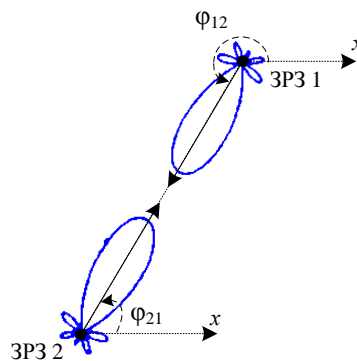


Рис. 4. Приклад орієнтації ДН приймальної і передавальної радіостанцій

Якщо радіостанція забезпечує ретрансляцію сигналу в одному інформаційному напрямку, то вона повинна сформувати ДН, що має два головних пелюстка, якщо ж на двох інформаційних напрямках – чотири. Очевидно, що зі збільшенням необхідного числа променів, коефіцієнт підсилення пелюстків ДН буде зменшуватись.

Аналіз коефіцієнтів підсилення сигналу і внутрішньосистемних завад, проведений у роботі [12], дозволяє зробити висновок про істотне збільшення можливостей радіоприйому радіостанцій систем рухомого радіозв'язку, що працюють в спільному радіоканалі за критерієм відношення сигнал/шум.

Результати чисельних експериментів, наведені у роботі [13], демонструють, що оптимальна схема маршрутизації суттєво залежить від урахування впливу завади і використання адаптивних антен.

Застосування ААР в інших галузях радотехніки. Крім радіозв'язку, ААР знаходять широке застосування в радіолокації [9, 14, 15]. У арміях багатьох держав йде перехід до нового стандарту радіолокаційного озброєння з безальтернативним використанням технології цифрового діаграмоутворення (ЦДУ) [9].

Перехід до використання ЦАР в системі GPS дозволяє довести рівень придушення множинних завад до 90 – 100 дБ [9]. Існуючі засоби GPS навігації втрачають працездатність при впливі одиночного джерела завад потужністю всього лише 0,25 Вт, з відстані 4 км.

Антенна система радіолокаційної станції (РЛС) S1850M є плоскою еквідистантною решіткою, що складається з 24 горизонтальних лінійок випромінювачів по 48 диполів кожен. Конструктивно технологічне виконання антени разом із цифровим діаграмоутворенням у вертикальній площині забезпечують низький рівень бічних пелюстків як за азимутом, так і за

кутом місця. Вертикальна поляризація знижує вплив перевідбиттів від підстилаючої поверхні. Цифрове адаптивне діаграмоутворення в активних антенних решітках забезпечує оптимізацію рівня потужності зондування і часу „контакту” з ціллю (необхідного для придушення завадових відображень), підвищує стійкість до протирадіолокаційних дій. Формувач діаграми встановлює „нулі” в області бічних пелюсток і на краях головного, в той час як в традиційних радарях для досягнення того ж ефекту необхідно мати допоміжні антени („подавлювачі” бічних пелюстків), застосування яких неефективне при числі постановників активних завад понад чотири.

В умовах безпрецедентного посилення вимог до радіолокаційної техніки перехід до впровадження ЦАР – це єдино розумний спосіб усунути загрозу кризи традиційної радіолокації. Велика кількість відповідних розробок і фінансованих проектів дає підставу говорити про ЦДУ як основної технології РЛС ХХІ століття [9].

Крім цього, очевидно є доцільність застосування ААР у техніці радіоелектронної боротьби, а також радіорозвідки. У системах РЕБ застосування ААР дозволяє концентрувати потужність передавача у необхідних просторових секторах для ефективного подавлення декількох радіозасобів або груп радіозасобів (вузлів зв'язку), у тому числі з можливістю наведення, наприклад, при подавленні об'єктів, що рухаються з високою швидкістю. При цьому є можливість зменшити вплив потужного випромінювання на радіоелектронні засоби своїх військ за рахунок формування провалів ДН у відповідних просторових напрямках.

При веденні радіорозвідки та радіотехнічної розвідки – після виявлення факту передачі ААР дозволяє створити основний пелюсток ДН у відповідному напрямку і тим самим підвищити ефективність ведення розвідки.

Напрямки вдосконалення систем радіозв'язку при впровадженні адаптивних антенних решіток. Виходячи з проведеного аналізу, можна виокремити наступні перспективні напрямки досліджень.

1. З метою підвищення завадозахищеності ААР повинна формувати якомога більш глибокі провали та якнайбільші максимуми діаграми направленості у необхідних просторових напрямках (на джерела завад та сигналу, відповідно). Цього можна досягнути, в першу чергу, шляхом збільшення кількості елементів решітки та розрядності фазообертачів, що призводить до збільшення масо-габаритних показників та обчислювальної складності алгоритму діаграмоутворення (зменшення швидкодії). Тому виникає завдання знаходження оптимального рішення для конкретної СРЗ.

2. У стільникових системах, при виключенні певного просторового сектору з обслуговування, необхідно на рівні управління мережею вирішувати завдання перерозподілу секторів обслуговування між сусідніми базовими станціями, яке безпосередньо виконуватимуть ААР.

3. Для пакетних радіомереж, що самоорганізуються, актуальним є завдання розробки методики управління мережею, що реалізує оптимальне діаграмоутворення усіх задіяних вузлів з урахуванням маршрутизації інформаційних потоків, а також присутніх завад. При цьому, важливим завданням є забезпечення достатньо високої швидкості діаграмоутворення (перенацілювання променів), особливо при одночасному використанні вузла у якості ретранслятора на декількох інформаційних напрямках.

4. Відносно ААР, то очевидно, що, у загальному випадку, важливим та актуальним завданням є розробка алгоритмів управління діаграмоутворенням, які, в залежності від застосування ААР, повинні вирішувати схожі завдання по максимізації (мінімізації) одного з параметрів системи (показника ефективності) при виконанні обмежень на інші.

У роботі [10] проведено аналіз процесу управління діаграмоутворенням фазованої антенної решітки (ФАР) у багатоканальних системах зв'язку з використанням фазообертачів. Система управління фазообертачем повинна не тільки виробляти керуючий сигнал, але й, по можливості, контролювати відпрацьовані команди, за допомогою калібрувальних даних

компенсувати вплив зовнішніх впливів. Адаптивне формування діаграми направленості може бути реалізоване шляхом зважування прийнятих сигналів:

$$y(k) = \mathbf{x}^T(k) \mathbf{W}(k),$$

де $y(k)$ – сигнал на виході системи, $\mathbf{x}(k)$ – вектор сигналів від кожного з елементів антенної решітки, $\mathbf{W}(k)$ – вектор комплексних вагових коефіцієнтів, які здійснюють коригування амплітуди і фази сигналу. Синтез вектора вагових коефіцієнтів $\mathbf{W}(k)$ і представляє собою основну задачу адаптивного діаграмоутворення. Одним з найпростіших методів побудови вектора вагових коефіцієнтів є алгоритм постійного модуля (АПМ), заснований на тому, що сигнали з певним класом модуляції мають постійний модуль, а отже обробку сигналу на прийомі можна реалізувати з урахуванням апріорного знання деяких його властивостей.

Алгоритм постійного модуля, який докладно розглянутий в роботі [10], добре справляється з ефектами багатопроменевості, проте не пристосований до впливу навмисних завад. В роботі [6] було проведено дослідження трьох методів адаптивного діаграмоутворення для підвищення завадозахищеності: найменших квадратів LMS, оптимізований LMS, та рекурсивний алгоритм найменших квадратів RLS.

В результаті було зроблено висновок, що метод RLS, хоч і потребує більшої обчислювальної складності (що на думку авторів не є проблемою зараз), проте забезпечує глибші нулі в напрямку завад і швидшу збіжність, що особливо проявляється для низьких відношень сигнал/шум та сигнал/завада в каналі. Задачі підвищення точності та швидкодії при управлінні цифровим діаграмоутворенням ставляться та вирішуються, також, у роботах [16 – 18], проте, вони не враховують можливий вплив навмисних завад.

Висновки. Таким чином, застосування адаптивних антенних решіток дозволяє:

у системах радіозв'язку (СРЗ) – збільшувати дальність зв'язку, підвищити завадозахищеність, стійкість в умовах багатопроменевості, якість обслуговування у стільникових системах, підвищувати електромагнітну сумісність та ефективність використання радіочастотного та просторово-частотного ресурсу за рахунок просторового (релеєвського) надрозрізнення;

у радіолокації – створювати вузьконаправлений скануючий промінь або декілька променів для спостереження за відповідною кількістю цілей, а також підвищувати завадозахищеність радіолокаційних станцій;

у системах РЕБ – концентрувати потужність передавача у необхідному просторовому секторі (секторах) для ефективного подавлення радіозасобів, а також для зменшення шкідливого впливу на завадостійкість радіозасобів своїх військ;

у системах радіотехнічної та радіорозвідки – для підвищення ефективності їх ведення шляхом формування максимумів діаграми направленості на об'єкти розвідки.

Напрямок подальших досліджень є розробка нових і удосконалення існуючих алгоритмів формування діаграми направленості адаптивних антенних решіток, спрямованих на підвищення швидкодії, ступеня подавлення завад та зменшення відхилення характеристик діаграми направленості від заданих при формуванні максимумів і мінімумів у необхідних просторових напрямках, особливо, у складній завадовій обстановці.

ЛІТЕРАТУРА

1. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн / [Г.А. Ерохин, О.В. Чернов, Н.Д. Козырев, В.Д. Кочержевский]. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 531 с.
2. Пистолькорс А. А. Введение в теорию адаптивных антенн / А. А. Пистолькорс, О. С. Литвинов. – М.: Наука, 1991. – 200 с.
3. Міночкін Д. А. Використання адаптивних антенних решіток для підвищення завадозахищеності систем радіозв'язку в складних завадових умовах / Д. А. Міночкін // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2012. – № 1. – С. 89 – 95.

4. Zaharis Z. D. Improved antenna array adaptive beam-forming with low side lobe level using a novel adaptive invasive weed optimization method / Z. D. Zaharis, C. Skeberis, T. D. Xenos // *Progress In Electromagnetics Research*. – 2012. – Vol. 124. – Pp. 137 – 150.
5. Jabbar A. N. A novel ultra-fast ultra-simple adaptive blind beamforming algorithm for smart antenna arrays / A. N. Jabbar // *Progress In Electromagnetics Research*. – 2011. – Vol. 35. – Pp. 329 – 348.
6. Adaptive beamforming algorithms for anti-jamming / [Rana Liaquat Ali, Anum Ali, Anisur-Rehman and. oth.] // *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*. – 2011. – Vol. 4. – № 1. – Pp. 95 – 105.
7. Sidi Bahri. Performance of adaptive beamforming algorithm for LMS-MCCDMA MIMO smart antennas / Sidi Bahri and Fethi Bendimerad // *The International Arab Journal of Information Technology*. – 2009. – Vol. 6. – № 3. – Pp. 283 – 288.
8. Тітов І. В. Підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу за рахунок застосування цифрових антенних решіток / І. В. Тітов, С. А. Макаров // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2011. – № 4(28). – С. 92 – 94.
9. Слюсар В. Цифровые антенные решетки – будущее радиолокации / В. Слюсар // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. – 2001. – № 3. – С. 42 – 46.
10. Голубева И.П. Адаптивное диаграммообразование в многоканальных системах связи / И. П. Голубева, Ю. В. Прокопенко, В. А. Казмиренко // *Электроника и связь. Тематический выпуск „Электроника и нанотехнологии”, ч. 1*. – 2009. – С. 290 – 293.
11. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами / [С.Г. Бунин, А.П. Войтер, М.Е. Ильченко, В.А. Романюк]. – К.: НПП „Издательство „Наукова думка” НАН України”, 2012. – 444 с.: ил.
12. Фокин Г.А. Управление самоорганизующимися пакетными радиосетями на основе радиостанций с направленными антеннами: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.13.13 „Телекоммуникационные системы и компьютерные сети” / Г.А. Фокин. – СПб, 2009. – 19 с.
13. Стромов Ю.Б. Моделирование маршрутизации в беспроводной ячеистой сети использующей простейшие адаптивные антенны / Стромов Ю.Б. Нечаев, А.Д. Баев // *Теория и техника радиосвязи*. – 2013. – № 4. – С. 57 – 63.
14. Ципоренко В. В. Цифровой метод широкоугольного комплексного спектрально-кореляційного пеленгування радіовипромінювань з використанням антенної решітки / В. В. Ципоренко // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2010. – № 2. – С. 106 – 111.
15. Ципоренко В. В. Безпошуковий цифровий метод спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгування з використанням антенної решітки / В. В. Ципоренко, В. Г. Ципоренко // *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*. – 2012. – № 1 (60). – С. 77 – 83.
16. Нестерук С. В. Багатоцільова антенна решітка з цифровим керуванням: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.12.07 „Анени та пристрої мікрохвильової техніки” / С. В. Нестерук. – Одеса, 2009. – 20 с.
17. Бондаренко М. В. Методи оцінювання джиттера в цифрових антенних решітках: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.12.07 „Анени та пристрої мікрохвильової техніки” / М. В. Бондаренко. – К., 2013. – 22 с.
18. Туз Ю. М. Аналіз похибок системи вимірювання просторово-часових характеристик лінійних фазованих антенних решіток п'єзоелектричних перетворювачів / Ю. М. Туз, О. П. Красковський, О. О. Мосолаб // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2012. – № 06 (82). – С. 62 – 66.