

ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ ПРОМЕНЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АНТЕН

*А. В. Булашенко, викладач,
Шосткінський інститут Сумського державного університету,
м. Шостка*

Подано огляд сучасних технологій інтелектуальних антен щодо можливості використання у телекомунікаційних системах. Особлива увага зосереджена на системах мобільного зв'язку та супутникових системах.

ВСТУП

Неперервний розвиток радіосистем потребує більш ефективних антенних пристроїв, які здатні збільшити якість одержаної інформації. Для збільшення якості прийнятого сигналу у радіосистемах все більше почали використовувати інтелектуальні антени. У системах рухомого зв'язку ємність та робота системи обмежується двома головними причинами. Першою причиною є багатопроменевість, а другою – інтерференція між сусідніми каналами. Багатопроменевість виникає тоді, коли переданий сигнал перевідбивається від різноманітних перешкод, що розміщені на шляху його поширення. Таким чином, виникають багатопроменеві сигнали, що проходять різними шляхами, а отже мають різну фазу, коли досягають приймача. У результаті на приймачі одержуємо погіршення якості сигналу, оскільки результуючий сигнал є сума сигналів з різними фазами. Інтерференція між сусідніми каналами – це інтерференція між двома сигналами, що працюють на одній і тій самій частоті.

Метою дослідження є аналітичний огляд алгоритмів та принципів роботи цифрових антенних решіток, можливості їх застосування та подальшого розвитку.

Інтелектуальні антени – це найбільш перспективніша технологія, що покращує якість прийнятого сигналу за рахунок збільшення ємності системи, зменшує багатопроменевість та інтерференцію між сусідніми каналами. Це досягається за рахунок зосередження випромінювання тільки у необхідному напрямку. Інтелектуальні антени використовують набір випромінюючих елементів побудованих у формі решітки. Сигнали від цих елементів об'єднуються для формування рухливої або перемикальної моделі променя, який йде за необхідним напрямком сигналу (абонента). Насправді інтелектуальні антени не є інтелектуальними, оскільки їх інтелектуальними робить процесор, що виконує цифрову обробку сигналу. Процес об'єднання сигналів від елементів решітки та зосередження випромінювання у потрібному напрямку часто називають цифровим формуванням діаграми спрямованості.

Фундаментальні принципи, на яких базується технологія інтелектуальних антен, не є новими. Ці принципи були розроблені для військових застосувань у 1970 - 1980 роках. Особливо ці методи використовувалися у радіоелектронній боротьбі у військових радарних системах для усунення інтерференції та завад, що створював ворог [29, 38, 39, 42 – 44]. Оскільки боротьба з інтерференцією була головною особливістю цих систем, то її почали використовувати в системах рухомого зв'язку, де інтерференція обмежує число абонентів системи. Це головна причина для застосування технології інтелектуальних антен у системах мобільного зв'язку. Подальший розвиток компонентної бази швидкісних процесорів цифрової обробки та створення нових алгоритмів

для адаптивної обробки зробили інтелектуальні антени доступними для комерційного використання.

Серед вже існуючих проектів РЛС з ЦАР можна виділити Нижньгородський 55Ж6У та 1Л119 [38], у яких цифрове формування просторових діаграм спрямованості реалізоване у метровому діапазоні хвиль. Прикладом реалізації ЦАР в радіолокації у дециметровому та сантиметровому діапазонах хвиль є РЛС S1850M, у якій локатор D-діапазону (1-2 ГГц) належить до сім'ї багатопроменевих трьох координатних РЛС Smart. Аналогічна багатопроменева РЛС з ЦАР Smart-S F-діапазону (3-4 ГГц) вже зараз експлуатується на кораблях НАТО, що базується на багатопроменевому функціонуванні в кутомірній площині [38]. РЛС Samson фірми Siemens Plessey має антену діаметром 2.2 метри та більше, ніж 900 приймально-передавальних модулів, що випромінюють потужність до 10 Вт кожний. Це більш ефективна система для розв'язання задач протиракетної оборони. Серед інших проектів є багатофункціональна РЛС APAR X-діапазону (8-12.4 ГГц), що використовується для ППО кораблів класу фрегат. Антена решітка такої системи складається з чотирьох секцій, що розміщені за гранями зрізаної піраміди. Кожна з граней забезпечує огляд сектора 120° за азимутом та 70° за кутом місця.

Великий інтерес викликає реалізація ЦАР для вдосконалення протиповітряної оборони наземних об'єктів. Однією з перших з'явилася французька РЛС RIAS, що може виявляти цілі, що виконані за технологією стелс за рахунок використання метрового діапазону хвиль. Така РЛС має 25 передавальних та 64 всеспрямованих приймальних антен, що розташовані на стовпах за двома концентричними колами діаметром декілька сотень метрів.

У рамках канадського проекту реалізації РЛС на базі ЦАР здійснюється вивчення контролю берегової зони. Тут дві когерентних РЛС поверхневих хвиль дозволяють виявити надводні та низьколетючі цілі на дуальностях до 450 км. Кожна РЛС містить приймальну ЦАР з двох лінійок по 32 елементи кожна та окремо розміщену передавальну антенну систему. Оцифрування сигналів здійснюється з частотою дискретизації 125 кГц. Прикладом реалізації РЛС у наземній військовій системі є відомий американський проект армійської мобільної системи ППО THAAD. Тут радар секторного обзору X-діапазону з дальністю виявлення цілей до 1000 км використовує адаптивне цифрове формування адаптивної діаграми спрямованості за кутом місця.

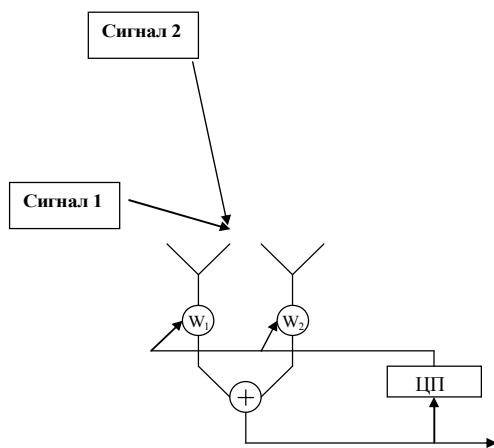


Рисунок 1 - Принцип роботи інтелектуальної антени

Також використовують технології ЦАР для бортової РЛС на літаках. Прикладом є РЛС CLOSE LPI, де ЦАР разом з приймально-передавальними модулями має габарити $1.1 \times 0.5 \times 1.2$ м при масі 80 кг, блок обробки сигналів розмірами $0.6 \times 0.4 \times 0.4$ м важить 25 кг.

Серед технологічної новизни спеціалісти відводять проектам реалізації ЦАР за допомогою чипів.

Головна ідея роботи інтелектуальної антени проілюстрована на рис. 1.

У найпростішому випадку система інтелектуальної антени

використовує дві антени та цифровий процесор (ЦП), щоб визначити потрібний напрям через різні часові затримки сигналів, і процесор визначає напрям приходу потрібного сигналу.

ТИПИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АНТЕН

У загальному випадку є два основних типи інтелектуальних антен: антени з перемиканням променя та адаптивні антенні решітки.

Застосування інтелектуальних антен з перемиканням променя більш простіше порівняно з адаптивними антенними решітками. Такий тип решіток забезпечує значне збільшення ємності порівняно з традиційними (спрямованими та секторними). При такому підході антенна решітка формує, накладаючи один на одного, промені, які покривають навколишню область, як показано на рис. 2.

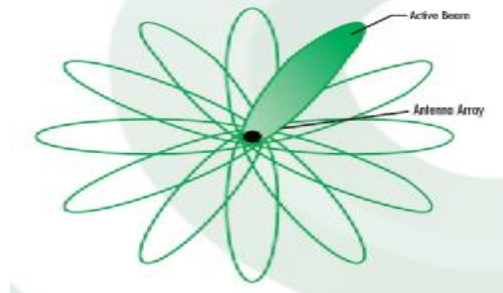


Рисунок 2 - Діаграма спрямованості інтелектуальної антени з перемикальним променем

Коли сигнал виявлений, по процесор системи визначає промінь, який найкраще всього спрямований у потрібному напрямку і потім перемикається на той промінь, щоб підтримувати зв'язок з користувачем. Інтелектуальні антени з перемиканням променя використовують випромінювання декількох фіксованих променів, що охоплюють визначену кутову область. Це дозволяє розбити сектор на багато вузьких променів. Кожен промінь можна розглядати як індивідуальний сектор, що використовується індивідуальним користувачем (сигналом) чи групою користувачів (сигналами). Просторово відділений спрямований промінь приводить до збільшення повторного використання частоти каналу, зменшуючи потенційну інтерференцію, а також збільшуючи діапазон. Такі антени не мають однорідного підсилення в усіх напрямках, але порівняно зі звичайною антенною системою вони збільшують підсилення в необхідному напрямку. Інтелектуальна антена з перемиканням променя має перемикальний механізм, який дозволяє їй обрати промінь, який забезпечує найкращий прийом сигналу та перемкнутися на нього. Вибір променя базується на максимальній одержаній потужності для користувача.

Типова система перемикання променя повинна складатися з багатьох решіток, кожна з яких перекриває визначений сектор. Розглянемо систему перемикання променя, що зображена на рис. 3.

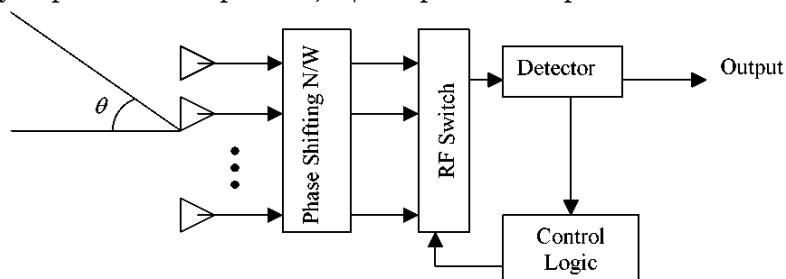


Рисунок 3 - Блок-схема системи перемикання променя

Схема складається з мережі фазозсувачів, які формують промені діаграми спрямованості у потрібних напрямках. Вибір правильного променя здійснюється за допомогою схеми логіки короля (Control Logic). Логікою контролю керує алгоритм, який переглядає всі промені та обирає той, що одержує найпотужніший сигнал, що визначається за допомогою відповідних вимірів.

Ця техніка виявляється простою для виконання, але вона не підходить для областей з високою інтерференцією. Розглянемо випадок, якщо перший користувач знаходиться на краю променя. Якщо другий користувач у тій самій області променя, що і перший, то він створює інтерференцію першому користувачу. Якщо другий користувач буде мати більш потужний сигнал, то інтелектуальна антена сприйме його за сигнал першого променя. Отже, для таких антенних систем найкраще всього області з малою інтерференцією. Система з перемиканням променя використовується лише для прийому сигналів. Крім того, коли користувач активно рухається, то необхідно керувати перемиканням при переході з однієї області променя до іншої. Системи перемикання променя не можуть зменшити багатопроменеві інтерферуючі компоненти у напрямках, що близькі до напрямку необхідного сигналу. Не дивлячись на ці недоліки, інтелектуальна антена з перемиканням променя менш складна порівняно з адаптованою антенною системою та забезпечує суттєве розширення діапазону, збільшення ємності та значне відхилення інтерференції, коли користувач знаходиться у центрі променя. Таким чином, це дешевший метод і його легко реалізувати в існуючих системах.

Використовують різні підходи, щоб забезпечити нерухомі промені в інтелектуальних антенах з перемиканням променя. Деякі з них використовують мережу фазообертачів та спрямованих розгалужувачів. Найбільш широко відомі матриця Батлера та матриця Бласа. Матриця Батлера використовується для забезпечення необхідної зміни фази для лінійної антенної решітки та формування променів у різних напрямках. Така матриця легко реалізується та потребує небагато компонентів порівняно з іншими мережами живлення, але недоліком є залежність ширини променя та кута променя від частоти. Цих недоліків немає у матриці Бласа, але вони потребують більшої кількості компонентів, що робить її дорожчою.

Система адаптивної антенної решітки відстежує потрібний сигнал безперервно, регулюючи головний промінь діаграми спрямованості таким чином, щоб він був спрямований у необхідному напрямку, тобто у бік потрібного користувача. В той самий час система формує нулі діаграми спрямованості у напрямку інтерферуючих сигналів, як показано на рис. 4.

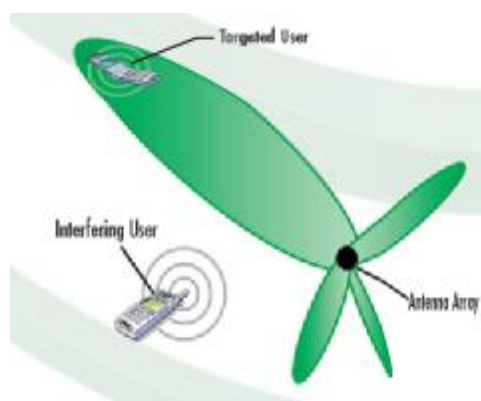


Рисунок 4 - Діаграма спрямованості для адаптивної антенної решітки

Як і системи з перемикальним променем вони також мають решітки. Як правило, одержаний сигнал від кожного з просторово розподілених елементів антени має свій ваговий коефіцієнт. За допомогою вагових коефіцієнтів регулюється амплітуда та фаза головного променя діаграми спрямованості. Вагові коефіцієнти розраховуються за допомогою адаптивного алгоритму, який знаходиться у цифровому процесорі.

На відміну від систем перемикання променя адаптивні антенні системи дійсно інтелектуальні, оскільки вони можуть динамічно реагувати на зміну навколишнього середовища поширення сигналів. Активною антенною решіткою керує цифровий процесор. Він регулює випромінюючий промінь у бік необхідного користувача, йдучи за ним, оскільки той рухається і у той самий час мінімізує інтерференцію, що створюють інші користувачі у напрямку головного користувача.

Інтелектуальна антенна система може визначати напрям надходження сигналу із всіх одержаних сигналів, включаючи сигнали інтерференції та багатопроменеві сигнали, використовуючи відповідний алгоритм. Також система може ідентифікувати потрібний сигнал користувача та відокремити від іншої частини небажаних сигналів. А потім система може спрямувати головний промінь діаграми спрямованості у напрямку потрібного сигналу та відстежувати користувача, який рухається і в той самий час розміщувати нулі діаграми спрямованості в інших напрямках сигналу, постійно оновлюючи вагові коефіцієнти.

Оскільки напрям випромінювання головного променя у решітці залежить від різниці фази між елементами решітки, то можна безперервно регулювати головний промінь у будь-якому напрямку, регулюючи різницю фази між елементами. В адаптивних решітках за допомогою зміни фази досягають максимального випромінювання у бажаному напрямку.

Типова схема адаптивної мережі з цифровим формуванням променя наведена на рис. 5.

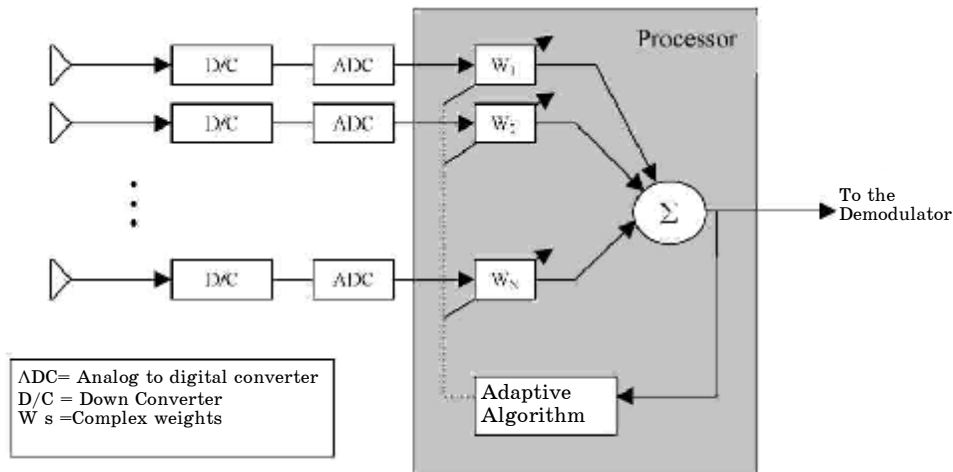


Рисунок 5 - Блок-схема системи адаптивної решітки

При формуванні променя падаючі сигнали на окремі елементи решітки об'єднуються таким чином, щоб сформувати один бажаний промінь на виході. Перш, ніж одержані сигнали помножити на вагові коефіцієнти, їх частоту понижують до основної смуги частот чи до проміжної частоти.

Адаптивна антенна решітка використовує процесор цифрової обробки сигналу, щоб сформувати вагові коефіцієнти за відповідним алгоритмом

та перемножити їх на сигнал, що надійшов. Цей сигнал у цифровий процесор необхідно подати у цифровій формі, тому перед цифровим процесором використовують аналогово-цифрові перетворювачі для перетворення сигналів у цифрову форму. Цифровий процесор визначає вагові коефіцієнти та перемножує їх на кожному виході елемента, щоб оптимізувати модель решітки. Оптимізація базується на критерії, який мінімізує складові сигналу, що одержані від завади та інтерференції, здійснюючи максимальне підсилення променя в бажаному напрямку. Існують алгоритми, що базуються на різних критеріях для оновлення та обчислення оптимальних вагових коефіцієнтів.

Існує багато адаптивних алгоритмів, але їх можна розділити на дві категорії. До першої категорії відносяться алгоритми, що ґрунтуються на адаптації, а до другої категорії – алгоритми, що базуються на вже відомій інформації.

Адаптовані алгоритми, у свою чергу, поділяються на алгоритми неперервної адаптації та алгоритми блокової адаптації. Алгоритми неперервної адаптації регулюють вагові коефіцієнти, оскільки спочатку були обрані прийняті дані, і потім коефіцієнти продовжують оновлюватися таким чином, що вони зводяться до оптимального розв'язку. Такі алгоритми використовуються, коли статистичні дані сигналу змінюються у часі. Прикладами таких алгоритмів є найменший середньоквадратичний алгоритм (LMS) та рекурсивний алгоритм найменших квадратів (RLS).

Алгоритми блокової адаптації обчислюють вагові коефіцієнти, що базуються на оцінках, що були одержані з часової сукупності даних. Такий метод може використовуватися у нестационарному навколишньому середовищі, коли вагові коефіцієнти періодично обчислюються. Прикладом такого алгоритму є алгоритм типової матричної інверсії (SMI).

Алгоритми, що базуються на вже відомій інформації діляться на алгоритми, які ґрунтуються на контрольних сигналах та сліпий адаптивний алгоритм. Алгоритми, що базуються на контрольних сигналах, використовують тестовий сигнал, який має велику кореляцію з бажаними сигналами. Цей тестовий сигнал порівнюють з прийнятим, і тоді вагові коефіцієнти налаштовуються таким чином, що мінімізувати середньоквадратичні помилки між одержаним та контрольними сигналами використовують тестовий сигнал. У цифрових комунікаціях як тестові сигнали використовуються сигнали синхронізації.

Сліпі адаптивні алгоритми створюють контрольний сигнал із одержаного сигналу для того, щоб одержати потрібний сигнал. Прикладом таких алгоритмів є алгоритм постійного модуля (CMA), циклостационарний алгоритм та алгоритм, що спрямований на розв'язання.

На практиці використовують комбінацію цих алгоритмів [11, 15, 33, 40].

Ще однією істотною перевагою інтелектуальних антенних решіток є можливість розділення спектра у просторі. Це багатократний доступ з просторовим розділенням каналів (SDMA) [4]. SDMA, як правило, використовуються у комбінації з TDMA, FDMA, CDMA. Через точні траєкторії та стійкі можливості відхилення інтерференції користувачі можуть використовувати один і той самий канал в одній комірці (рис. 6). SDMA це одне зі складних використань технології інтелектуальних антен [28]. Цей метод дозволяє визначити місцеперебування багатьох користувачів, створюючи різні промені для кожного з користувачів. Схема SDMA ґрунтується на тому, що сигнали від різних користувачів приходять до антенної решітки у різний час завдяки їх просторовому рознесенню. Ця затримка використовується, щоб відрізнити одного та більше користувачів в одній області від усіх інших. Ця технологія

дозволяє користувачам у межах однієї і тієї самої комірки розміщуватися на одній і тій самій частоті і в один і той самий час, як показано на рис. 6. Система SDMA - це ефективний засіб для боротьби із замираннями сигналу. Багатократні сигнали можуть бути розділені приймачем, доки їх кутова здатність більша, ніж ширина променя.

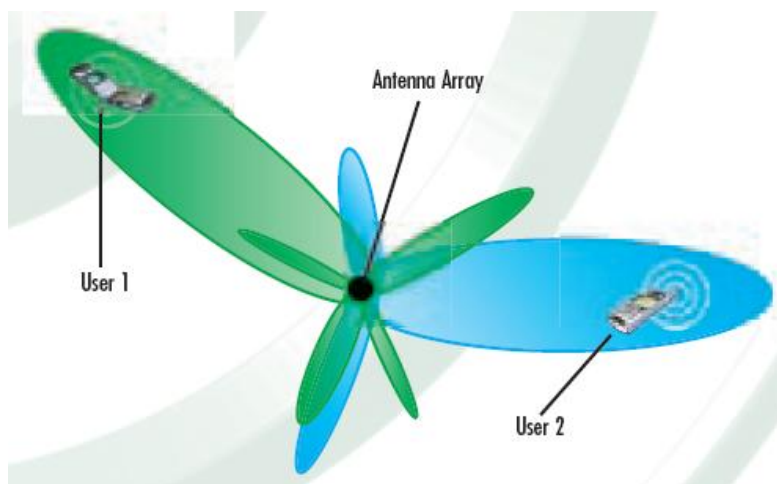


Рисунок 6 - Діаграма спрямованості інтелектуальної антени з SDMA

ПЕРЕВАГИ ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АНТЕН

1. Зменшення інтерференції між каналами, що використовують одну й ту саму частоту.

Інтелектуальні антени мають властивість просторової фільтрації для зосередженого випромінювання енергії у формі вузьких променів тільки у потрібному напрямку. Крім того, вони створюють нулі діаграми спрямованості поблизу у напрямку інших сигналів.

2. Збільшення діапазону покриття

Оскільки інтелектуальні антени використовують набір елементів у формі антенної решітки, то вони створюють вузький промінь зі збільшеним підсиленням порівнянно зі звичайними антенами, що використовують таку саму потужність. Збільшення підсилення приводить до збільшення діапазону покриття системи.

3. Збільшення ємності

Інтелектуальні антени дозволяють скорочувати міжканальну інтерференцію, що призводить до збільшення фактора повторного використання частоти. Інтелектуальні антени дозволяють великій кількості користувачів використовувати один і той самий спектр частоти у той самий час, що викликає збільшення ємності.

4. Зменшення випромінюючої потужності

Звичайні антени випромінюють енергію у всіх напрямках, що веде до втрати потужності. Інтелектуальні антени випромінюють тільки в бажаному напрямку, тому менші потужності необхідні для випромінювання. Зменшення випромінюваної потужності призводить до зменшення інтерференції для інших користувачів.

5. Зменшення ефектів багатопробності

Інтелектуальні антени можуть відхилити багатопробні компоненти як інтерференцію або можуть використовувати багатопробні компоненти та додавати їх конструктивно, щоб збільшити працездатність системи.

6. Сумісність

Технології інтелектуальних антен можуть застосовуватися до різних методів багатократного доступу, таких як TDMA, FDMA, CDMA, SDMA. Ці технології сумісні майже будь-яким видом модуляції, смугою пропускання, діапазоном частот.

7. Безпека інформації

У суспільстві, яке стає дуже залежним від інформації, безпека інформації стає важливою проблемою. Інтелектуальні антени роблять складнішим процес перехоплення інформації, оскільки для цього необхідно знаходитися у тому самому напрямку, як і користувач від центра випромінювання.

8. Виявлення місцезнаходження користувача

Через просторову природу виявлення інтелектуальних антенних систем є можливість одержання просторової інформації від користувача. Ця інформація може бути найбільш точною, ніж в існуючих системах. Отже, точне місцезнаходження може використовуватися у послугах такої мережі.

Окрім переваг, існують і недоліки. Приймачі та передавачі інтелектуальної антени набагато складніші, ніж традиційні. Окремі кола приймачів та передавачів необхідні для кожного з елементів антени та необхідне точне калібрування кожного з них у реальному часі. Крім того, адаптивне формування променя вимагає потужних обчислень. Таким чином, інтелектуальна антенна система повинна мати дуже потужні числові процесори та системи управління. Таким чином, для мобільних систем базові станції будуть на небагато дорожчими, ніж існуючі.

Для інтелектуальної антени, щоб одержати підсилення, необхідна антенна решітка з декількома елементами. Типові решітки складаються з 6 – 10 елементів. Необхідний інтервал між елементами повинен бути 0,4-0,5 від довжини хвилі. Антена з вісьмома елементами була б 1,2 м шириною для 900 МГц та 60 см для 2ГГц.

Ще однією з проблем, що виникають під час проектування інтелектуальних антенних решіток є вплив діаграми спрямованості окремих елементів решітки на сусідні [1]. Цей ефект може вплинути на роботу інтелектуальної антенної решітки. Ефекти взаємного впливу викликає зсув максимуму та нулів діаграми спрямованості, а отже, алгоритм формування променя дає неточні результати. Крім того, цей вплив збільшується зі зменшенням інтервалів між елементами решітки. Таким чином, при проектуванні інтелектуальних антенних решіток обов'язково необхідно враховувати цей ефект.

ВИСНОВКИ

Таким чином, основними перевагами технології інтелектуальних антен порівняно з іншими технологіями є спектральна ефективність та можливість адаптуватися до змінного навколишнього середовища, що дає можливість використовувати технології при проектуванні сучасних радіосистем у будь-якій модифікації залежно від завдань, які будуть ставитися перед системою.

Подальший розвиток інтелектуальних антен полягає у розробці більш простих та швидкодійних алгоритмів та схемних реалізацій цифрових антенних решіток. Цей процес сповільнюється розробкою сучасної елементної бази, а саме швидкодійних процесорів.

SUMMARY

Thus, the main advantages of smart antenna technology over other technologies is the spectral efficiency and to adapt to changing environment, which allows the use of technology in the design of modern radio in any modifications depending on the applications that relate to the system.

Further development of smart antennas is to develop a simple and high-speed algorithms and circuit implementations of digital antenna arrays. This process slows the development of modern element base, namely high-speed processors.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bellofiore S. Smart-Antenna Systems for Mobile Communication Networks / Bellofiore S., Balanis C., Foutz J., Spanias A. // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2002. – Vol. 44, № 3. – P. 145 – 154.
2. John S. Thompson. Intelligent Antennas for Cellular Systems / John S. Thompson, Peter M. Grant, Bernard Mulgrew // The review of radio science 1996 – 1999.– Oxford University Press, 1999. – P. 239 – 271.
3. Delise G. Intelligent antennas for future wireless communications / Delise G., Hettak K., Godfrey Lucas // Modern radio science 1999.– Oxford University Press, 1999. – P. 125 – 149.
4. Bellofiore S. Smart Antenna Array for CDMA Systems / Bellofiore S., Balanis C., Foutz J., Spanias A. // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – October, 1996. - P.16 – 25.
5. Martin Cooper. Intelligent Antennas: Spatial Division Multiple Access / Martin Cooper, Marc Goldberg // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – October, 1996. - P. 999 – 1002.
6. Joseph C. Liberti, Theodore S. Rappaport. Smart Antennas for Wireless communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications, 1999. – 375 p.
7. Constantine A. Balanis, Panaiotis I. Ioannides, Introduction in Smart Antennas. - Arizona State University, 2004. – 175 p.
8. Uhling P. A Digital Beam-Forming antenna Module for a Mobile Multimedia Terminal in LTCC-Multilayer Technique / Uhling P., Holzwarth S., Litschke O., Simon W., Baggen R. // EMPC 2005, June 12- 15, Brugge, Belgium. – P. 467 – 470.
9. Rameshwar Kawitkar. Issues in Deployng Smart Antennas in Mobile Radio Networks // PWASET . – 2008. – Vol. 31. – P. 361 – 366.
10. Petr Pomenka, Zbynek Raida A simple digital adaptive antenna based on undersampling // Radioengineering. – 1997. – Vol. 6, № 4. – P. 6 – 9.
11. Bouacha A. Modified blind beamforming algorithm for smart for antenna system / Bouacha A., Debbat F., Bendimerad F. // Journal of Radio electronics. – 2008. – Vol. 1.
12. Seungheon Hyun. Ztandardizing smart antenna API for SDR networks / Seungheon Hyun, June Kim, Seungwon Choi, Lee Pucker and Bruce Fette // Software Radio. – 2007. – Vol. 18. – P. 34 – 40.
13. Vian J. Smart Lens Antenna Arrays / Vian J., Popovic Z. // IEEE MTT-S Digest, 2001. – P. 129 – 132.
14. Slyusar V. I. Correction of smart antennas receiving channels characteristics for 4G mobile communications / Slyusar V. I., Titov I. V. // International Conference on Antenna Theory and Techniques, 9 – 12 September, 2003, Sevastopol, Ukraine. - P. 374 – 375.
15. Sharma S. B. Digital Beam Fotming Algorithms for Adaptive Antenna Array / Sharma S. B., Buch U. V. // Indian Conference on Microwaves, Antenna, Propagation and Remote Sensing InCMARS-2005, 20 – 22 Desember, 2005.
16. Shena R. Estimation of DOA for Smart Antenna using a front-end based in FPGA foreseeing a SDR architecture / Shena R., Garcia F., Nogueira M., Wolski E. // EuCAP 2006, 6 – 10 November 2006, Nice, France.
17. Слюсар В. И. Цифровое формирование луча в системах связи: будущее рождается сегодня // Электроника: НТБ. – 2001. – № 1. – С. 6 – 12.
18. Слюсар В. И. Цифровое диаграмообразование – базовая технология перспективных систем связи // Радиоаматор. – 1999. – № 8. – С. 58 – 59.
19. Marousis A. An enhansmit transmit diversity scheme for MIMO MC-CDMA systems using three antennas / Marousis A., Constantinou P. // EuCAP 2007, 11 – 16 November 2007, Edinburgh, UK.
20. Bose R. Spotforming for ULTRA Wideband Communications using Smart Antenna Systems / Bose R., Dua L. // EuCAP 2006, 6 – 10 November 2006, Nice, France.
21. Arazo R. Smart Antennas control in complex scenarios through a memory enhanced PSO-based optimization approach / Arazo R., Benedetti M., Massa A. // EuCAP 2006, 6 – 10 November 2006, Nice, France.
22. Слюсар В. И. Схемотехника цифрового диаграмообразования. Модульные решения // Электроника: НТБ. – 2002. – № 1. – С. 2 – 8.
23. Слюсар В. И. Схемотехника цифровых антенных решеток: грани возможного // Электроника: НТБ. – 2004. – № 8. – С. 34 – 40.
24. Yu K. A new Antenna Shuffling Method for Hybrid Transmission Scheme / Yu K., Alexiou A. // EuCAP 2007, 11 – 16 November 2007, Edinburgh, UK.
25. Michalopoulou A. The impact of the user’s body on the performance of a MIMO terminal in “Pocket Position” / Michalopoulou A., Zervos T., Alexandridis A., Peppas K., Lazarakis F. // EuCAP 2006, 6 – 10 November 2006, Nice, France.
26. Jensen M. A. Experimental characterization of the MIMO channel temporal behaviour / Jensen M. A., Wallace J. W. // EuCAP 2007, 11 – 16 November 2007, Edinburgh, UK.

27. Holzwarth S., Litschke O., Simon W., Kuhlmann K., Jacob A. Far field pattern analysis and measurement of a digital beam forming 8x8 antenna array transmitting from 29.5 to 30 GHz // EuCAP 2007, 11 – 16 November 2007, Edinburgh, UK.
28. Monteiro V. Application of SDMA with Scheduling for MIMO MC-CDMA / Monteiro V., Rodrigues J., Gameiro A. // EuCAP 2006, 6 – 10 November 2006, Nice, France.
29. Zaharov V. Smart antenna application for satellite communication systems with space division multiple access / Zaharov V., Casco F., Gutierrez M. // Journal of Radio Electronics. – 2001. - N 2.
30. Слюсар В. И. Применение пространства лучей для приема импульсных сигналов в МІМО-системе / Слюсар В. И., Дубик А. Н. // НПК «Современные информационные и электронные технологии», 21 – 25 мая 2007, Одесса, Украина. – С. 202.
31. Слюсар В. І. Підвищення пропускної здатності систем рухомого зв'язку з цифровим діаграмоутворенням / Слюсар В. І., Тітов І. В., Слюсар І. І. // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2008. – Вип. 2. – С. 172 – 174.
32. Corbucci M. A compact dual-band antenna for WLAN applications / Corbucci M., Gatti R., Marcaccioli L., Sorrentino R. // EuCAP 2006, 6 – 10 November 2006, Nice, France.
33. Papadopoulos K. Optimal design of switched beam antenna arrays using parabolic SWARM optimization / Papadopoulos K., Papagianni C., Foukarakis D., Kaklamani I. // EuCAP 2006, 6 – 10 November 2006, Nice, France.
34. Simoes J. Effect of Smart Antennas on CDMA uplink and cross-border mitigation / Simoes J., Stevanovic I., Skriverlik A. // EuCAP 2006, 6 – 10 November 2006, Nice, France.
35. Alexandridis A. Towards a generalized methodology for smart antenna measurements / Alexandridis A., Lazarakis F., Zervos T., Dangakis K. // EuCAP 2006, 6 – 10 November 2006, Nice, France.
36. Demestichas P. Reconfiguration techniques to enhance cognitive networks efficiency / Demestichas P., Dimitrakopoulos G., Alexiou A. // EuCAP 2006, 6 – 10 November 2006, Nice, France.
37. Serebryakov G. V. High resolution capability of adaptive antenna arrays for communication systems / Serebryakov G. V., Tiraspol'sky S. A. // Journal of Radioelectronics. - 2002–Vol. 7.
38. Слюсар В. И. Цифровые антенные решетки: будущее радиолокации // Электроника: НТБ. – 2001. – № 3. – С. 42 – 46.
39. Слюсар В. И. Smart-антенны пошли в серию // Электроника: НТБ. – 2004. – № 1. – С. 52 – 55.
40. Ward C. R. A novel algorithm and architecture for adaptive digital beamforming / Ward C. R., Hargrave P. J., Whirter J. G. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, March 1986. -Vol. 34. – P. 338 – 346.
41. Zaharov V. Smart Antenna Base station beamformer for mobile communications / Zaharov V., Casco F., Amin O. // Journal of radioelectronics. – 2000. -Vol. 11.
42. Берикашвили В. Ш. Моноимпульсный радар для зондирования ледников с оптическим каналом синхронизации и цифровой обработкой сигналов / Берикашвили В. Ш., Василенко Е. В., Мачерет Ю. Я., Соколов В. Г. // Журнал Радиоэлектроники. – 2004. - № 4.
43. Слюсар В. Перспективи розвитку супутникового зв'язку / Слюсар В., Третьяченко С., Волошко С. // The sixth International Conference “Internet – Educational - Science”, 7 – 11 October 2008, Vinnytsia, Ukraine. – P. 336 - 339.
44. Слюсар В. Цифровые антенные решетки в мобильной спутниковой связи // Первая мила. – 2008. - № 5. – С. 16 – 20.
45. Gold K. An array of digital antenna elements for mitigation of multipath for carrier landings / Gold K., Brown A. // Proceeding of ION 2005 National Technical Meeting, San Diego, CA, January 2005.
46. Pomenka P. A simple digital adaptive antenna based on undersampling / Pomenka P., Zbinek R. // Radioengineering. – 1997. – Vol. 6, No. 4 – P. 6 – 9.

Надійшла до редакції 15 квітня 2010 р.