

УДК 621.391

І.Ю. Рубцов

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації, Київ

ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ПОБУДОВИ ЦИФРОВИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК У СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ

В статті розглянуті переваги використання технології цифрового діаграмоутворення на основі цифрових антенних решіток. Проведений аналіз впровадження та використання багатоантенної схемотехніки і цифрової обробки сигналів радіозв'язку в системах зв'язку загального та спеціального призначення. Визначені особливості використання цифрових антенних решіток, принципи побудови цифрових модулів обробки сигналів. Наведені напрямки подальших досліджень стосовно використання антенних елементів на фрактальній основі для мініатюризації та зменшення взаємного впливу антенних елементів між собою.

Ключові слова: цифрові антенні решітки, цифрове діаграмоутворення, цифрова обробка сигналів, система зв'язку.

Вступ

Сучасні вимоги до пропускної спроможності систем зв'язку та досягнення у цифровій обчислювальній техніці дозволяють використовувати у системах зв'язку технологію цифрового діаграмоутворення (ЦДУ), теоретичні основи якої було закладено в минулому сторіччі. Технологія цифрового діаграмоутворення широко впроваджується в розвинених країнах світу в системах зв'язку як загального, так і спеціального призначення. В цілому застосування цифрового діаграмоутворення дозволяє підвищити пропускну спроможність, суттєво зменшити вплив промислових радіоелектронних завад, а також засобів радіоелектронної боротьби і електромагнітного імпульсу. Технічною основою реалізації технології ЦДУ є використання багатоантенних цифрових антенних решіток (ЦАР) у сукупності з модулями цифрової обробки сигналів.

Мета роботи: визначити технічні аспекти, особливості та принципи побудови цифрових систем зв'язку з ЦДУ і ЦАР, сформулювати практичні рекомендації щодо реалізації зазначених систем з використанням наявного в Україні наукового та виробничого потенціалу.

Основна частина

Серед реалізованих проєктів, націлених на реалізацію технології концепції ЦДУ в системах мобільного зв'язку слід відзначити TSUNAMI-I (II) [1, 2]. У рамках проєкту TSUNAMI (Technology in Smart Antennas for Universal Advanced Mobile Infrastructure) консорціумом фірм на чолі з ERA Technology Ltd (Великобританія) [1] був виготовлений і випробуваний демонстратор приймально-передавальної 8-канальної ЦАР, що функціонує у частотному діапазоні 1710-1880 МГц. На другому етапі робіт (TSUNAMI-II) система з адаптивною ЦАР була роз-

горнута у складі базової станції стільникового зв'язку стандарту DCS-1800 у районі м. Брістоль (рис. 1). Перевірка якості супроводу мобільних адресатів в умовах впливу стаціонарних джерел завад, що відбулася при цьому, підтвердила переваги технології ЦДУ. При цьому був використаний спеціалізований модуль цифрового діаграмоутворення DBF 1108 розробки ERA Technology Ltd., що дозволяє обробляти комплексні виходи 128 каналів з часом синтезування діаграми спрямованості ЦАР 250 нс.

У ході іспитів пройшла апробацію система цифрової корекції характеристик прийомних каналів, покликана компенсувати технологічний розкид у параметрах антенних елементів і приймально-передавальних трактів. При цьому розроблювачі зіштовхнулися з необхідністю більш ретельно витримувати ідентичність амплітудно- і фазочастотних характеристик каналів ЦАР. Зокрема було встановлено, що розкид коефіцієнтів підсилення каналів 0,5 дБ при фазовій помилці 3° не дозволяє придушити заваду у 8-елементній решітці більше, ніж на 30 дБ [1].

Не дивно, що численні переваги ЦАР обумовили ріст їхньої ринкової привабливості. Проїшовши наприкінці 90-х років етап демонстраційних проєктів [3], дана технологія уже вступила в стадію серійного виготовлення антенних систем для систем стільникового зв'язку – діючих і перспективних. Серед піонерів серійного виробництва ЦАР провідні позиції займають компанії ArrayComm, Metawave Communications, AirNet Communications, Wireless Online (усі – США), а також Ericsson (Швеція).

Пальма першості в освоєнні серійних ЦАР для базових станцій стандарту CDMA належить американській компанії Metawave Communications, що випускає сімейство інтегрованих Smart-антен Spotlight. Перші ЦАР від Metawave Communications - Spotlight 2000 (2100) – працювали тільки в діапазоні несучих 800-900 МГц.

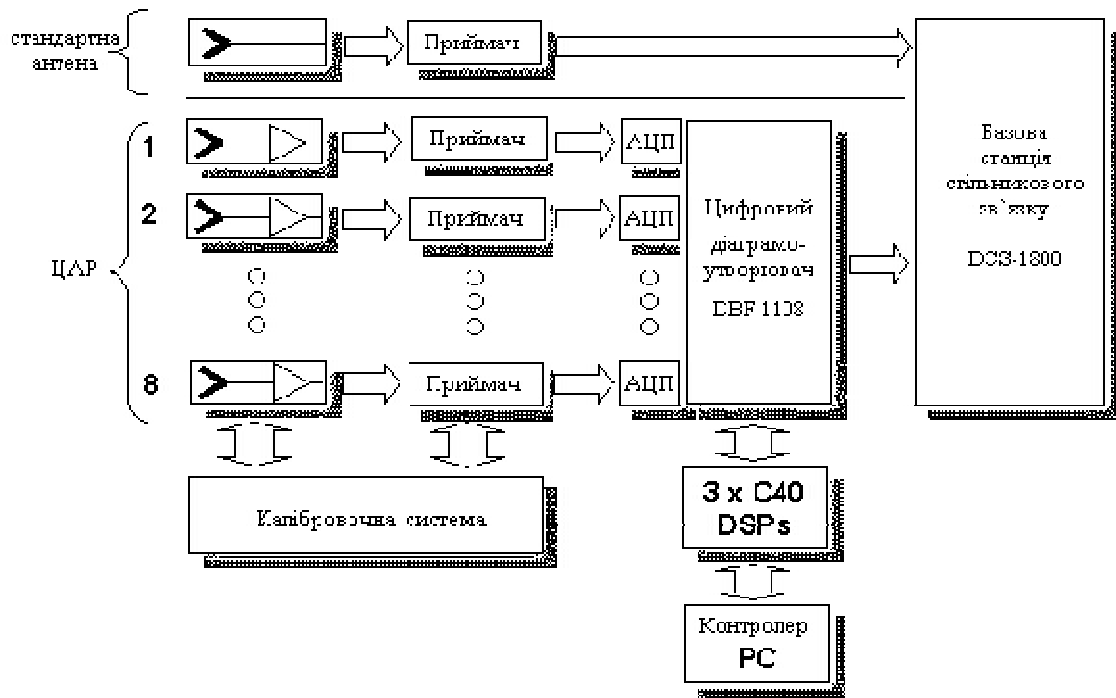


Рис. 1. Проект TSUNAMI: 8-канальна ЦАР у складі станції DCS-1800

Однак зараз системи Spotlight 2200 підтримують ще і смугу 1800-1900 МГц. Апаратура систем Spotlight базується на ASIC і FPGA, що зайвий раз говорить про перевагу застосування FPGA (програмованих логічних інтегральних схем) у порівнянні з DSP (цифровими сигнальними процесорами) при вирішенні задач ЦДУ [4].

Типова Smart-антена базової станції від Metawave складається з 12-елементного масиву випромінювачів, встановлених по 3-секторній схемі (рис. 2).

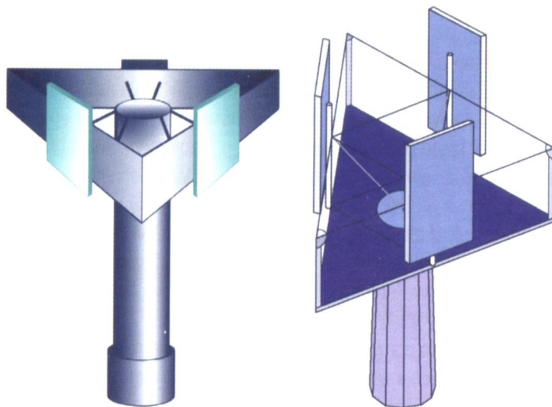


Рис. 2. Антенна система компанії Metawave

Кожна з секторних решіток сформована з чотирьох антенних елементів (рис. 3), приклад характеристик яких представлений на рис. 4.

Ширина ДС кожного антенного елемента на рівні -3 дБ складає близько 30°. Завдяки ЦДУ сумарна ширина основних (парціальних) променів кожного секторного сегмента ЦАР може приймати значення 180, 120 чи 60°.

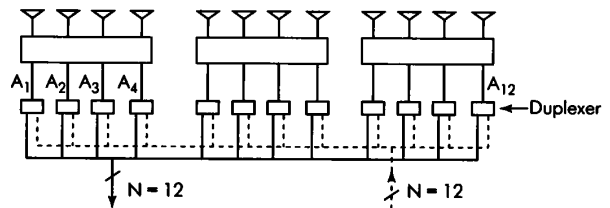


Рис. 3. Структура приймально-передавальної антенної решітки (суцільна лінія – режим прийому, пунктирна лінія – режим передачі)

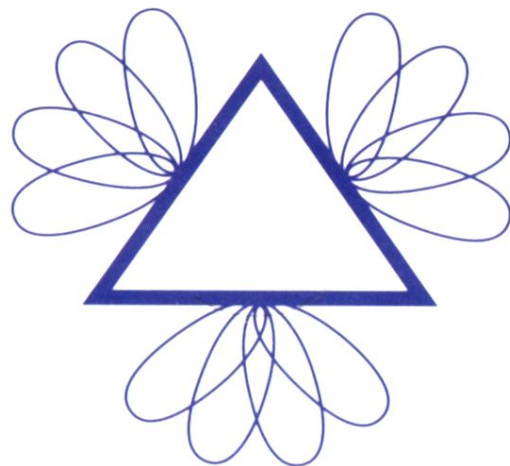


Рис. 4. Варіант орієнтації ДС Smart-антени компанії Metawave

Сам сектор випромінювання (прийому) може відхилитися відносно фізичної нормалі на кут $\pm 30^\circ$. Більш того, форма стільники також може змінюватися, отримуючи 3-, 4- і навіть 6-сегментні обриси (рис. 5).

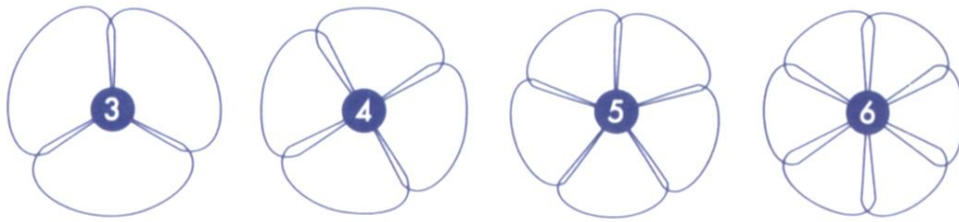


Рис. 5. Багатосекторна конфігурація ДС

Причому система Spotlight дозволяє в кожному з 120°-секторів у реальному масштабі часу вирізувати до трьох підсекторів, уражених перешкодами (так званий динамічний синтез сектору – DSS). У результаті спрощується частотне планування мережі, а оператор базової станції може раціонально перерозподіляти ресурси у залежності від специфіки навколишнього ландшафту, статистики розподілу запитів за часом доби, дня тижня і при непередбачених обставинах (рис. 6).

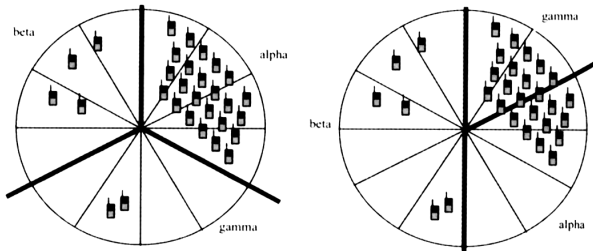


Рис. 6. Посекторна адаптація до навантаження за допомогою Smart-антени

Збільшення числа секторів прийому з 3 до 6 дозволяє істотно розширити ємність стільникового осередку (числа абонентів, що обслуговуються). За даними компанії Metawave [1], такий приріст для стандарту CDMA 2000 на основі Spotlight-рішень може досягати 94%.

Одна з розробок Metawave – антенний комплекс Spotlight 2230 – являє собою апаратуру ЦАР, що інтегрується до складу базової станції CDMA 1 EX разом з устаткуванням Lucent Flexent Modular Cell Base Station фірми Lucent Technologies [1] (рис. 7, 8). Компанія Lucent постачає ультралінійні підсилювачі потужності для передавального сегмента і малощумлячі підсилювальні модулі для багатоканального приймача.

Специфіка цифрового устаткування ЦАР дозволяє “м’яко” інтегрувати її в базову станцію будь-якого стандарту з мінімумом стикувальних робіт. При цьому вартість устаткування складе порядку 10% від вартості апаратури типової базової станції CDMA, розрахованої на обслуговування 48 – 72 одночасних викликів [1]. З огляду на, те що застосування ЦАР істотно підвищує ємність мережі, загальна економія засобів за рахунок відмови від додаткових базових станцій буде дуже значною. Відпові-

дно до зведень на сайті фірми Metawave, в усьому світі розгорнуто кілька сотень систем Spotlight, у тому числі й у Санкт-Петербурзі (Росія).

Компанія AirNet Communications [4] з офісом у містечку Мельбурн (шт. Флорида, США), на відміну від Metawave Communications, зосередила зусилля на розробці Smart-антен для модернізації базових станцій стандарту GSM (900, 1800, 1900 МГц) з підтримкою його розширень GPRS і EDGE. На теперішній час можлива і робота з базовими станціями стандарту WCDMA. В активі AirNet 69 діючих патентів, які компанія отримала з моменту появи на ринку телекомунікацій у 1994 р. Технологія ЦДУ використовується у базовій станції AdaptaCell Super Capacity (дослівно – супер’ємна адаптивна стільника). Спираючись на рекламні матеріали нескладно з’ясувати, що базова станція компанії AirNet обслуговує 8-елементну ЦАР, яка працює в секторі 120°. Отже, повноцінна 3-секторна ЦАР буде містити 24 елементи. Примітно, що AdaptaCell Super Capacity забезпечує цифрову обробку сигналів у всій смугі сигналів GSM [2] і сумісна з технологією “інтелектуальної стільники” IntelliCell [4], що просувається компанією AgrayCom (м. Хосе, шт. Каліфорнія) (рис. 9).

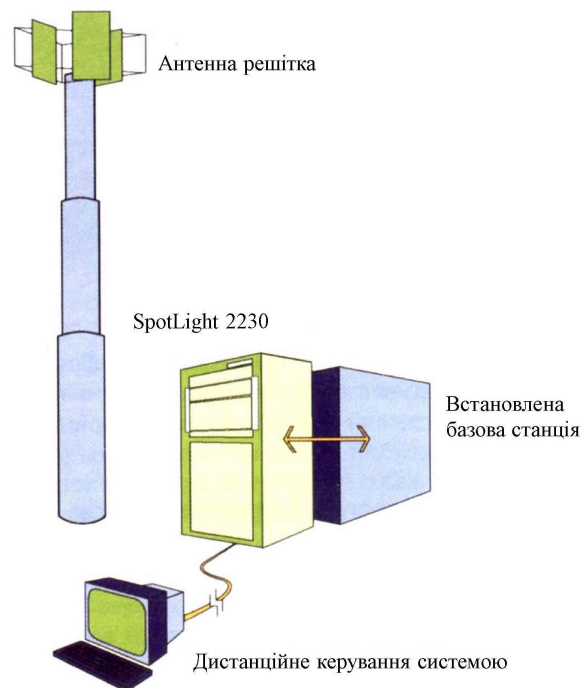


Рис. 7. Комплект апаратури базової станції CDMA 1EX з обладнанням SpotLight 2230

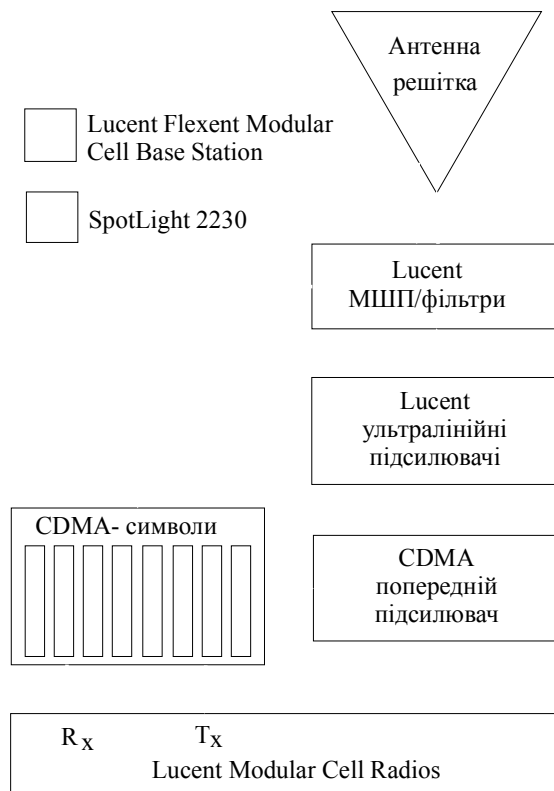


Рис. 8. Структурна схема обладнання базової Станції CDMA 1X

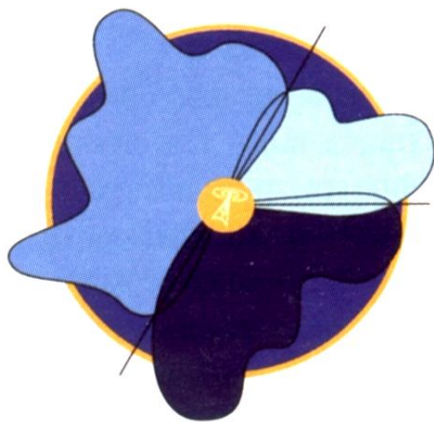


Рис. 9. “Інтелектуальна” стільника

ArrayCom разом з Metawave Communications, як відзначалося, є піонерами в розробці Smart-антен для радіозв'язку. Однак, на відміну від Metawave, ArrayCom з самого початку орієнтувалася на ринок 2.5G і 3G систем стільникового зв'язку, що підтримують стандарт WCDMA. Не дивно, що інтереси AirNet і ArrayCom перетнулися, і тепер вони найчастіше змушені поєднувати зусилля, у ряді випадків прибігаючи до спільного постачання устаткування.

Відповідно до заяв розроблювачів ArrayCom, базова станція IntelliCell при використанні технології ЦДУ дозволяє майже вдвічі скоротити необхідне для покриття зони обслуговування число базових станцій, на чверть знизити витрати при розгортанні знову

створюваної мережної інфраструктури і вдвічі зменшити час на інсталяційні роботи. Якщо вірити рекламним матеріалам, компанія ArrayCom уже поставила по всьому світі близько 60 тис. базових станцій.

Як стверджують розробники, строк повернення витрат на впровадження Smart-антен складає рік і менше. По мірі її удосконалення можуть бути досягнуті ще більш значні результати по збільшенню каналної ємності і розмірів зони, що покривається – наприклад, шляхом збільшення числа антенних елементів в одному секторі ЦАР (до 16 і більше – в азимутальній площині і до 4 - 8 – у вертикальній).

Темпи розвитку елементної бази дозволили приступити до масового поновлення інфраструктури стільникового зв'язку на основі Smart-антен. Причому наявний науковий заділ і досвід розробки таких систем у сполученні з необхідною технологічною базою дозволяють розгорнути і вітчизняне виробництво базових станцій з ЦАР, спираючись на закордонні комплектуючі й унікальний інтелектуальний потенціал вітчизняних розробників. Такий варіант розвитку подій дозволив би не тільки створити тисячі нових робочих місць на підприємствах, але і заощадити інвесторам ліву частку коштів на відновлення існуючої інфраструктури стільникового зв'язку. І хоча процеси зносу устаткування зв'язку ще не скоро порушать питання про таке відновлення, однак через підвищення інтересу до телекомунікацій і зростання їх ролі у всіх сферах діяльності моральне старіння апаратури відбувається значно швидше, ніж фізичне зношення. Тому готуватися до неминучого відновлення інфраструктури систем зв'язку потрібно вже зараз.

Крім задач мобільних комунікацій, розглянуті технічні рішення можуть бути рекомендовані для впровадження і в інтересах персонального зв'язку військового призначення. Слід вказати, що сучасна епоха глобалізації характеризується розвитком нових форм інформаційної боротьби [5, 6]. При цьому створюються виключно складні умови функціонування системи зв'язку під час ведення бойових дій. Як технічна підсистема системи управління військами вона є першочерговим об'єктом розвідки противника. Він може володіти необхідними та досконалими силами і засобами радіоелектронної боротьби, високоточної зброї, зброї електромагнітного імпульсу (ЕМІ-зброя) і має мету радіорозвідки, знищення і придушення ліній зв'язку, елементів системи зв'язку. Згідно [6], у провідних країнах світу зроблені і випробувані неядерні засоби генерації потужного ЕМІ, що здатні створювати короткі імпульсні потоки електромагнітного випромінювання, щільність яких досягає граничних значень електричної міцності атмосфери. Використання ЕМІ і радіочастотної зброї разом із засобами РЕБ у вигляді електронних і комбінованих електронно-вогневих

ударів для дистанційного виведення з ладу радіоелектронних засобів (РЕЗ) на відстанях від сотень метрів до десятків кілометрів може стати однією з основних форм бойових дій у найближчому майбутньому. Крім функціонального придушення, ЕМІ-зброя може здійснювати фізичне руйнування напівпровідникових елементів РЕЗ, навіть у вимкненому стані. При цьому у ланцюгах електро- та радіокомпонентів системи зв'язку індуквані струми можуть досягати рівнів, достатніх для їхнього руйнування в радіусі 50–60 м від місця підриву ЕМІ-боєприпасу середніх калібрів (100–120 мм). Зона поразки визначається, зокрема, частотою, діаграмою спрямованості (ДС) антени боєприпасу та антенної системи об'єкта поразки і відстанню до об'єкта.

Один з підходів до зниження впливу радіоелектронної протидії противника, у тому числі й ЕМІ-зброї, полягає у зменшенні спрямованих властивостей антенної системи, наприклад, за рахунок використання слабоспрямованих антенних елементів. Однак, стосовно ЦАР це пов'язане з таким негативним фактором, як ефект взаємного впливу між антенними елементами (іноді використовується синонім – взаємний вплив каналів). У результаті взаємодії випромінювачів можуть істотно змінюватись спрямовані властивості й енергетичні характеристики антени у порівнянні з характеристиками, визначеними без врахування взаємного впливу [6]. Ігнорування ефекту взаємного впливу може супроводжуватися втратами енергетики сигналу і порушенням зв'язку.

Висновки

Таким чином, в статті розглянуті технічні аспекти та основні переваги технології цифрового діаграмоутворення на базі цифрових антенних решіток у системах зв'язку у порівнянні з традиційними антенами. Для проведення цифрової обробки сигналів доцільно застосовувати найбільш відомі методи спектральної оцінки, наприклад: Бартлета, Кейпона,

MUSIC. Для підтвердження можливості реалізації технології ЦДУ розглянуто технічні аспекти побудови цифрових антенних решіток провідними фірмами на прикладі серійних зразків. Приділена увага основним напрямкам розвитку технології цифрового діаграмоутворення на базі цифрових антенних решіток та перспективам впровадження й подальшого розвитку цих технологій у діючих системах зв'язку та нових поколінь.

Серед напрямків подальших досліджень слід зазначити розробку теоретичних засад використання антенних елементів на фрактальній основі та їх мініатюризація з метою зниження взаємного впливу та збільшення інтервалу між елементами цифрової антенної решітки.

Список літератури

1. *Smart Antenna Systems for Mobile Communications [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: http://infoscience.epfl.ch/record/140902/files/smart_antennas.pdf.*
2. *Super Capacity Solution. The World's First GSM Adaptive Array Solution [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: www.airnetcom.com.*
3. *Murphy Edward F. Information Operations: Wisdom Warfare For 2025. Alternate Futures for 2025: Security Planning to Avoid Surprise. April 1996 / Edward F. Murphy, Gary C. Bender, Larry J. Schaefer, Michael M. Shepard. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.au.af.mil/au/2025/>.*
4. *Слюсар В. Цифровые антенные решетки: будущее радиолокации / В. Слюсар // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2001. – № 3. – С. 42-46.*
5. *Информационная война. Ближайшее будущее? (прогнозы) // Инженер. – 1996. – № 9. – С. 1-3, 27-31.*
6. *Ковтуненко О.П. Зброя на нетрадиційних принципах дії (стан, тенденції, принципи дії та захист від неї) / О.П. Ковтуненко, В.В. Богучарський, В.І. Слюсар, П.М. Феодоров. – Полтава: ПВІЗ, 2006. – 248 с.*

Надійшла до редколегії 27.08.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.А. Кучук, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК В СИСТЕМАХ СВЯЗИ

И.Ю. Рубцов

В статье рассмотрены преимущества использования технологии цифрового диаграммообразования на основе цифровых антенных решеток. Проведен анализ внедрения и использования многоантенной схмотехники и цифровой обработки сигналов радиосвязи в системах связи общего и специального назначения. Определены особенности использования цифровых антенных решеток, принципы построения цифровых модулей обработки сигналов. Приведены направления дальнейших исследований касательно использования антенных элементов на фрактальной основе для миниатюризации и уменьшения взаимного влияния антенных элементов между собой.

Ключевые слова: цифровые антенные решетки, цифровое диаграммообразование, цифровая обработка сигналов, система связи.

TECHNICAL ASPECTS OF BUILDING DIGITAL ANTENNA ARRAYS IN COMMUNICATION SYSTEMS

I.Y. Rubcov

The article discusses the advantages of using digital technology beamforming on the basis of digital antenna arrays. The analysis of the implementation and use multi antenna circuitry and digital signal processing in the radio communication systems for general and special purposes. Peculiarities in the use of digital antenna arrays, principles of digital modules of signal processing. Provides directions for further research regarding the use of antenna elements on a fractal basis for miniaturization and reduction of the mutual influence of antenna elements.

Keywords: digital antenna arrays, digital beamforming, digital signal processing, communication system.