

УДК 621.317

А.А. ЯРЕМЕНКО

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова

АДАПТИВНА АНТЕННА РЕШІТКА ДЛЯ МОБІЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Анотація. Наведені оригінальні результати дослідження електродинамічних характеристик і розробки антени для мобільних телекомунікаційних систем за рахунок використання багатоцільової антенної решітки. Рішення цієї задачі базується на побудові конформної АР зі всеполяризаційними ширококутовими антенними елементами і використання цифрового керування, що дозволяє програмним шляхом змінювати режими випромінювання АР та параметри діаграми спрямованості. Разом з тим розроблена АР дозволяє використовувати повну інформацію про структуру електромагнітного поля, що розширює потенційні можливості по керуванню електродинамічними характеристиками АР, зокрема поляризаційними.

Ключові слова: антенна решітка, діаграма спрямованості, амплітуда, простір, адаптація, сканування.

А.А. YAREMENKO

Odessa National Academy of Telecommunications n.a. O.S. Popov

SMART ANTENNA FOR MOBILE TELECOMMUNICATION SYSTEMS

Abstract. These original results of research and development electromagnetic characteristics of the antenna for mobile telecommunications systems by using multi-antenna array. The solution to this problem is based on the construction of conformal A.A. vsepolyaryzatsiynomy broadband antenna elements and the use of digital control that allows you to programmatically change modes and parameters A.A. radiation pattern. However, the developed A.A. allows complete information about the structure of the electromagnetic field, expanding the potential for management AR electromagnetic characteristics, including polarization.

Keywords: antenna array, chart focus, amplitude, space, adaptation, scan.

Мета статті

Дослідження можливостей підвищення енергетичного потенціалу радіоліній, а також потенційної пропускної спроможності радіоканалу за рахунок повноцінного використання векторних просторово-часових властивостей електромагнітного поля та урахуванні їх при проектуванні антенної системи для базових станцій мобільного зв'язку у вигляді багатопроменевої адаптивної антенної решітки з керованою поляризацією випромінювання.

Постановка задачі.

1. Огляд сучасного рівня в області проектування антенних решіток.
2. Застосування антенних решіток в системах мобільного зв'язку.
3. Принцип побудови цифрових антенних решіток.
4. Методи формування та управління спрямованими властивостями
5. антенних решіток.
6. Конструкція антенної решітки.

Створення нових та вдосконалення існуючих систем мобільного зв'язку завжди переслідує своєю метою поліпшення тих чи інших системних характеристик. Основна увага на даний час приділяється питанням збільшення якісних і кількісних показників, що пов'язано з повноцінним використанням радіочастотного ресурсу, підвищенням енергетичного потенціалу радіоліній при дотриманні існуючих норм електромагнітної сумісності та електромагнітної екології. Все це досягається за рахунок просторово-часової (просторово-поляризаційної) обробки сигналів, що можливо реалізувати тільки за рахунок використання відповідних антенних решіток (АР).

На даний час АР знаходять застосування в різних радіосистемах, наприклад, в якості антенних систем базових станцій мобільного зв'язку або приймально-передавальних антен, розташованих на борту ШСЗ, у супутникових системах зв'язку і т.д. Застосування АР дозволяє досягти більшої функціональності системи і може використовуватися як

1. фазована антенна решітка (ФАР) для формування діаграми спрямованості (ДС) необхідної форми, в першу чергу з максимумом випромінювання в відповідному напрямку;
2. скануюча АР для динамічного управління формою та параметрами ДС;
3. багатопроменева АР для просторового (просторово-поляризаційного) ущільнення (поділу) каналів.

Конкретизуючи перераховані типи АР стосовно до тих чи інших радіотехнічних систем, слід зазначити, що на початковому етапі впровадження АР вирішувалися вузькоспеціалізовані завдання, що характерні для тієї чи іншої радіосистеми. Однак подальший розвиток цих систем вимагає, в тому числі багатofункціональності АР, що використовуються в їх складі. Коротко розглянемо основні типи антенних систем і досягнути ними характеристики стосовно до різних систем мобільного зв'язку.

В приймальних АР з цифровим діаграмо-утворенням використовують перетворення прийнятого

аналогового сигналу в цифрову форму з подальшою його обробкою. При цьому реалізуються такі основні переваги :

4. можливість формування багатопроменив ДС і гнучкого управління її формою;
5. можливість застосування широкого спектру алгоритмів цифрової обробки;
6. велика ступінь свободи у виборі форми і положення променів ДС за рахунок програмного керування ваговими коефіцієнтами;
7. наявність можливості найбільш повно використовувати всю інформацію, видобуту з амплітудно-фазового розподілу в розкритті АР;
8. можливість виділення окремих променів користувачам або локально зосередженим групами користувачів;
9. адаптивне зміна форми ДС з можливістю зміни алгоритмів адаптації;
10. можливість здійснення цифрового калібрування параметрів АР;
11. наявність можливості віддаленого реконфігурування та управління АР.

Таким чином, можна узагальнити вищесказане в рамках представлення про виконання антенними системами різних функцій і говорити про АР з цифровим діаграмо-утворенням або про цифрових АР (ЦАР) як про потенційно багатофункціональних антенних системах.

Прикладом реалізації ЦАР може служити АР для системи супутникової навігації, описана в [1]. Плоска АР, складена з друкованих випромінювачів, показала можливості з управління променем ДН в діапазоні кутів $\varphi = -180 \dots 180$ град. і $\theta = 0 \dots 60$ град., зберігаючи рівень бічного випромінювання не більше -25 дБ. При цьому поляризація випромінюваного поля АР задавалася круговою, для чого в схемі збудження використовувалися гібридні мости. На додаток до сказаного була продемонстрована можливість формування нулів в ДС з глибиною більш -45 дБ.

Ще одним прикладом ЦАР може служити супутникова багатопроменива антенна решітка рухомого зв'язку. У антенна система здатна сформувати 16 променів і складається з 16 елементів у вигляді кільцевих друкованих випромінювачів, що працюють на частоті 1,542 ГГц з лівосторонньої круговою поляризацією. Дана ЦАР використовувалася в дослідницьких цілях і реалізовувала найпростіший алгоритм перемикання між променями згідно величиною сигналу, забезпечуваного кожним з променів.

До справжнього моменту розроблено велику кількість різноманітних методів і алгоритмів цифрового управління ДС АР. Існують також і проміжні варіанти реалізації АР з цифровим управлінням. Поряд з цифровими електронно-керованими фазообертачами, які в цілому не змінюють суті побудови ФАР, великий інтерес приділяється просторово перемикаємим АР з відокремленими елементами (SMILE) [2]. У даному підході, на відміну від звичайного підходу до цифрового діаграмо-утворення, використовується всього один радіочастотний тракт, до якого по черзі підключаються антенні елементи. Оскільки даний підхід є окремою реалізацією більш загального методу цифрового діаграмо-утворення (ЦДУ), далі основну увагу приділено класичній реалізації ЦДУ.

На рис. 1. зображена структурна схема приймальної ЦАР. На елементах 1 наводяться відповідні ЕРС, які у вигляді входних сигналів надходять на малошумні підсилювачі 2 (МШУ). Слідом за цим у змішувачах 3 відбувається перетворення за частотою кожного сигналу, для чого на нього також подається сигнал гетеродина частотою f_r . Фільтри проміжної частоти 4 формують спектральну структуру сигналу, що підсилюється в підсилювачі проміжної частоти (ППЧ) 5. Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) 6 робить переклад сигналу в цифровий код. Основний блок цифрової діаграмо-утворюючої схеми (ЦДУС) 7, який є швидкодіючим обчислювачем, робить цифрову обробку сигналу з формуванням необхідних властивостей АР і виділенням цікавлять параметрів прийнятого сигналу.

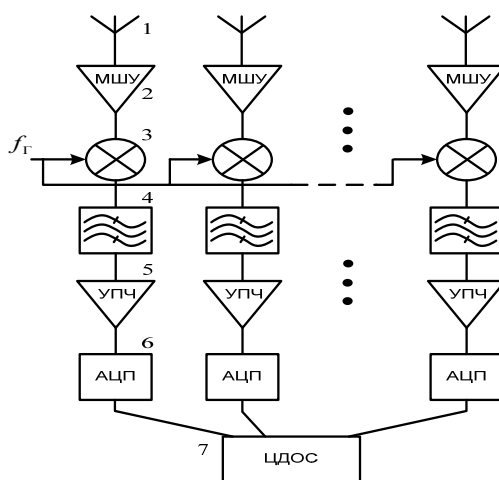


Рис. 1. Структура приймальної АР з ЦДУ

Завдання визначення способу та параметрів збудження елементів антенних решіток (АР) є

невід'ємною частиною процесу їх розробки. Характер розподілу збуджуєчих дій визначає основні властивості АР та її функціональні можливості.

Створення амплітудно-фазового розподілу в елементах АР та управління цим розподілом забезпечується відповідною діаграмо-утворюючої схемою (ДУС). В цілому розрізняють два види методу побудови ДУС: ДУС оптичного типу і ДУС на основі закритих ліній передачі. Використовуваний варіант ДУС в значній мірі визначає ефективність АР, а, крім того, можливості ДУС грають вирішальне значення в забезпеченні різних видів роботи АР і вирішення окремих завдань, тобто визначає функціональність АР. Сучасні АР можуть виконувати наступні основні функції:

12. формування діаграми спрямованості (ДС) заданої або спеціальної форми;
13. сканування променем ДС;
14. багатопроменевий ДС;
15. адаптація параметрів ДС по різних критеріях.

Формування ДС заданої або спеціальної форми здійснюється за допомогою так званих фазованих антенних решіток (ФАР). Форми, розміри і конструкції сучасних ФАР дуже різноманітні; їх різноманітність визначається як типом використовуваних випромінювачів, так і характером їх розташування. Для формування променя заданої форми до складу ФАР входять атенюатори та фазообертачі, що дозволяють сформувати заданий амплітудно-фазовий розподіл поля в апертурі антени.

Розрізняють три способи формування режиму сканування в АР: фазовий, амплітудний та частотний. Традиційною схемою побудови є ДУС, що містить в своєму складі модулі НВЧ з керованим підсилювачем і фазообертачем, сполучені з кожним з елементів АР — об'єднання фазового і амплітудного методів. Безумовно, така АР не може вважатися оптимальною в сенсі побудови системи живлення, вартості, маси і габаритних розмірів. У зв'язку з цим отримали розвиток декілька спеціальних підходів до побудови ДУС.

На рис. 2. зображена структурна схема АР для частотного сканування простору з послідовним збудженням. Основу роботи ДУС даного типу складає розподільна лінія. При цьому фазовий набіг в лінії формує необхідний фазовий розподіл в елементах АР, яке приводить до формування променя з максимумом в певному напрямі. При зміні частоти відбувається відповідна зміна різниці фаз збудження елементів АР, що викликає відхилення променя ДС. Таким чином, шляхом зміни частоти збудження проводиться сканування сектора простору. Даний підхід володіє істотними обмеженнями. Форма ДС змінюється при скануванні і тим більше, чим більше кутовий розмір області сканування.

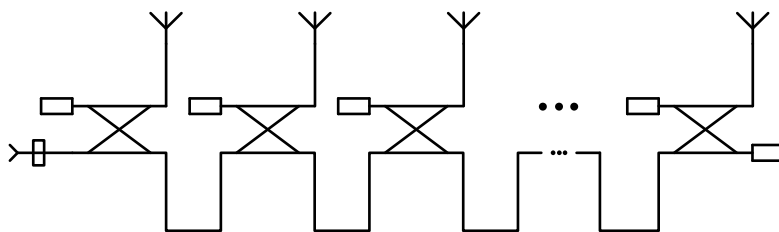


Рис. 2. Структурна схема АР з частотним скануванням

Альтернативою частотному скануванню є амплітудний метод, реалізований на основі комутації відповідних каналів збудження і найбільш широко поширений при побудові багатопроменевих АР. На рис. 3 показана ДУС послідовного типу (матриця Бласа). Дана схема дозволяє сформувати 4 променя ДС при відповідній подачі сигналу на один з 4-х входів АР. До переваг даної схеми слід віднести простоту, а також можливість формування ДС з будь-яким числом елементів АР. Серед недоліків слід зазначити велике число направлених відгалужувачів і поглинання великої частини потужності в узгоджених навантаженнях. Крім того, необхідні додаткові заходи, що зменшують ефект зниження ККД АР за рахунок відгалуження в лінії інших променів.

Іншим варіантом побудови ДУС є використання паралельної схеми (матриця Батлера).

До переваг даної ДУС можна віднести відсутність поглинаючих елементів в її складі, що в порівнянні з послідовною ДУС дозволяє підвищити ефективність АР в цілому [2, 26, 28]. Крім цього, точність амплітудного і фазового розподілу, що визначається якістю гібридних мостів і фіксованих фазообертачів, вище, ніж для ДУС послідовного типу. Крім того, кількість елементів в схемі набагато менша, ніж для матриці Бласа. З другого боку даної ДУС властиві і ряд недоліків. Так, зміна частоти може приводити до зсуву променів ДС. Дана ДУС володіє більшою складністю, що виявляється найсильніше при великому числі випромінювачів або при необхідності використання випромінювачів, число яких відмінно від 2^n , де n — ціле число.

Здійснення режиму сканування на основі таких ДУС можливо шляхом послідовної комутації відповідних входів, що приводить в результаті до дискретного зсуву променя ДС в заданому напрямі.

Узагальнюючи вищесказане відносно ДУС, можна зробити висновок про те, що для формування багатопроменевого режиму, а також для здійснення сканування розроблені спеціалізовані ДУС. У таких ДУС не реалізуються такі властивості як формування ДС спеціального вигляду, адаптивної зміни форми ДС. Крім того, більшість підходів формування багатопроменевої ДС і сканування, що застосовуються сьогодні, володіють високим рівнем складності при спробі здійснити сканування в ортогональних площинах. Крім

того, слід окремо відзначити необхідність застосування додаткових мерів для здійснення роботи в широкій смузі частот, що говорить про те, що використання описаних ДУС не завжди можливо в радіосистемах, що працюють з широкосмуговими сигналами.

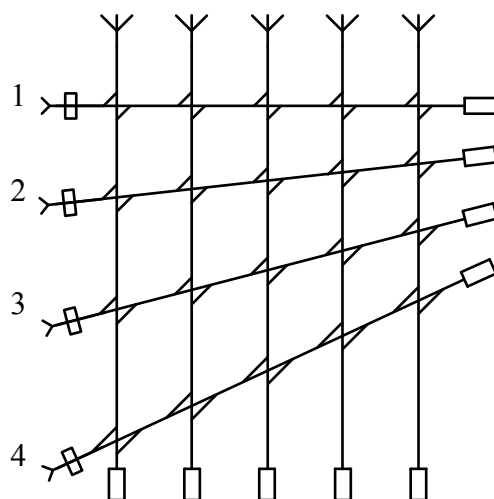


Рис. 3. АР з ДУС послідовного типу (матриця Бласа)

В цілому можна виділити два базові напрями при реалізації ДУС в цифровому вигляді: часова ДУС і комплексна ДУС. При розгляді часової ДУС приймемо наступні позначення: хай n -й елемент АР приймає сигнал, що описується функцією $f(t - \tau_n)$, де τ_n — часове запізнювання сигналу на n -ом елементі АР. Для вирівнювання часового зміщення сигналу застосовуються лінії затримки з регульованим часом запізнювання. Після цього відбувається підсумовування сигналів від елементів. Спрощена схема часова ДУС показана на рис. 4.

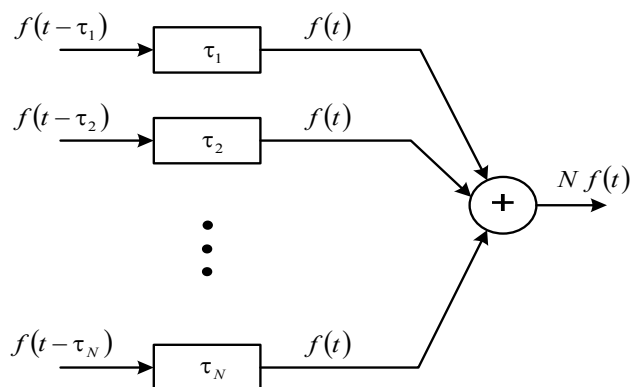


Рис. 4. Схема часової ДУС

Для розгляду принципу роботи комплексною ДУС зручніше використовувати вузькосмуговий сигнал, який заздалегідь представляється в комплексному вигляді

$$f(t, p_n) = \text{Re} \left\{ \dot{F}(t) e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{p}_n)} \right\},$$

де $\dot{F}(t)$ — що комплексна огиає сигналу; ω — кругова частота; \vec{k} — вектор хвильового числа; \vec{p}_n — вектор координат антенних елементів.

Представлення сигналу у вигляді (1.1) засноване на припущенні про те, що на приймальну антенну решітку падає плоска хвиля, напрям розповсюдження якої характеризується кутами θ і φ локальної сферичної системи координат, пов'язаної з АР. Тоді вектор хвильового числа може бути записаний в наступному вигляді:

$$\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \begin{bmatrix} \sin(\theta)\cos(\varphi) \\ \sin(\theta)\sin(\varphi) \\ \cos(\theta) \end{bmatrix}.$$

Вектор координат антенних елементів представляється у вигляді:

$$\vec{p}_n = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix},$$

де x_n, y_n, z_n — декартові координати n -го випромінювача.

При записі (2.1) вважається, що ширина спектру сигналу, що приходить на АР достатньо мала, а тому варіації фази на довжині полотна АР, що властиві тільки несучому коливанню і низькочастотної огинаючої можуть не прийматися до розгляду. Для виконання цієї умови сигнал повинен мати ширину спектру B_f , що задовольняє наступній умові:

$$B_f \Delta T_{\max} \ll 1,$$

де ΔT_{\max} — максимальний час розповсюдження між двома будь-якими елементами АР.

Співвідношення $\vec{k} \vec{p}_n$ визначає часове запізнювання сигналу на окремих елементах, а наявність його в показнику ступеня експоненти в (2.1) показує відповідність цього часового запізнювання еквівалентному фазовому зрушенню сигналу, який характеризується експоненціальним співмножником:

$$e^{-j\vec{k} \vec{p}_n} = e^{-j\omega\tau_n}.$$

Отже, введенням комплексних фазових зрушень можна добиватися часового вирівнювання сигналів окремих елементів з метою їх ефективного підсумовування. У зв'язку з сказаним можна припустити, що цифрова схема, що реалізована домноженням на комплексний співмножник $e^{-j\omega\tau_n}$ може бути реалізована в тому ж вигляді, в якому представлена схема часова ДУС на рис. 2.4 тільки прямокутники міститимуть не операцію часового зрушення, а математичну операцію множення на комплексне число. Тут слід особливо відзначити, що обробка сигналів з виходу антенних елементів полягає не тільки в часовому вирівнюванні, а також в амплітудному зважуванні. Унаслідок чого при реалізації комплексної цифрової ДУС математичні операції є множенням на відповідні вагові коефіцієнти:

$$\dot{W}_n = W_n e^{j\omega\tau_n}$$

Структурна схема цифрової ДУС, що виконує дане перетворення показана на рис. 5

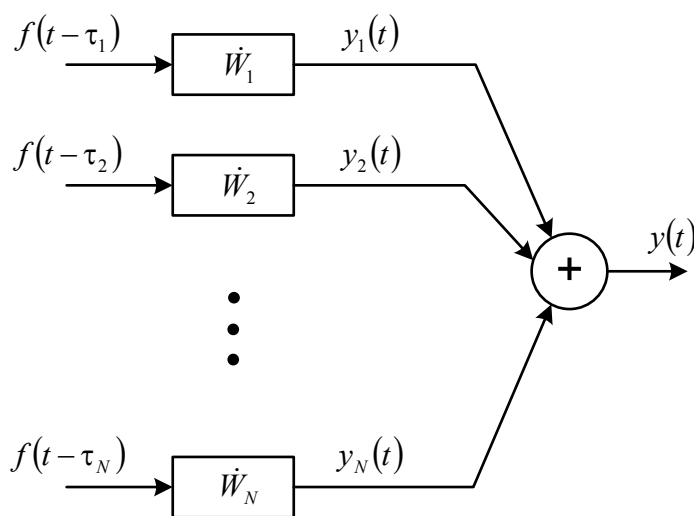


Рис. 5. Схема комплексної ДУС

Геометричні параметри АР відповідають параметрам, що розраховані в цій статті, для випадку формування головної пелюстки діаграми спрямованості (ДС) шириною 10° в секторі кутів $\pm 60^\circ$. На рис. 1.1 зображена спрощена конструкція АР.

Радіус АР вибраний рівним $R_{AD} = 3,1\lambda_{\text{н\delta}}$, де λ_{cp} — довжина хвилі, що відповідна середній частоті робочого діапазону (925 МГц). При цьому слід зазначити, що при використанні алгоритму оптимізації амплітудного розподілу в елементах АР використовувалася узагальнена теорема перемножування. Крім того, елементи, рівень поля яких в заданому напрямі був нижче певного порогу, який підбирався у кожному конкретному випадку, навантажувалися на узгоджені навантаження і не збуджувалися. Були досліджені 2 АР: з 14 елементами (відстань між елементами $d_e = 0,75\lambda_{\text{н\delta}}$) і з 20 елементами (відстань між елементами $d_e = 0,51\lambda_{\text{н\delta}}$).

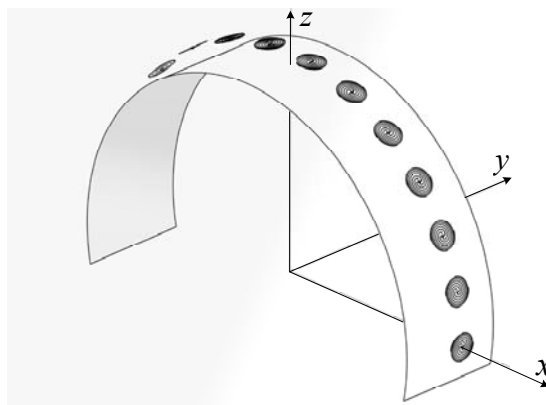


Рис. 6. Конструкція дугової АР

Висновки

Розвиток систем мобільного зв'язку, розширення їх функціональних можливостей відбувається за рахунок застосування багатфункціональних антенних решіток (АР), що суміщають в собі функції ФАР, скануючій і багатопроменовий режим роботи АР. Виконання цих функцій, таких як сканування і формування багатопроменової ДС в широкому секторі кутів можливо при виконанні АР на криволінійній поверхні (у вигляді конформної АР). Формування поля випромінювання довільної поляризаційної структури або навіть управління поляризацією випромінювання можливо за рахунок поляризаційних властивостей елементу АР.

Проведено комп'ютерне моделювання багатоцільовий АР. Показано, що дугова АР радіусом 1,07 м ($R_{AD} = 3,1\lambda_{n0}$) з 14 і 20 елементами здатна формувати вузьку головну пелюстку ДС в секторі кутів сканування $\pm 60^\circ$ при збереженні ширини ДС в межах $12,6^\circ \dots 14^\circ$ для всього робочого діапазону частот.

Запропонований метод управління амплітудами струмів збудження дозволив отримати малий рівень бічного випромінювання, що не перевищує $-11,5$ дБ, та високу ступінь узгодження елементів в АР, що підтверджується рівнем КСХ в лініях передачі не більше 1,75.

Література

1. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневыский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
2. 900 MHz Sectorized Antenna Array with three 120° Sectorial Antennas [Электронный ресурс]. – Режим доступа к статье: <http://www.l-com.com/productfamily.aspx?id=6418>
3. Слюсар В.И. Фазированная антенная решетка Thuraya / В.И. Слюсар // Сети и телекоммуникации. – 2002. – №5(24). – С. 54 – 58.
4. Проценко М.Б. Дуговая антенная решетка для систем подвижной радиосвязи третьего поколения / М.Б. Проценко, С.В. Нестерук, М.С. Токар, Е.А. Барабаш // Мат. 3-й междунар. молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2007»», Севастополь, 16-21 апреля 2007. – Севастополь, 2007 – С. 121.
5. Нестерук С.В. Сравнительный анализ методов формирования оптимальных диаграмм направленности антенными решетками / С.В. Нестерук, В.С. Семов // Мат. 2-й междунар. молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2006»», Севастополь, 12-16 апреля 2006. – Севастополь, 2006 – С. 94.

References

1. Shyrokopolosnye besprovodnyye sety peredachy ynformatsyy / V.M. Vyshnevskiy, A.Y. Liakhov, S.L. Portnoi, Y.V. Shakhnovych. – М.: Tekhnosfera, 2005. – 592 s.
2. 900 MHz Sectorized Antenna Array with three 120° Sectorial Antennas [Электронный ресурс]. – Rezhyim dostupa k state: <http://www.l-com.com/productfamily.aspx?id=6418>
3. Sliusar V.Y. Fazirovannaya antennaia reshetka Thuraya / V.Y. Sliusar // Sety y telekommunikatsyy. – 2002. – №5(24). – S. 54 – 58.
4. Protsenko M.B. Duhovaia antennaia reshetka dlia system podvyzhnoi radyosv'язy tret'ego pokoleniya / M.B. Protsenko, S.V. Nesteruk, M.S. Tokar, E.A. Barabash // Mat. 3-i mezhdunar. molodezhnoi nauchno-tekhnycheskoi konferentsyy «Sovremennye problemy radyotekhniki y telekommunikatsyi «RT-2007»», Sevastopol, 16-21 apreliia 2007. – Sevastopol, 2007 – S. 121.
5. Nesteruk S.V. Sravnytelnyi analiz metodov formyrovaniia optymalnykh dyahramm napravlennosti antennoy reshetkamy / S.V. Nesteruk, V.S. Semov // Mat. 2-i mezhdunar. molodezhnoi nauchno-tekhnycheskoi konferentsyy «Sovremennye problemy radyotekhniki y telekommunikatsyi «RT-2006»», Sevastopol, 12-16 apreliia 2006. – Sevastopol, 2006 – S. 94.

Рецензія/Peer review : 21.9.2016 р.

Надрукована/Printed : 9.11.2016 р.

Стаття рецензована редакційною колегією