

УДК 621.396.67

М.К. Бороздін

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка, Полтава

АНАЛІЗ ВИМОГ, ЩО ПРЕД'ЯВЛЯЮТЬСЯ ДО ПАРАМЕТРІВ АНТЕН З НЕЗАЛЕЖНИМИ ДІАГРАМАМИ СПРЯМОВАНОСТІ

У статті досліджуються вимоги до параметрів антенних решіток з високим коефіцієнтом спрямованої дії в широкому діапазоні і діаграми спрямованості з невеликим рівнем бічних пелюстків, застосування яких забезпечить високу перешкодозахищеність прийому. Пропонується принцип побудови подібних антен, які забезпечують можливість електричного керування променями й одночасним формуванням віяла незалежних діаграм спрямованості.

Ключові слова: фазування антенних решіток, адаптація, діаграма спрямованості.

Вступ

На сучасному етапі розвитку радіоцентрів використовують багатофункціональні антенні системи з незалежними електрично-керованими діаграмами, які досить перспективні для прийомних радіоцентрів. Подібні антени мають практично некеровані діаграми спрямованості, низький коефіцієнт спрямованої дії під малими кутами й вимагають від реалізації рознесеного прийому більших площ.

З метою високої перешкодозахищеності прийому, антена повинна мати високий коефіцієнт спрямованої дії з невеликим рівнем бічних пелюстків, а також повинна забезпечити прийом сигналів у секторі кутів місця від 5° до $20 - 25^\circ$, відповідним кутам приходу радіохвиль при дальності зв'язку понад дві тисячі кілометрів [1, 2, 4]. Повинна бути забезпечена можливість електричного керування променями й одночасним формуванням віяла незалежних діаграм спрямованості, що перекидає необхідний сектор за кутом місця й азимутом, і пересічних приблизно на рівні половинної потужності.

Метою статті є розгляд вимог створення високоефективних фазоутворюючих антенних решіток, що мають високий коефіцієнт направленої дії в широкому діапазоні, для забезпечення високої перешкодозахищеності прийому.

Основний матеріал

Актуальним питанням є створення високоефективних фазоутворюючих антенних решіток, що мають високий коефіцієнт направленої дії в широкому діапазоні під різними кутами.

До параметрів подібних антен пред'являються наступні основні вимоги:

1. З метою високої перешкодозахищеності прийому, антена повинна мати високий коефіцієнт спрямованої дії й діаграми спрямованості з невеликим рівнем бічних пелюстків.

Внаслідок адаптації амплітудно-фазовий розподіл на поверхні фазоутворюючих антенних решіток змінюється в такий спосіб, щоб істотно послаби-

ти прийом з напрямків джерел перешкод шляхом утворення нулів і провалів діаграми спрямованості, зберігаючи при цьому достатній рівень корисного сигналу в напрямку головного пелюстка діаграми спрямованості [1].

Звичайно при адаптації в кожному каналі змінюються коефіцієнти підсилення й зрушення фаз (амплітудно-фазова адаптація) або тільки зрушення фаз (фазова адаптація). При амплітудно-фазовій адаптації кожен канал розщеплюється на два квадратурних (зі зрушенням фаз на $\pi/2$) і в кожному підканалі вмикається електрично-керований підсилювач із коефіцієнтом підсилення, що змінюється від -1 до +1. У такий спосіб можна міняти амплітуду сигналу від 0 до $\sqrt{2}$ і фазу від 0 до $\pi/2$. При фазовій адаптації в кожному каналі застосовується керований фазообертач. Адаптивні антенні решітки можна сконструювати таким чином, щоб вони крім автоматичного придушення перешкод у просторовій і частотній областях, по поляризації могли виконувати самофокусування в напрямку прийнятого сигналу і перевипромінювати у зворотному напрямку.

Адаптивні антенні решітки представляють сукупність антенних елементів і адаптивного пристрою прийнятих сигналів. Пристрій обробки здійснює вибір сигналів на виході елементів антенних решіток, потім автоматичне регулювання вагових коефіцієнтів елементів сигналу з метою максимізації відношення сигнал/шум, або мінімізації сигналу помилки, обумовленою різницею вихідного сигналу решіток й опорного сигналу, який створюється допоміжними генераторами.

Регулювання вагових коефіцієнтів виробляється за допомогою спеціальних пристроїв, що зважають, утримуючі фазообертачі й підсилювачі, керовані адаптивним процесором, або окремими ланцюгами зворотного зв'язку.

Пристрої, що зважають, періодично змінюють амплітуди й фази сигналів на виходах елементів антенних решіток. Адаптивне керування ваговими

коефіцієнтами здійснюється, виходячи з кореляційних зв'язків сигналів, прийнятих від різних елементів решітки, тобто на основі використання взаємкореляційної матриці набору вхідних сигналів системи. Виробіток адаптивних вагових коефіцієнтів може бути здійснений різними способами. Один із цих способів полягає в застосуванні адаптивної петлі зворотного зв'язку. Інший спосіб заснований на розрахунку вагових коефіцієнтів із застосуванням кореляційної матриці [1, 3].

Класично адаптивні антенні решітки засновані на підсумовуванні зважених сигналів з виходів N елементів антенних решіток. Корисний сигнал у кожному каналі представлений величиною, пропорційно комплексним числом S_k й дорівнює $b S_k$, де визначає рівень і тимчасову зміну сигналу. Так, у лінійних еквідистанційних антенних решітках:

$$S_k = \exp \left[-i \frac{2l}{\lambda} d(k-1) \sin \theta_0 \right], \quad (1)$$

де θ_0 – напрямлення приходу корисного сигналу. Кожний з каналів містить також шумову складову E_k , обумовлену шумами приймача й просторовим розподілом джерел перешкод. Проблема полягає в тому, щоб вибрати також вагові коефіцієнти, при яких забезпечується максимальне відношення сигнал/шум на виході адаптивної системи.

У теорії адаптивних антенних решіток перебувають оптимальні ваги згідно виразу:

$$W = \mu M^{-1} S^*, \quad (2)$$

де μ – довільна постійна, що має розмірність потужності;

M – кореляційна матриця вектора напруг і шумів на виході елементів антенної решітки: $M = E^* E^T$;

W ; S ; E – матриці-стовпці ваг сигналів і шумів відповідно (знак * означає комплексне сполучення, а знак T – транспонування).

Таким чином, функціональна схема повинна містити загальний для всіх каналів блок у якому здійснюється обчислення кореляційної матриці, і її обіг і перемножування з матрицею сигналу. Кожний із блоків зважування управляється цим загальним блоком індивідуально.

Іншим варіантом адаптивної антенної решітки є система із придушенням бічних пелюстків. Вона містить основну антену з більшим підсиленням, спрямовану на корисний сигнал. Підсилення кожної з допоміжних антен розраховано так, щоб повторювати середній рівень бічних пелюстків діаграми спрямованості основної антени. Величина корисного сигналу прийнятого допоміжними антенами, дуже мала за порівнянням з рівнем сигналу в основному каналі. Отже, призначення допоміжних антен полягає в створенні копій сигналу, що заважає, у бічних пелюстках основної діаграми спрямованості

з метою їхнього придушення.

Корисний сигнал присутній практично лише в каналі основної антени, його можна представити у вигляді матриці-стовпця t , перший елемент якої дорівнює i , а інші – 0 . Вагові коефіцієнти знаходяться у цьому випадку відповідно за законом керування [5]:

$$\omega_1 = \mu M_1^{-1} T. \quad (3)$$

У результаті на виході адаптивних решіток забезпечується максимальне відношення сигнал/шум у каналі основних антен. Сигнал від кожного елемента проходить пристрої, що зважують. Потім сигнали із всіх каналів додаються, створюючи вихідний сигнал:

$$Y = \sum_{i=1} x_i w_i = XW^T. \quad (4)$$

Щоб зробити адаптивні решітки, Y порівнюють із опорним сигналом Y_0 , або сигнал помилка $E(t)$ подається на вхід системи зворотного зв'язку, що регулює комплексні ваги щ. Регулювання вагових коефіцієнтів системою зворотного зв'язку здійснюється таким чином, щоб зменшити основні вимоги:

$$\vec{E}^2(t) = \left[\vec{Y} - Y_0 \right]^2 = Y_0^2 - 2W^T X Y_0 + W^T R_{xx} W, \quad (5)$$

де $R_{xx} = [x_i x_k]$ кореляційна матриця вектора прийнятих сигналів. При цьому вхідний сигнал Y наближається, настільки це можливо, по середньоквадратичному критерію до необхідного сигналу Y_0 . Отже, будь-який прийнятий сигнал, не представлений у вигляді Y_0 , сприймається як сигнал помилки, і система зворотного зв'язку регулює ваги так, щоб усунути його у вихідному сигналі. У результаті в напрямку приходу цього сигналу встановлюється 0 діаграми спрямованості антени. Якщо ж прийнятий сигнал представлений в Y_0 , система зворотного зв'язку зберігає його у вихідному сигналі з такою ж амплітудою й фазою, як і в Y_0 . Таким чином, за допомогою опорного сигналу можна розрізняти корисні й шкідливі сигнали.

Очевидно, що мінімум середньоквадратичної помилки буде досягнутий при векторі W_{opt} , коли:

$$\vec{\partial} E^2 = \frac{dE^2}{dW_{opt}} = 2R_{xx} W - 2X Y_0 = 0, \quad (6)$$

звідки

$$W_{opt} = R_{xx}^{-1} X Y_0. \quad (7)$$

На відміну від існуючих, при таких вагових коефіцієнтах адаптивні антенні решітки забезпечують оптимальну фільтрацію [5]. Реалізувати завдання оптимізації ваг можна різними шляхами, наприклад за допомогою різновиду градієнтного алгоритму.

2. Антена повинна забезпечити прийом сигналів у секторі кутів місця від 5° до $20-25^\circ$, відповід-

ним кутам приходу радіохвиль при дальності зв'язку понад дві тисячі кілометрів [4].

Для одержання малих кутів притиснення променя до обрїю (до 5°) при забезпеченні простоти конструкції всієї системи доцільно використовувати горизонтальне розташування вертикальних несиметричних вібраторів з випромінюванням близьких до осьового. Незважаючи на те, що довжина горизонтальної антени повинна бути досить велика (приблизно 1-2 км), її конструкція буде набагато простіша й менш громіздка в порівнянні із системою розвинутої у висоту.

Для реалізації побудови горизонтальних антенних систем, що забезпечують прийом сигналів від 5° до $20-25^\circ$ варто покласти лінійні антенні решітки. Така лінійка вібраторів при випромінюванні, близькому до осьового має порівняно слабо-залежну від довжини хвилі ширину променя й відрізняється високою стійкістю параметрів стосовно відмов складових її випромінювачів.

3. Повинна бути забезпечена робота при будь-яких азимутах сигналів які надходять.

На даному етапі для виконання цієї вимоги, що забезпечує ефективну роботу при будь-яких азимутах сигналів які надходять у всьому секторі $0-360^\circ$ доцільно мати систему, яка складається із трьох лінійних горизонтальних ґрат, що перетинаються по кутах 60° . При цьому кожна лінійка працює в секторах азимутальних кутів: $\pm 30^\circ$ і $180^\circ \pm 30^\circ$. При використанні двомірних решіток значно б зріс коефіцієнт спрямованої дії за рахунок підвищення спрямованості у двох площинах, але це було б пов'язане з істотним ускладненням системи в цілому.

4. Повинна бути забезпечена можливість електричного керування променями й одночасним формуванням віяла незалежних діаграм направленості, що перекриває необхідний сектор за кутом місця й азимутом, і пересічних приблизно на рівні половинної потужності. Для керування променем можуть бути використані, як фазові системи, так і метод тимчасового керування, при якому забезпечуються необхідні тимчасові затримки сигналів у всіх антенних елементах.

Тимчасове керування променем має дві істотні переваги перед фазовим: антена стає принципово широкодіапазонною й спрощується програма керування променем. Основний недолік тимчасової системи (її складність) знімається при використанні подвійного дискретного поверхового методу фазування.

Відповідно до цього методу система керування променем складається з декількох поверхів чи рівнів, на прикладі 24-елементних решіток. У кожному поверсі (I, II, III) встановлюються пристрої зі змінною тимчасовою затримкою (пристрій тимчасової затримки), який об'єднує невелике число елементів. Число положень пристроїв тимчасової затримки в першому поверсі робиться мінімальним тому, що ширина променя

групи елементів, які об'єднані таким пристроєм затримки, невелика. Зі збільшенням номера поверху пристрою часової затримки ускладнюються, але лише в самому останньому поверсі, де є тільки один пристрій часової затримки. Число положень часової затримки дорівнює необхідній кількості положень антени. При такій структурі системи фазування основна кількість пристроїв часової затримки визначається першими поверхами, де число положень променя невелике.

Для оптимізації окремого пристрою часової затримки, часова затримка в ньому змінюється по двійковому принципу: n - елементів затримки пристроїв тимчасової затримки при їхній комутації дають 2^n значень тимчасової затримки. Як елементи затримки доцільно використовувати відрізки високочастотного кабелю. При цьому виходить широкий діапазон частот при дуже малих внутрішніх відбиттях. Комутуючими елементами можуть бути реле, а при високій швидкості сканування променя використовуються діоди. Для трансформації опорів в антенних трактах і для додавання сигналів на виходах пристроїв тимчасової затримки використовуються широкострічкові трансформатори й гібридні пристрої з високою взаємною розв'язкою виходів, побудовані на основі мініатюрного автотрансформатора.

Розглянуті 24-вібраторні групи (секції) можуть бути використані при побудові антенних систем з часовим способом формування багатопроменевої діаграми спрямованості. На відміну від матричної схеми при часовій схемі положення променів залежить від частоти. Тому її необхідно використовувати в тих випадках, коли неприпустимо навіть невеликий зсув променів при переході із частоти на частоту [4].

Пропонується створення антени з часовим променем, що складається з восьми 24-вібраторних груп з розносом сусідніх вібраторів на 7,2 м. Фазування кожної секції виробляється трьома етапами. На першому етапі пристрій часової затримки забезпечує два положення променя, інші етапи - 16 положень. При цьому вісім положень променя перекривають азимутом $\pm 30^\circ$, інші вісім - $180^\circ \pm 30^\circ$. Сигнали від кожної секції фазуються на тимчасову схему променеутворювача, що формує шість променів. Таким чином, група із шести променів за допомогою системи фазування може переміщуватися в просторі перекриваючи кут місця від 5° до 50° . У тих випадках, коли припустимо невеликий зсув променів зі зміною частоти, доцільні антени з матричним формуванням променів, при використанні яких практично вся потужність сигналу, прийнятого з певного напрямку, передається відповідному виходу матриці [6].

Пропонується принцип побудови подібних антен на прикладі багатопромених решіток, що працює в секторі азимутальних кутів $\pm 30^\circ$ від її осі й у секторі кутів місця від 5° до 30° у діапазоні частот 5-25 МГц. Практично для забезпечення роботи ан-

тени в необхідному секторі необхідне формування не більше 16 незалежних променів. Схему антени доцільно будувати в такий спосіб. Антена розбивається на секції таких розмірів, щоб ширина діаграми спрямованості секції відповідала робочому сектору кутів місця. Для забезпечення необхідної діаграми спрямованості секції досить взяти приблизно 10 вібраторів, з фазуванням у напрямку близькому до осевого. Для зниження рівня бічних пелюстків діаграми спрямованості антени необхідно використовувати нерівно амплітудне живлення вібраторів секції, що доцільно реалізувати за допомогою несиметричних гібридних пристроїв з малими втратами.

З метою одержання високої спрямованості при кутах місця від 5° до 30° антена повинна містити 16 однакових секцій. Формування віяла незалежних променів здійснюється за допомогою матричної системи променеутворення, подібній до матриці Батлера. Відмінною рисою матриці є використання фазообертачів з фазовим зрушенням $\leq 90^\circ$, що розширює їхню смугу пропускання. Кожний із трьох повертів матриці містить трансформаторні гібридні суматори й фазообертачі. Кожному виходу відповідає своя величина, що утвориться в матриці зрушення фаз між струмами сусідніх випромінювачів, при якому, формується відповідна йому діаграма спрямованості (промінь). Підключення до кожного виходу приймача, можна багаторазово використовувати антену, реалізувати рознесений прийом.

Запропонований варіант лінійних решіток містить 160 вібраторів при загальній довжині 960 метрів. Коефіцієнт спрямованої дії досягає в максимумі 420 на частоті 24 МГц. При створенні єдиної багатofункціональної антенної системи великого прийомного радіоцентра на трасах від 500 до 10000 км, схема антени може бути вдосконалена. Із цією метою доцільно створити в антені кілька незалежних систем фазування, кожна з яких працює у своєму просторовому секторі. Для цього необхідно розгалузити сигнали з вібраторів на кілька окремих каналів

і потім у кожному каналі встановити свою систему фазування й променеутворення [1, 4].

Висновки

В роботі всебічно розглянуто основи вимоги щодо створення високоефективних фазоутворюючих антенних решіток, які мають високий коефіцієнт направленої дії в широкому діапазоні частот під різними кутами. Пропонується побудова подібних антен на прикладі багатопроменевих решіток, що працюють в секторі азимутальних кутів $\pm 30^\circ$ від її осі під сектори кутів місця від 5° до 30° у діапазоні частоти 5-20 МГц. Подібні антени забезпечують можливість електричного керування променями й одночасне формуванням віяла незалежних діаграм спрямованості, а також високу перешкодозахищеність прийому сигналу.

Список літератури

1. Самополнительные антенные решетки / Г.З. Айзенберг, Р.В. Гуревич, Э.И. Журбенко, Г.А. Клигер // М.: Радиотехника, 1973. – № 4. – С. 29-31.
2. Марков Г.Т., Чаплин А.Ф. Возбуждения электромагнитных волн. - М. -Л.- 1967.- 315 с.
3. Самуйлов И.Н. Излучения электрического диполя, размещенного вдоль оси проводящего цилиндра / И.Н. Самуйлов, Н.К. Бороздин // Техника средств связи. – Сер. ТРС, 1984. – С. 59-62.
4. Матрица импедансов и усиление линейной решетки широкополосных коротковолновых вибраторов / И.А. Добрынская, Н.П. Костенко, Б.В. Сосунов, Н.Г. Фитенко, Ю.И. Шестаков // Вопросы расчета и проектирования антенн и радиолиний. – 1982. – С. 121-124.
5. Сташкевич А.И. Алгоритм оптимизации весовых коэффициентов адаптивных антенных систем / А.И. Сташкевич, С.С. Шесняк // Вопросы расчета и проектирования антенн и радиолиний. – 1987. – С. 99-122.
6. Созонов Д.М. Матричная теория антенных решеток / Д.М. Созонов. – Рязань: РТИ, 1975. – 279 с.

Надійшла до редколегії 18.11.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., А.М. Селіверстов. Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка.

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К ПАРАМЕТРАМ АНТЕНН С НЕЗАВИСИМЫМИ ДИАГРАММАМИ НАПРАВЛЕННОСТИ

Н.К. Бороздин

В статье исследуются требования, предъявляемые к параметрам антенных решеток с высоким коэффициентом направленного действия в широком диапазоне и диаграммы направленности с небольшим уровнем боковых лепестков, применение которых обеспечит высокую помехозащищенность приема. Предлагается принцип построения подобных антенн, которые обеспечивают возможность электрического управления лучами и одновременным формированием веера независимых диаграмм направленности.

Ключевые слова: фазирование антенных решеток, адаптация, диаграмма направленности.

ANALYSIS OF REQUIREMENTS PRODUCED TO THE PARAMETERS OF AERIALS WITH THE INDEPENDENT DIAGRAMS OF ORIENTATION

N.K. Borozdin

The requirements produced to the parameters of aerial grates with the high coefficient of the directed action in a wide range and diagrams of orientation with the small level of lateral petals are explored in the article, application of which will provide high noise immunity of reception. Principle of construction of similar aerials which provide possibility of electric management by rays and simultaneous forming of fan of independent diagrams of orientation is offered.

Keywords: fazirovanie of arrays, adaptation, to the diagrama orientation.