

No. 13; заявитель i patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Kubanskiy gosudarstvennyy universitet" [Patent No. 2618046 Russian Federation, IPC G 01 R 25/00. Method for measuring the phase difference and the level ratio of two harmonic signals: No. 2016109376: decl. 15.03.2016: publ. 10.05.2017, Bull. No. 13; applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kuban State University"], 12 p.

30. *Korotkov K.S., Bol'shov A.V., Gaydenko I.V., Pozhidaev R.B., Serdyukov V.V.* Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №2022660602 Rossiyskaya Federatsiya. Programma dlya opredeleniya kompleksnogo koeffitsienta peredachi i otrazheniya SVCh-smesiteley metodom summy i raznosti: №2022619520: yayavl. 26.05.2022: opubl. 07.06.2022; pravoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Kubanskiy gosudarstvennyy universitet» (FGBOU VO «KubGU»). Zaregistrirovano v Reestre programm dlya EVM [Certificate of state registration of computer program No. 2022660602 Russian Federation. Program for determining the complex transmission and reflection coefficient of microwave mixers using the sum and difference method: No. 2022619520: declared 05/26/2022: published 06/07/2022; copyright holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kuban State University" (FGBOU VO "KubSU"). Registered in the Register of Computer].

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

Сердюков Владимир Владимирович – Кубанский государственный университет; e-mail: serdyukov-vladimir1996@mail.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: 89528524156; преподаватель.

Коротков Константин Станиславович – e-mail: korsar@phys.kubsu.ru; тел.: 89182513055; д.т.н.; профессор.

Голан Антон Васильевич – e-mail: blazepro17@gmail.com; тел.: 89528668695; студент.

Маньшина Александра Тарасовна – e-mail: eteriliro@mail.ru; тел.: 89183596321; студентка.

Калужная Софья Евгеньевна – e-mail: kaliuzhnaya.sophia.evgenyevna@gmail.com; тел.: 89676747515; студентка.

Serdyukov Vladimир Vladimirovich – Kuban State University; e-mail: serdyukov-vladimir1996@mail.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79528524156; teacher.

Korotkov Konstantin Stanislavovich – e-mail: korsar@phys.kubsu.ru; phone: +79182513055; dr. of eng. sc.; professor.

Golan Anton Vasil'evich – e-mail: blazepro17@gmail.com; phone: +79528668695; student.

Manshina Aleksandra Tarasovna – e-mail: eteriliro@mail.ru; phone: +79183596321; student.

Kaliuzhnaya Sof'ya Evgen'yevna – e-mail: kaliuzhnaya.sophia.evgenyevna@gmail.com; phone: +79676747515; student.

УДК 621.396.677

DOI 10.18522/2311-3103-2024-4-169-181

К.М. Занин, Д.Д. Габриэльян, Ю.В. Кузнецов, С.Е. Мищенко

ПРОФИЛИРОВАНИЕ РЕФЛЕКТОРА ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАННОГО КОНТУРА ГЛАВНОГО ЛЕПЕСТКА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ

При построении комплексов спутниковой связи требуется обеспечение заданного уровня коэффициента усиления бортовой антенны в строго определенной области покрытия и значительно более низкого уровня вне этой области. Граница области покрытия при этом может иметь сложную, но неизменную в течение всего периода эксплуатации форму. Для удовлетворения данных требований применяются, в том числе, зеркальные антенны с профилированным рефлектором, в которых закон профилирования поверхности описывается гладкими аналитическими функциями. Однако при формировании контурной диаграммы направленности с более сложной формой сечения главного лепестка требуемое фазовое распределение может иметь разрывы при переходе через период 2π , которые не могут быть аппроксимированы гладкими функциями без искажений.

В данном случае известные подходы к профилированию рефлекторов зеркальных антенн не позволяют синтезировать диаграмму направленности с заданным качеством. Целью работы являлось построение рефлектора зеркальной антенны с одиночным облучателем, обеспечивающей формирование диаграммы направленности с заданными параметрами. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: 1. Разработка алгоритма определения профиля рефлектора зеркальной антенны с учетом требуемой формы границы обслуживаемой территории и заданного закона распределения коэффициента усиления; 2. Проведение численных исследований по построению профиля рефлектора. В ходе проведенных исследований разработан алгоритм определения профиля рефлектора зеркальной антенны, который позволяет формировать на апертуре антенны распределение поля, соответствующее диаграмме направленности с требуемыми параметрами. Для этого выполнен расчет распределения поля на плоскости, и синтезирована поверхность рефлектора на основании результатов расчета. Проведенные численные исследования подтвердили возможность построения зеркальной антенны, обеспечивающей формирование диаграммы направленности с заданными параметрами.

Зеркальная антенна; амплитудно-фазовое распределение; контурная диаграмма направленности.

K.M. Zanin, D.D. Gabrielyan, Yu.V. Kuznetsov, S.E. Mishenko

SHAPING OF CONTOURED-BEAM ANTENNA MAIN LOBE BY PROFILING OF REFLECTOR ANTENNA

In satellite communication complexes, it is required to ensure a given level of the gain of the space antenna in a given serviced area. A lower level of gain beyond this area is also required. The boundary of the coverage area may have a complex shape that does not change during the operation of the communication system. To meet these requirements, reflector antennas with a profiled reflector are used. The law of profiling the reflector surface is described by smooth analytical functions. However, when forming a contour lobe with a more complex shape, the required phase distribution may have discontinuities during the transition through the period 2π . These gaps cannot be eliminated by smooth functions without distortion. In this case, the known approaches to profiling reflectors of reflector antennas do not allow obtaining a radiation pattern with a given quality. The goal of the work was constructing a reflector of a reflector antenna, which provides the formation of a radiation pattern with specified parameters. To achieve this goal, the following tasks have been solved: 1. Development of an algorithm for profiling the reflector of a reflector antenna, taking into account the shape of the boundary of the serviced area and taking into account the given law of distribution of the gain; 2. Conducting numerical simulations on the construction of the reflector profile. In the course of the research, an algorithm has been developed that allows you to obtain the reflector profile of a reflector antenna. This reflector antenna generates a field distribution at the aperture corresponding to the radiation pattern with the required parameters. To do this, the calculation of the field distribution on the plane was performed, and the surface of the reflector was synthesized based on the calculation results. Numerical simulations have confirmed the possibility of constructing a reflector antenna that forms a radiation pattern with specified parameters.

Reflector antenna; amplitude-phase distribution; contoured main lobe; radiation pattern.

Введение. В ряде случаев при построении комплексов спутниковой связи требуется обеспечение заданного коэффициента усиления (КУ) бортовой антенны в строго определенной области покрытия и значительно более низкого значения КУ вне этой области, при котором ресурсы радиоканала системы связи расходуются незначительно. Граница области покрытия при этом может иметь сложную, но неизменную в течение всего периода эксплуатации форму. Следствием этого является требование к реализации диаграммы направленности (ДН) с соответствующей формой сечения главного лепестка. Для удовлетворения данных требований наиболее широкое распространение получили четыре основных варианта построения антенных систем спутниковой связи: активные фазированные антенные решетки (АФАР), гибридно-зеркальные антенны (ГЗА), зеркальные антенны (ЗА) с плоским рефлектором и ЗА с профилированным рефлектором.

АФАР позволяют реализовать требуемую ДН за счет управления комплексным коэффициентом передачи в каждом канале. Данные антенные системы имеют возможность оперативно перестраивать ДН и формировать различные рабочие области покрытия проектируемой системы связи. Однако имеющиеся возможности АФАР могут быть невос-

требуемыми в задачах, в которых область покрытия остается неизменной. Для таких задач наиболее обоснованным с технической точки зрения решением является использование ЗА или ГЗА [1–4], а также ЗА с плоским рефлектором, покрытым слоем диэлектрика [5–7].

ГЗА позволяют реализовать ДН со сложным контуром границы рабочей области при меньшей сложности и стоимости антенной системы в сравнении с АФАР. Однако конструкция облучающей системы может оказаться достаточно громоздкой, что приводит к снижению энергетических характеристик антенны.

В свою очередь, ЗА с одиночным облучателем и плоским рефлектором имеют упрощенную конструкцию облучателя. Реализация требуемого фазового распределения на апертуре достигается путем покрытия рефлектора набором отражающих элементов, каждый из которых обеспечивает требуемый коэффициент отражения по фазе [8–10]. К недостаткам данного варианта построения антенны можно отнести сниженный срок службы из-за деградации параметров диэлектрической подложки отражающих элементов.

В работах [11–14] рассмотрены вопросы применения принципов адаптивной оптики для профилирования металлического рефлектора ЗА с одиночным облучателем. Профиль поверхности при этом обеспечивает формирование требуемой ДН за счет изменения длин электрических путей сигналов, распространяющихся от фазового центра облучателя ЗА до апертуры антенны. Полученный закон профилирования поверхности рефлектора описывается гладкими аналитическими функциями, например, полиномами Цернике. Однако применительно к формированию ДН с более сложной формой сечения главного лепестка распределение требуемых разностей длин путей, определяемых распределением фаз на апертуре (ФР), может иметь более сложный вид. Фазовое распределение может иметь разрывы при переходе через период 2π , которые не могут быть устранены с помощью алгоритмов развертывания фазы. В данном случае описанные подходы не позволяют синтезировать поверхность рефлектора ЗА, формирующей ДН с заданным качеством.

Таким образом, для систем связи, в которых требуется обеспечение заданного ее качества в строго определенной области покрытия со сложной, но неизменной формой границы актуальной является задача поиска технического решения по построению антенны, свободного от выше отмеченных недостатков.

Целью работы является построение рефлектора ЗА с одиночным облучателем, обеспечивающей формирование ДН с заданными параметрами.

Решаемые задачи:

1. Разработка алгоритма определения профиля рефлектора ЗА с учетом требуемой формы границы обслуживаемой территории и заданного закона распределения КУ;
2. Проведение численных исследований по построению требуемого профиля рефлектора.

1. Разработка алгоритма. Решение первой задачи настоящей работы выполнено путем разделения ее на следующие основные этапы:

- ♦ синтез амплитудно-фазового распределения поля (АФР) на плоскости апертуры ЗА и определение исходной формы рефлектора по его результатам;
- ♦ уточнение ФР на плоскости апертуры ЗА с учетом АФР, которое формируется облучателем;
- ♦ расчет формы рефлектора ЗА, которая реализует требуемое АФР на апертуре.

Данная последовательность этапов может быть обобщена блок-схемой, приведенной на рис. 1. Далее ее этапы рассмотрены более подробно.

Для пошагового контроля и наглядной демонстрации промежуточных результатов расчета при рассмотрении предлагаемого алгоритма его реализация проведена на примере ДН со сложной формой главного лепестка.



Рис. 1. Блок-схема предлагаемого алгоритма

В качестве исходных данных в настоящей работе были приняты следующие требования:

- ◆ задан рабочий сектор углов θ в сферической системе координат;
- ◆ установлен контур границы рабочей области ДН, например, показанный на рис. 2;
- ◆ задана ДН облучателя ЗА;
- ◆ установлены ограничения на максимальный размер апертуры и рабочая частота.

Синтез АФР, соответствующего требуемой ДН. На сегодняшний день наиболее распространены следующие методы синтеза АФР:

- ◆ метод парциальных диаграмм [15];
- ◆ метод синтеза антенн по заданной форме амплитудной ДН [16, 17];
- ◆ метод аппроксимационного синтеза [18] и др.

Приведенные методы хорошо себя показывают и широко применяются в многоканальных системах.

Для первого этапа синтеза применен упрощенный метод парциальных диаграмм. Данный метод позволяет синтезировать АФР с учетом координат расположения элементов, на которые делится апертура антенны, рабочей частоты и требуемой формы ДН. Расчет выполнен при равномерном шаге расположения элементов. Взаимное расположение парциальных лучей показано на рис. 3. Угловое расстояние между максимумами лучей выбрано равным половине ширины луча по уровню «нулей». Ширина таких лучей соответствует электрическим размерам апертуры антенны при условии равномерного возбуждения. Расчет выполнен в сферической системе координат. Для этого с учетом равномерного распределения парциальных лучей в заданной области определены угловые положения каждого p -го парциального луча, где $p = 0, 1, 2, \dots, P - 1$.

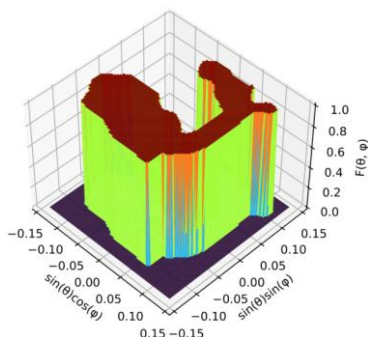


Рис. 2. Форма области покрытия требуемой ДН

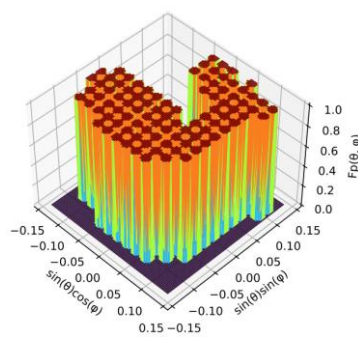


Рис. 3. Взаимное расположение парциальных лучей

Значения АФР на плоскости в дискретных точках могут быть вычислены следующим образом

$$J_{n,m} = \sum_p F(\theta_p, \varphi_p) \exp \left[ikd \left(n \sin(\theta_p) \cos(\varphi_p) + m \sin(\theta_p) \sin(\varphi_p) \right) \right], \quad (1)$$

где n, m – номер строк и столбцов элементов апертуры;

θ, φ – координаты сферической системы координат;

$F(\theta, \varphi)$ – требуемая ДН;

k – волновое число;

d – период расположения элементов;

$J_{n,m}$ – значения комплексных амплитуд поля вектора E на плоскости.

Полученные распределения амплитуд и фаз приведены на рис. 4 и 5 соответственно. Данное АФР использовано в качестве начального приближения для последующих этапов.

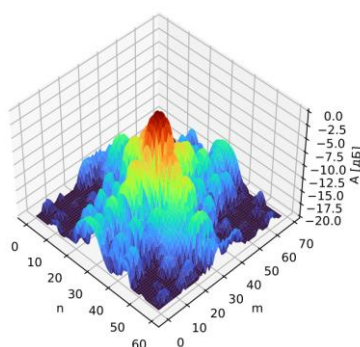


Рис. 4. Распределение амплитуд, полученное методом парциальных ДН

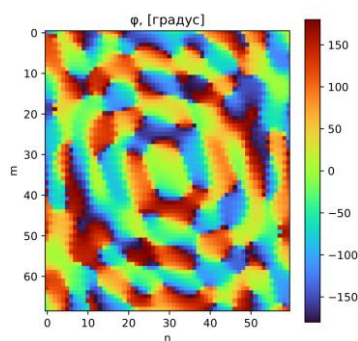


Рис. 5. Распределение фаз, полученное методом парциальных ДН

Определение исходной формы рефлектора ЗА. В качестве облучателя ЗА используется антенна с известной ДН. Геометрические параметры облучателя определяются дополнительными требованиями, такими как массогабаритные характеристики, требования по согласованию с питающей линией и т.д.

Амплитудное распределение (АР), приведенное на рис. 4, является сложно реализуемым в ЗА, поэтому оно заменяется более гладким. При этом уточняются параметры рефлектора из условия обеспечения требуемого спада АР к краям его апертуры. В общем случае в подобных задачах требуемое спадание амплитуды к краям рефлектора может отличаться от оптимального, которое для ЗА составляет 12 дБ согласно [19]. Поэтому выбор расстояния от поверхности рефлектора до облучателя с учетом параметров облучателя является необходимым.

В качестве начального приближения выбран вариант конструкции ЗА, у которой форма рефлектора представляет собой поверхность параболоида вращения, а ось облучателя совмещена с осью параболоида. Середина раскрыва облучателя совмещена с точкой фокуса параболоида (рис. 6).

Как следует из рис. 4 максимум АР на поверхности рефлектора такой системы должен находиться в районе вершины параболоида, а также с учетом того, что габаритные размеры рефлектора заданы (его диаметр составляет $D = 36\lambda$, где λ – длина волны на средней рабочей частоте), может быть вычислено фокусное расстояние, при котором будет обеспечено требуемое спадание АР. Согласно АР, приведенному на рис. 4, его спадание к краям параболоида должно составлять $\Delta F \approx 14$ дБ. Тогда необходимое фокусное расстояние f может быть вычислено из системы уравнений (2).

$$\begin{cases} Fr(\theta) = -\Delta F \\ tg(\theta) = \frac{2fD}{4f^2 - 0,25D^2} \end{cases}, \quad (2)$$

где $Fr(\theta)$ – нормированная ДН рупорного облучателя.

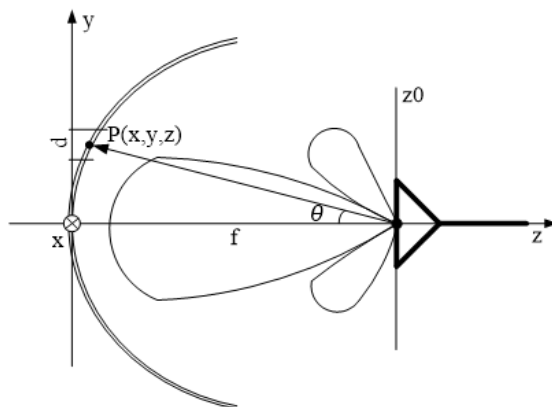


Рис. 6. Постановка задачи определения основных геометрических параметров ЗА и учета поля ее облучателя

В рассматриваемой ЗА $f \approx 21\lambda$.

Вычисленное расстояние f и известная ДН рупорного облучателя позволяют перейти к расчету АФР на апертуре рефлектора ЗА.

Расчет АФР на апертуре рефлектора с учетом характеристик облучателя. В качестве АР в точках апертуры рефлектора приняты значения ДН облучателя в соответствующих направлениях θ, φ . При расчете распределения фаз была использована фазовая ДН облучателя, которая задана относительно середины раскрыва, что позволило учесть смещение фазового центра облучателя относительно плоскости его апертуры. Полученные результаты расчета АФР приведены на рис. 7 и 8.

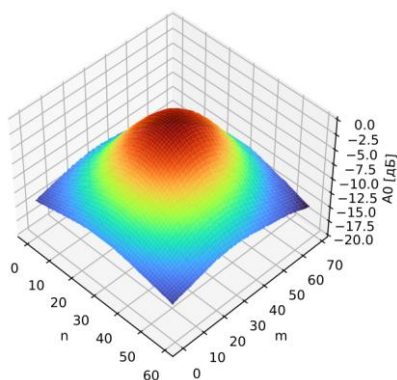


Рис. 7. Распределение амплитуд на апертуре рефлектора

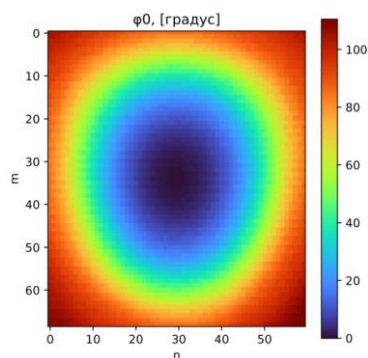


Рис. 8. Распределение фаз на апертуре рефлектора

Сравнивая АР, приведенные на рис. 4 и 7, можно сделать вывод о том, что АР, полученное методом парциальных диаграмм $A_{n,m}$, и АР, формируемое облучателем $A0_{n,m}$, имеют максимумы поля в середине апертуры, а величина спада поля к краям сопоставима.

Распределение фаз на апертуре ЗА при условии, что фазовый центр облучателя совмещен с точкой фокуса параболоида вращения, должно быть равномерным. Однако из-за смещения фазового центра ФР на апертуре рефлектора не является равномерным, как показывает график на рис. 8 [20]. Для компенсации данного эффекта необходимо изменить форму рефлектора или сместить положение облучателя.

Итерационное уточнение ФР на апертуре антенны. На данном этапе при выбранном АР выполняется итерационное уточнение ФР на апертуре рефлектора. Для решения данной задачи применен метод синтеза ФР на плоскости по заданной амплитудной ДН при условии, что АР является известным [21]. Синтез выполнен в дискретных точках. Оси координат и координаты узлов поверхности использованы такие же, что при расчете методом парциальных диаграмм на первом шаге рассматриваемого алгоритма. В качестве заданной амплитудной ДН принята ДН, соответствующая требуемой области покрытия (см. рис. 2). В качестве АР использованы результаты, полученные для облучателя ЗА (рис. 7). В качестве начального ФР взяты результаты, полученные методом парциальных ДН (рис. 5). Тогда начальное приближение АФР имеет вид

$$B_{n,m} = A0_{n,m} \exp(i\varphi_{n,m}). \quad (4)$$

Исходная ДН $F(\theta, \varphi)$ разделена на дискретные участки, где нумерация отсчетов определяется индексами q и w , в которых определены соответствующие значения $F(\theta_q, \varphi_w)$. Итерационный метод синтеза реализован следующим образом. Вычислено очередное приближение к ДН и АФР по формулам:

$$\begin{aligned} F1_{q,w} &= \sum_n \sum_m B_{n,m} \exp \left[ikd [n \sin(\theta_q) \cos(\varphi_w) + m \sin(\theta_q) \sin(\varphi_w)] \right], \\ C_{q,w} &= \frac{F1_{q,w}}{|F1_{q,w}|}, \\ J1_{n,m} &= \sum_q \sum_w F(\theta_q, \varphi_w) C_{q,w} \exp \left[-ikd [n \sin(\theta_q) \cos(\varphi_w) + \right. \\ &\quad \left. + m \sin(\theta_q) \sin(\varphi_w)] \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

В (5) получено уточненное АФР, которое формирует ДН близкую к $F(\theta, \varphi)$. Распределение $|J1_{n,m}|$ в общем случае не совпадает с $A0_{n,m}$ и может быть по-прежнему сложно реализуемым в рассматриваемой ЗА. Для уточнения АФР и приближения $|J1_{n,m}|$ к $A0_{n,m}$ переопределены исходные данные к новой итерации по формуле:

$$B_{n,m} = A0_{n,m} \exp[i \arg(J1_{n,m})]. \quad (6)$$

Далее выполнены повторные итерации вычислений по формулам (5), при которых на каждом шаге уточнялись исходные данные для каждой следующей итерации по формуле (6). Критерием выхода из итерационного процесса служит условие, изложенное в [22].

После применения описанного итерационного подхода к решаемой задаче получено уточнено ФР и соответствующая ДН. Результаты приведены на рис. 9 и 10. Полученная ДН формируется плоской апертурой с равномерным шагом расположения элементов, в котором АР имеет вид $A0_{n,m}$ (см. рис. 8), а ФР имеет вид $\arg(J1_{n,m}) = \Phi0_{n,m}$.

Полученное АФР необходимо реализовать на апертуре ЗА. Для этого выполнен переход к построению профилированного рефлектора, в котором учтено смещение фазового центра облучателя относительно середины его раскрытия путем внесения искажений в ФР, приведенное на рис. 9. Для этого вычислено

$$\Phi_{n,m} = \Phi0_{n,m} + \varphi0_{n,m}, \quad (7)$$

где $\varphi0_{n,m}$ – ФР на апертуре ЗА (см. рис. 8).

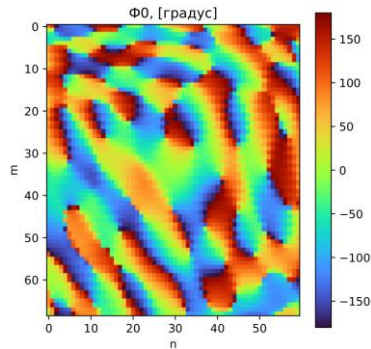


Рис. 9. Уточненное распределение фаз в апертуре ЗА

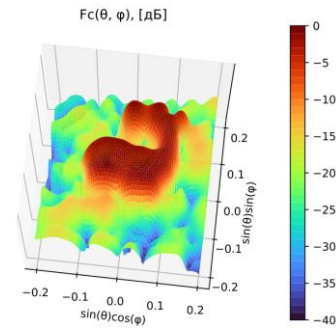


Рис. 10. ДН, соответствующая синтезированному АФР

Расчет поверхности рефлектора, формирующего требуемое ФР на апертуре.

Как видно из рис. 9 полученное ФР имеет большое количество незамкнутых линий, где осуществляется переход от минус 180° до плюс 180° у соседних элементов апертуры. Следовательно, к такому распределению не может быть применен алгоритм сглаживания ФР [23] без существенных искажений формируемой ДН. Поэтому в данной работе для построения профиля рефлектора ЗА исходная форма рассматриваемого параболического рефлектора разделена на участки в соответствии с выбранным шагом расположения элементов d (см. рис. 6). Для формирования на апертуре требуемого ФР вида $\Phi_{n,m}$ выполнено смещение участков рефлектора P в направлении оси исходной фигуры. Для этого вычислена необходимая величина разности путей распространения сигнала, отраженного от поверхности рефлектора при заданной длине волны λ :

$$\Delta L_{n,m} = \lambda \frac{\Phi_{n,m}}{2\pi}. \quad (8)$$

Смещение выполнено таким образом, чтобы сохранить основное свойство параболоида – способность отражать лучи, падающие из фокуса, параллельно его оси. В противном случае, если для элемента поверхности точка фокуса будет вынесена из точки f , это повлечет за собой искажения в ФР, формируемом на апертуре антенны.

Для получения уравнения параболоида с учетом смещения $\Delta L_{n,m}$ вычислена новая форма параболической поверхности, у которой все локально параболические участки имеют точку фокуса, совпадающую с точкой f . Для этого рассмотрено уравнение параболы, построенной в координатах y, z и смещенной по z . Такое уравнение имеет вид: $z(y) = ay^2 + c$. Точка фокуса имеет координату $z_f = \frac{1}{4a} + c$. Пусть плоскость z_0 пересекает ось z в точке f (см. рис. 6). Тогда геометрическая длина пути от точки f до точки параболы с координатами y, z и от точки параболы до плоскости z_0 будет равна $L = 1/2a$. Тогда, если первое уравнение параболы имеет коэффициент при старшей степени a_1 , а второе – a_2 , то рассматриваемая разность хода лучей имеет вид $\Delta L = \frac{1}{2a_1} - \frac{1}{2a_2}$. Отсюда искомый коэффициент при старшей степени с учетом $f = 1/4a$ может быть вычислен как

$$a_2 = \frac{1}{4f + 2\Delta L}. \quad (9)$$

С учетом (8) и (9) и с учетом длины пути распространения волны от фазового центра облучателя до поверхности рефлектора и от поверхности рефлектора до плоскости апертуры форма параболоида вращения, реализующего требуемое ФР в апертуре, имеет вид

$$z_{n,m} = \frac{x_n^2 + y_m^2}{4f + 2\Delta L_{n,m}} - \frac{\Delta L_{n,m}}{2}. \quad (10)$$

Уравнение (10) в данной работе определяет форму поверхности рефлектора, формирующего требуемое ФР на апертуре.

2. Проведение численных исследований. Объемная модель полученной ЗА приведена на рис. 11.

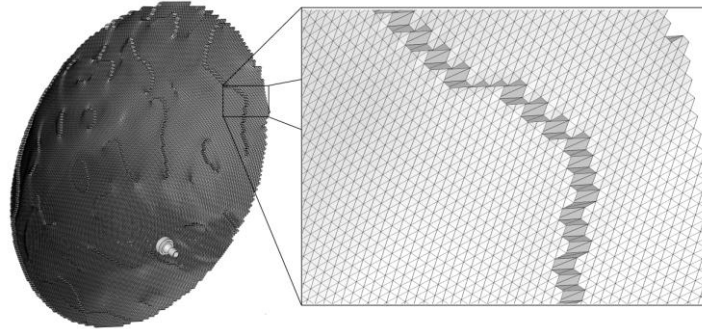


Рис. 11. Объемная модель ЗА

Для объемной модели, приведенной на рис. 11, методом электродинамического моделирования рассчитаны ДН и КНД. Результаты приведены на рис. 12.

Полученные данные показывают повторяемость результатов математического расчета (см. рис. 10) и результатов моделирования (рис. 12). Сравнение результатов приведено в табл. 1.

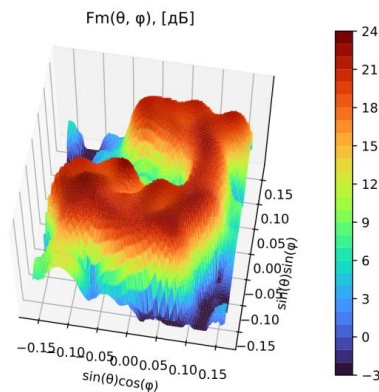


Рис. 12. ДН, полученная путем электродинамического моделирования ЗА

Таблица 1

Результаты расчета и моделирования ЗА

Исследуемый параметр	Максимум КНД в области $F(\theta, \varphi)$, [дБ]	Минимум КНД в области $F(\theta, \varphi)$, [дБ]	Средний КНД в области $F(\theta, \varphi)$, [дБ]	Область, где КНД не хуже минус 3 дБ от макс., [%]
Результаты математического расчета	24,4	21,3	23,1	97
Результаты электродинамического моделирования	23,2	20	21,9	94,7

Формируемая ЗА ДН имеет максимальный уровень боковых лепестков за пределами требуемой области минус 7 дБ относительно максимума.

Для формирования приведенной контурной ДН размер апертуры рефлектора увеличен в 9 раз в сравнении с размером апертуры антенны, реализующей ДН с круговым контуром границы, очерченным вокруг требуемой области. Эффективность данной антенны, определяемая в соответствии с [24], увеличивается по сравнению с круглой синфазно возбужденной апертурой на 3.5 дБ.

К достоинствам описанного алгоритма профилирования рефлектора можно отнести:

- ♦ возможность синтеза рефлекторов ЗА, формирующих на апертуре требуемое распределение амплитуд и фаз, которое соответствует заданной ДН;
- ♦ отсутствие поляризационной зависимости разрабатываемой структуры;
- ♦ синтезированная ЗА имеет улучшенные характеристики устойчивости к влияющим факторам космического пространства в сравнении с многоканальными системами.

Недостатками являются:

- ♦ алгоритм не позволяет синтезировать антенну, имеющую различные рабочие области на ортогональных поляризациях;
- ♦ рабочая область покрытия антенны является неизменной и не может быть перестроена во время работы.

Выводы. 1. Разработан алгоритм определения профиля рефлектора ЗА с одиночным облучателем, который позволяет формировать на апертуре антенны АФР, соответствующее ДН с требуемыми параметрами. На первом шаге выполнен предварительный расчет АФР на плоскости апертуры по заданной границе рабочей области. Для этого применен метод парциальных диаграмм. На основании данного расчета и с учетом известных характеристик облучателя ЗА на втором шаге выполнен расчет ее геометрических параметров, при которых на апертуре обеспечивается требуемое спадание АР. Также определена величина неравномерности ФР на апертуре рефлектора, вызванная смещением фазового центра облучателя относительно середины его раскрытия, которая скомпенсирована на последующих этапах. На четвертом этапе выполнено уточнение ФР на апертуре ЗА с помощью метода синтеза ФР по заданной амплитудной ДН при условии, что АР является известным. Для этого

- ♦ задано начальное приближение АФР, полученное на первом шаге предложенного алгоритма;
- ♦ выполнен итерационный процесс синтеза ФР, которое определяет требуемую ДН, с учетом того, что АР задано.

На заключительном этапе получено уравнение поверхности рефлектора ЗА, который реализует требуемое АФР на апертуре. Построение поверхности рефлектора выполнено на основании результатов расчета уточненного ФР. При получении уравнения данного параболоида использовались его оптические свойства.

2. Проведенные численные исследования синтезированной ЗА методами электродинамического моделирования показали возможность формирования ДН со сложной границей контура главного лепестка с использованием ЗА путем профилирования ее рефлектора.

Определены достоинства и недостатки предложенного алгоритма. Применение рассмотренного подхода позволяет выполнить расчет формы рефлектора ЗА, которая реализует ДН с заданными параметрами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калошин В.А., Ле Д.Т. Синтез и анализ бифокальных двухзеркальных систем // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – № 9. – DOI: 10.30898/1684-1719.2018.9.13.
2. Калошин В.А., Фролова Е.В. Синтез трехзеркальной системы с заданной формой главного зеркала по фазовому фронту и закону отображения // Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64, № 9. – С. 887-890. – DOI: 10.1134/S0033849419080072.
3. Калошин В.А., Попов А.П. Геометрооптический синтез остронаправленных двухзеркальных антенн // Радиотехника и электроника. – 1981. – № 9. – С.1816-1818.

4. JiXiang Wan, Tao Yan, Feng Wang. A Hybrid Reflector Antenna for Two Contoured Beams With Different Shapes // IEEE Antennas and wireless propagation letters. – 2018. – Vol. 17, No. 7. – P. 1171-1175. – DOI: 10.1109/LAWP.2018.2836927.
5. Былов А.А., Саломатов Ю.П. Диаграммообразующая схема однозеркальной антенны Ку-диапазона на основе планарной фазированной антенной решетки отражательного типа // Доклады ТУСУРа. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 11-15. – DOI:10.21293/1818-0442-2016-19-3-11-15.
6. Zhenqin Zheng, Long Zhang, Xianting Xie, Qingwei Ji, Hui Chen, Chunxu Mao. Single-Feed Reflectarray Antenna with Eight Beams for Satellite Communications // IEEE 4th International Conference on Electronic Information and Communication Technology. – 2021. – P. 658-661. – DOI: 10.1109/ICEICT53123.2021.9531087.
7. Банков С.Е., Калошин В.А., Фролова Е.А. Оптимизация планарных зеркальных систем по совокупности показателей качества // Радиотехника и электроника. – 2014. – Т. 59, № 11. – С.1090-1101. – DOI: 10.7868/S0033849414100027.
8. Yukhanov Y. and Privalova T. Synthesis of a Twist Structure from a Given Multibeam Scattering Diagram // 2023 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), Venice, Italy, 2023. – P. 135-138. – DOI: 10.1109/ICEAA57318.2023.10297754.
9. Florencio R., Encinar J.A., Boix R.R., Losada V., and Toso G. Reflectarray antennas for dual polarization and broadband telecom satellite applications // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2015. – Vol. 63, No. 4. – P. 1234-1246. – DOI: 10.1109/TAP.2015.2391279.
10. Daniel R. Prado, Manuel Arrebola, Marcos R. Pino, George Goussetis. Contoured-Beam Dual-Band Dual-Linear Polarized Reflectarray Design Using a Multiobjective Multistage Optimization // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2020. – Vol. 11, No. 68. – P. 7682-7687. – DOI: 10.1109/TAP.2020.2993014.
11. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. – М.: Наука, 1985. – 336 с.
12. Узолин Е.Ю., Крюков И.Г. Синтез профиля поверхности рефлекторов однозеркальных контурных антенн с использованием полиномов Цернике // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 3. – С. 92-95.
13. Мищенко Е.Н., Мищенко С.Е. Рекуррентный алгоритм вычисления радиальных функций полиномов Цернике // Вестник РГУПС. – 2017. – № 1. – С. 121-127.
14. Безуглов Д.А., Забродин Р.А. Методика аппроксимации гибкого адаптивного зеркала ограниченным числом полиномов Цернике // Оптика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 19, № 9. – С. 810-814.
15. Мануилов Б.Д., Башлы П.Н., Безуглов Ю.Д. Алгоритм управления многофункциональными антенными решетками на основе метода парциальных диаграмм // Антенны. – 2005. – № 9. – С. 72-81.
16. Зелкин Е.Г., Соколов В.Г. Методы синтеза антенн. – М.: Советское радио, 1980. – 295 с.
17. Калошин В.А., Попов А.П. О синтезе двухзеркальных антенн по амплитудной диаграмме направленности // Радиотехника и электроника. – 1982. – № 6. – С. 1110-1119.
18. Зелкин Е.Г., Кравченко В.Ф., Гусевский В.И. Конструктивные методы аппроксимации в теории антенн. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2005. – 512 с.
19. Rafael A. Penchel, José R. Bergmann, Fernando J. S. Moreira. Shaping Single Offset Reflector Antennas Using Local Axis-Displaced Confocal Quadrics // Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation. – 2016. – P. 1-9. – DOI: 10.1155/2016/4715681.
20. Венецкий А.С., Калошин В.А. Фазовое, лучевое и амплитудное распределение поля в осесимметричной двухзеркальной телескопической системе при смещении облучателя из фокуса // Доклады VI Всеросс. конф. «Радиолокация и радиосвязь». – М., 2012. – Т. 2. – С. 250-254.
21. Semenov B.V., Chernykh N.I., Pleshchev V.M. New method of reflector surface shaping to produce a prescribed contour beam // Ural mathematical journal. – 2017. – Vol. 3, No. 2. – P. 143-151. – DOI: 10.15826/umj.2017.2.015.
22. Занин К.М. Критерий эффективности применения антенн с контурными диаграммами направленности в составе бортовых комплексов систем спутниковой связи // Системы управления, связи и безопасности. – 2024. – № 2. – С. 1-13. – DOI: 10.24412/2410-9916-2024-2-001-013.
23. Poulton G.T., Hay S.G. Shaped reflector synthesis by successive projections // IEEE Antennas and propagation Society International Symposium – 1992 Digest. – P. 363-366. – DOI: 10.1109/APS.1992.221924.
24. Шишилов А.В. Зеркальные антенны с контурными диаграммами направленности – эффективность и предельные возможности // Радиотехника. – 2006. – № 4. – С.45-50.

REFERENCES

1. Kaloshin V.A., Le D.T. Sintez i analiz bifokal'nykh dvukhzerkal'nykh sistem [Synthesis and analysis of bifocal two-mirror systems], *Zhurnal radio-elektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2018, No. 9. DOI: 10.30898/1684 1719.2018.9.13.
2. Kaloshin V.A., Frolova E.V. Sintez trekhzerkal'noy sistemy s zadannoy formoy glavnogo zerkala po fazovomu frontu i zakonu otobrazheniya [Synthesis of a three-mirror system with a given shape of the main mirror along the phase front and the law of mapping], *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 2019, Vol. 64, No. 9, pp. 887-890. DOI: 10.1134/S0033849419080072.
3. Kaloshin V.A., Popov A.P. Geometroopticheskiy sintez ostronapravlennykh dvukhzerkal'nykh antenn [Geometrooptic synthesis of highly directional two-reflector antennas], *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 1981, No. 9, pp. 1816-1818.
4. JiXiang Wan, Tao Yan, Feng Wang. A Hybrid Reflector Antenna for Two Contoured Beams With Different Shapes, *IEEE Antennas and wireless propagation letters*, 2018, Vol. 17, No. 7, pp. 1171-1175. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2836927.
5. Bylov A.A., Salomatov Yu.P. Diagrammoobrazuyushchaya skhema odnozerkal'noy antennoy Kudiapazona na osnove planarnoy fazirovannoy antennoy reshetki otrazhatel'nogo tipa [Diagramming diagram of a single-mirror Ku-band antenna based on a planar phased antenna array of reflective type], *Doklady TUSURa* [Proceedings of TUSUR University], 2016, Vol. 19, No. 3, pp. 11-15. DOI: 10.21293/1818 0442 2016 19 3 11 15.
6. Zhenqin Zheng, Long Zhang, Xianting Xie, Qingwei Ji, Hui Chen, Chunxu Mao. Single-Feed Reflectarray Antenna with Eight Beams for Satellite Communications, *IEEE 4th International Conference on Electronic Information and Communication Technology*, 2021, pp. 658-661. DOI: 10.1109/ICEICT53123.2021.9531087.
7. Bankov S.E., Kaloshin V.A., Frolova E.A. Optimizatsiya planarnykh zerkal'nykh sistem po sovokupnosti pokazateley kachestva [Optimization of planar reflector systems for a set of quality indices], *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 2014, Vol. 59, No. 11, pp. 1090-1101. DOI: 10.7868/S0033849414100027.
8. Yukhanov Y. and Privalova T. Synthesis of a Twist Structure from a Given Multibeam Scattering Diagram, *2023 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, Venice, Italy, 2023, pp. 135-138. DOI: 10.1109/ICEAA57318.2023.10297754.
9. Florencio R., Encinar J.A., Boix R.R., Losada V., and Toso G. Reflectarray antennas for dual polarization and broadband telecom satellite applications, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 2015, Vol. 63, No. 4, pp. 1234-1246. DOI: 10.1109/TAP.2015.2391279.
10. Daniel R. Prado, Manuel Arrebola, Marcos R. Pino, George Goussetis. Contoured-Beam Dual-Band Dual-Linear Polarized Reflectarray Design Using a Multiobjective Multistage Optimization, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 2020, Vol. 11, No. 68, P. 7682-7687. DOI: 10.1109/TAP.2020.2993014.
11. Vorontsov M.A., SHmal'gauzen V.I. Printsipy adaptivnoy optiki [Principles of adaptive optics]. Moscow: Nauka, 1985, 336 p.
12. Uzun E.Yu., Kryukov I.G. Sintez profilya poverkhnosti reflektorov odnozerkal'nykh konturnykh antenn s ispol'zovaniem polinomov Tsernike [Synthesis of the surface profile of reflectors of single-mirror contour antennas using Zernike polynomials], *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics], 2012, No. 3, pp. 92-95.
13. Mishchenko E.N., Mishchenko S.E. Rekurrentnyy algoritm vychisleniya radial'nykh funktsiy polinomov Tsernike [Recurrent Algorithm for Calculation of the Radial Functions of Zernike Polynomials], *Vestnik RGUPS* [Bulletin of the Rostov State University of Railways], 2017, No. 1, pp. 121-127.
14. Bezuglov D.A., Zabrodin R.A. Metodika approksimatsii gibkogo adaptivnogo zerkala ogranichennym chislom polinomov Tsernike [Metodika approksimatsii gibkogo adaptivnogo zerkala ogranichennym chislom polinomov Tsernike], *Optika atmosfery i okeana* [Optics of the atmosphere and ocean], 2006, Vol. 19, No. 9, pp. 810-814.
15. Manuilov B.D. Bashly P.N. Bezuglov Yu.D. Algoritm upravleniya mnogofunktsional'nymi antennymi reshetkami na osnove metoda partial'nykh diagramm [Algorithm for controlling multifunctional antenna arrays based on the method of partial diagrams], *Antenny* [Antennas], 2005, No. 9, pp. 72-81.
16. Zelkin E.G., Sokolov V.G. Metody sinteza antenn [Methods of antenna synthesis]. Moscow: Sovetskoe radio, 1980, 295 p.
17. Kaloshin V.A., Popov A.P. O sinteze dvukhzerkal'nykh antenn po amplitudnoy diagramme napravlenosti [On the synthesis of two-reflector antennas by amplitude pattern], *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 1982, No. 6, pp. 1110-1119.

18. Zelkin E.G., Kravchenko V.F., Gusevskiy V.I. Konstruktivnye metody approksimatsii v teorii anten [Constructive methods of approximation in antenna theory]. Moscow: SAYNS-PRESS, 2005, 512 p.
19. Rafael A. Penchel, José R. Bergmann, Fernando J. S. Moreira. Shaping Single Offset Reflector Antennas Using Local Axis-Displaced Confocal Quadrics, *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation*, 2016, pp. 1-9. DOI: 10.1155/2016/4715681.
20. Venetskiy A.S., Kaloshin V.A. Fazovoe, luchevoe i amplitudnoe raspredelenie polya v osesimmetrichnoy dvukhzerkal'noy teleskopicheskoy sisteme pri smeshchenii obluchatelya iz fokusa [Phase, radial and amplitude distribution of the field in an axisymmetric two-reflector telescopic system when the irradiator is displaced from focus], *Reports of the VI All-Russia conference «Radar and radio communication»*. Moscow, 2012, Vol. 2, pp. 250-254.
21. Semenov B.V., Chernykh N.I., Pleshchev V.M. New method of reflector surface shaping to produce a prescribed contour beam, *Ural mathematical journal*, 2017, Vol. 3, No. 2, pp. 143-151. DOI: 10.15826/umj.2017.2.015.
22. Zanin K.M. Kriteriy effektivnosti primeneniya anten s konturnymi diagrammami napravlenosti v sostave bortovykh kompleksov sistem sputnikovoy svyazi [The Criterion of the Efficiency of Use of Antennas with Contour Beams in Satellite Communication Systems], *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2024, No. 2, pp. 1-13. DOI: 10.24412/2410-9916-2024-2-001-013.
23. Poulton G.T., Hay S.G. Shaped reflector synthesis by successive projections, *IEEE Antennas and propagation Society International Symposium*, 1992 Digest, pp. 363-366. DOI: 10.1109/APS.1992.221924.
24. Shishlov A.V. Zerkal'nye anteny s konturnymi diagrammami napravlenosti – effektivnost' i predel'nye vozmozhnosti [Reflector antennas with contoured beams: efficiency and limiting capability], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2006, No. 4, pp. 45-50.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

Занин Константин Михайлович – Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи; e-mail: konstantinzanin@rambler.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +78632018463; аспирант; руководитель группы.

Габриэлян Дмитрий Давидович – e-mail: d.gabrielijan2011@yandex.ru; тел.: +78632508985; д.т.н.; профессор; зам. начальника НТК.

Кузнецов Юрий Викторович – тел.: +78632018463; e-mail: kuznetsov_yu_v@list.ru; руководитель группы.

Мищенко Сергей Евгеньевич – e-mail: mihome@yandex.ru; тел.: +78633067810; д.т.н.; профессор; в.н.с.

Zanin Konstantin Mikhailovich – Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communication; e-mail: konstantinzanin@rambler.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +78632018463; postgraduate student; head of group.

Gabrielyan Dmitry Davidovich – e-mail: d.gabrielijan2011@yandex.ru; phone: +78632508985; dr. of eng. sc.; professor; deputy Head of the Scientific and Technical complex.

Kuznetsov Yuriy Viktorovich – e-mail: kuznetsov_yu_v@list.ru; phone: +78632018463; head of group.

Mishenko Sergey Evgenievich – e-mail: mihome@yandex.ru; phone: +78633067810; dr. of eng. sc.; professor; lead research scientist.

УДК 621.396.674

DOI 10.18522/2311-3103-2024-4-181-188

И.А. Алшимайсаве, Ю.В. Юханов

ОПТИМИЗАЦИЯ ВСЕНАПРАВЛЕННОЙ АНТЕННЫ 2×2 ММО ДЛЯ ВНУТРЕННИХ ПРИЛОЖЕНИЙ 2G, 3G, 4G И 5G

Из-за сосуществования нескольких типов сетей связи и растущей потребности в высокоскоростной передаче данных многочастотные и широкополосные системы связи приобрели популярность в качестве тем для изучения. Всенаправленные антенны могут обрабатывать большие отдельных диапазонов частот и полезны для различных устройств беспроводной связи благодаря