

РАЗРАБОТКА АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С ПЛАНАРНЫМ АНТЕННЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Бородулин Р.Ю.¹, Лукьянов Н.О.², Лянгузов Д.А.³

DOI:10.21681/3034-4050-2025-1-74-85

Ключевые слова: оптимизация элемента, рефлектор, высокочастотный делитель мощности.

Аннотация

Цель работы: состоит в анализе и разработке цельнометаллического антенного элемента для секторной антенны базовых станций с лучшими электрическими характеристиками, по сравнению с элементами, изготовленными по технологии печатных плат.

Методы исследования: в качестве численных методов определения электрических характеристик элементов — метод конечных разностей во временной области и метод конечных элементов, в качестве метода для определения квазиоптимальной структуры излучателя — градиентный метод оптимизации.

Результаты исследования заключаются в разработке антенной решетки, синтезированной по критериям обеспечения коэффициента стоячей волны менее 1,5 в рабочем диапазоне частот, обеспечения коэффициента развязки между входами/выходами для ортогонально расположенных излучателей в антенной решетке менее – 26 дБ и сохранения формы диаграммы направленности. Обоснован выбор полученных электрических характеристик, а также геометрических размеров отдельного излучателя и антенной решетки в целом. Сравнение результатов расчета и измерений характеристик макета антенны показало соответствие практических и теоретических результатов. По результатам изготовлена антенная решетка, сформулированы рекомендации по совершенствованию антенной структуры с практической точки зрения.

Практическая ценность заключается в полученной структуре планарного антенного элемента антенной решетки.

Постановка задачи на разработку антенной решетки с планарным антенным элементом

Для разработки антенной решетки общую задачу условно можно разделить на три подзадачи.

Первая подзадача — разработка и оптимизация элемента антенной решетки.

Вторая подзадача — разработка линейной антенной решетки с рефлектором.

Третья подзадача — разработка высокочастотного делителя мощности.

Решение оптимизационной задачи по разработке элемента антенной решетки заключается в поиске наименьших размеров излучающей поверхности антенного элемента, при которых сохраняются заданные электрические характеристики.

Задача оптимизации включает в себя несколько основных этапов:

- задание требуемых характеристик;
- выбор типа излучателя;
- выбор критериев оптимизации;
- выбор параметров оптимизации;
- расчет и анализ характеристик.

Излучающий элемент секторной антенны для базовых станций (сотовой связи, комплексов Р.48 «Гранит», возимых радиостанций Р 187-В «Азарт») должен обеспечивать следующие характеристики [1–3]:

- ❖ коэффициент стоячей волны (КСВ) в фидере с волновым сопротивлением 50 Ом не должен превышать 1,5 в полосе частот 1710–2700 МГц;
- ❖ величина развязки между входами/выходами для антенн, функционирующих на двух ортогональных поляризациях или в двух и более диапазонах частот, должна составлять величину не менее 25 дБ в заданной полосе частот.

¹Бородулин Роман Юрьевич, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры радиосвязи Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E mail: borodulroman@yandex.ru

²Лукьянов Николай Олегович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры радиосвязи Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E mail: lukyanovno@yandex.ru

³Лянгузов Данила Андреевич, кандидат технических наук, начальник отделения (организации подготовки научно-педагогических кадров) Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E mail: danilalgz@yandex.ru

Наиболее распространенные в базовых станциях ортогональные симметричные вибраторы над рефлектором, излучающие поверхности которых расположены в плоскости рефлектора, хотя и имеют хорошие характеристики, но их сборка — достаточно трудозатратный процесс [4]. Кроме того, так как излучатель работает на высоких частотах, небольшое отклонение от заданных геометрических параметров при сборке приводит к изменению электрических характеристик излучателя. Изготовление цельнометаллического элемента позволит снизить трудозатраты и избежать некорректных результатов из-за

неточностей при его изготовлении и сборке. Кроме того, такая антенна позволит работать с передатчиками большей мощности, чем излучатели, изготовленные по технологии печатных плат. В качестве прототипа выберем ортогональный металлический Г-образный планарный диполь, пример и схема антенного устройства, выбранного в качестве исходного элемента для оптимизации представлена на рис. 1. Решение оптимизационной задачи заключается в поиске наименьшего оптимального размера антенного элемента, при сохранении заданных электрических характеристик [5, 6].

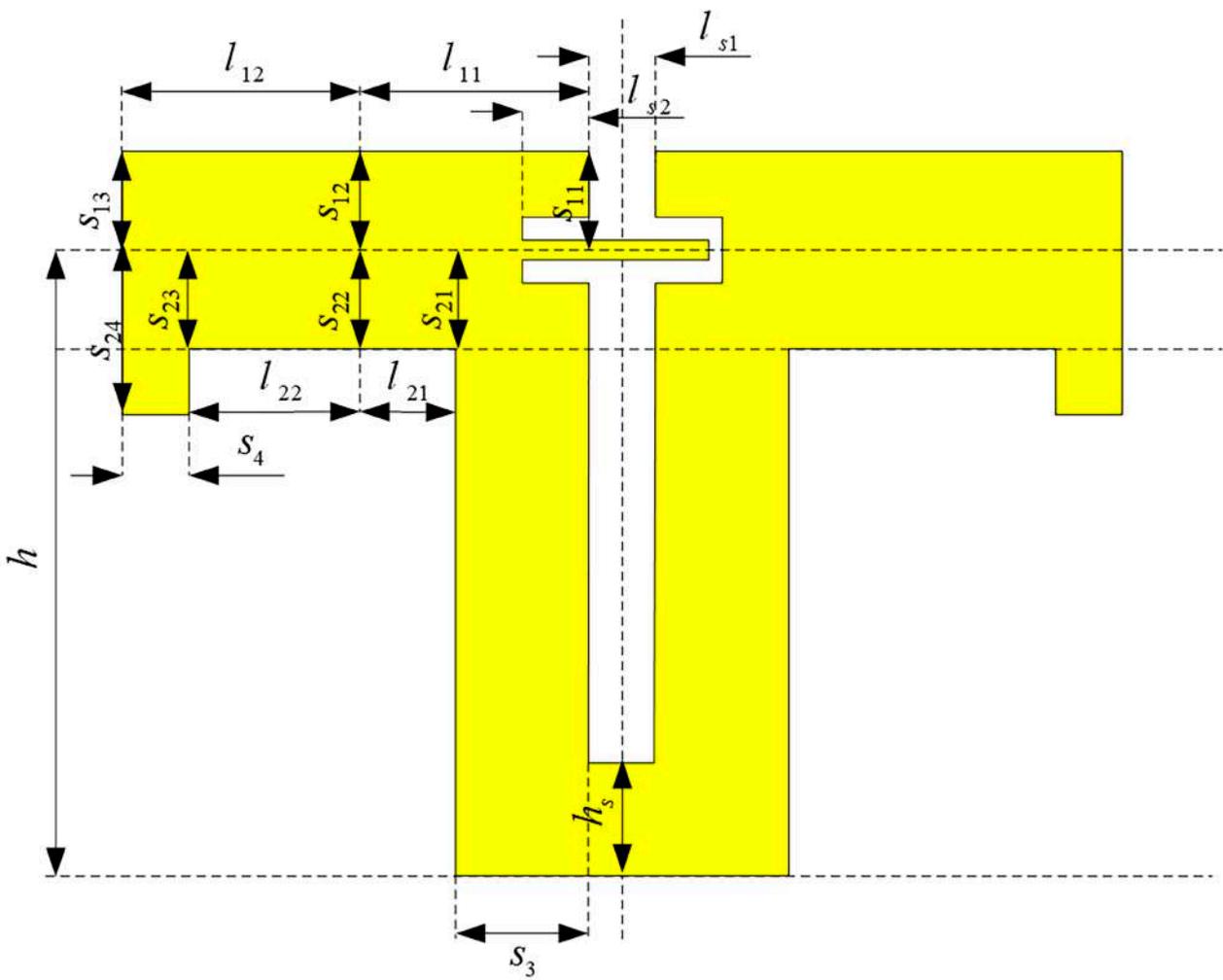


Рис.1. Схема прототипа излучателя

В качестве критериев оптимизации выберем КСВ и диаграмму направленности (ДН).

Как видно из рис.1 оптимизация будет осуществляться путем поиска новой оптимальной формы излучающей поверхности планарного из-

лучателя, которая позволит добиться заданных характеристик антенны. Для поиска оптимальной формы излучателя разобьем общую поверхность диполя на условно верхнюю и нижнюю части. Верхняя часть будет состоять из двух элементов:

первый — со сторонами s_{11} , s_{12} и длиной l_{11} ; второй — со сторонами s_{12} , s_{13} и длиной l_{12} . Нижняя часть диполя будет состоять из трех элементов: первый — со сторонами s_{21} , s_{22} и длиной l_{21} ; второй — со сторонами s_{22} , s_{23} и длиной l_{22} ; третий — со сторонами s_{23} , s_{24} и длиной s_4 . Так как излучатель расположен над рефлектором, то важную роль в формировании требуемых электрических характеристик будет играть высота подвеса излучателя над рефлектором h . Рефлектор и излучатель соединены с рефлектором через U -образную стойку, которая играет роль симметрирующего устройства, имеет следующие параметры: высоту h (расстояние от рефлектора до фазового центра), высоту перемычки между стойками диполей h_s ширину стойки s_3 . Расстояние между плечами диполя l_{s1} , l_{s2} . Выемка длиной l_{s2} в точке питания между плечами диполя позволяет увеличивать длину полоска, что играет роль согласующего устройства. Как показали предварительные расчеты и выводы из различных источников [7–10], сама форма рефлектора также будет оказывать влияние на характеристики антенны. В качестве рефлектора выберем П-образный отражатель прямоугольной формы. Размеры рефлектора выберем фиксированными шириной 150 мм, не превышающими размеры известных прототипов антенных решеток, работающих в диапазоне 1710–2700 МГц, высота П-образных краев рефлектора также будет одним из параметров оптимизации, обозначим как h_{ref} .

Расчет электрических характеристик антенны

Для поиска оптимального размера излучателя необходимо решить многокритериальную задачу с множеством параметров [7–10]. Для решения задачи воспользуемся градиентным методом оптимизации, где в качестве критериев оптимизации выберем КСВ в фидере с волновым сопротивлением 50 Ом ($\rho_{feed} = 50$ Ом), которое не превышает значения 1,5 ($k_{VSVR} \leq 1,5$) в полосе частот 1710–2700 МГц. Вторым критерием является коэффициент развязки между входами/выходами для ортогонально расположенных антенн, значение которого во всей полосе частот не должно превышать — дБ или 0,06 ($k_{s21} \leq 0,06$).

Для выбранных параметров оптимизации необходимо определить пределы, в которых будут осуществляться поиски оптимальных размеров излучателя. С одной стороны, область выбора параметров должна быть достаточной для решения задачи, с другой минимальной, так как от этого зависит трудоемкость и время решения

задачи. Как показали предварительные расчёты, чтобы не допустить развала главного лепестка диаграммы направленности на два боковых лепестка высота подвеса антенны не должна превышать 40 мм ($h = 40$ мм). Выберем следующие пределы изменения параметров:

1 мм $\leq s_{11} \leq 50$ мм, с шагом $\Delta s_{11} = 1$ мм; 1 мм $\leq s_{12} \leq 50$ мм, с шагом $\Delta s_{12} = 1$ мм; 1 мм $\leq s_{13} \leq 50$ мм, с шагом $\Delta s_{13} = 1$ мм; 1 мм $\leq s_{21} \leq h - 1$ мм, с шагом $\Delta s_{21} = 1$ мм; 1 мм $\leq s_{22} \leq h - 1$ мм, с шагом $\Delta s_{22} = 1$ мм; 1 мм $\leq s_{23} \leq h - 1$ мм, с шагом $\Delta s_{23} = 1$ мм; 1 мм $\leq s_{24} \leq h - 1$ мм, с шагом $\Delta s_{24} = 1$ мм; 1 мм $\leq l_{11} \leq 30$ мм, с шагом $\Delta l_{11} = 1$ мм; 1 мм $\leq l_{12} \leq 30$ мм, с шагом $\Delta l_{12} = 1$ мм; 0 мм $\leq l_{21} \leq 30$ мм, с шагом $\Delta l_{21} = 1$ мм; 0 мм $\leq l_{22} \leq 30$ мм, с шагом $\Delta l_{22} = 1$ мм; 25 мм $\leq h \leq 40$ мм, с шагом $\Delta h = 1$ мм; 1 мм $\leq h_s \leq 20$ мм, с шагом $\Delta h_s = 1$ мм; 2 мм $\leq s_3 \leq 10$ мм, с шагом $\Delta s_3 = 1$ мм; 5 мм $\leq s_4 \leq 15$ мм, с шагом $\Delta s_4 = 1$ мм; 1 мм $\leq l_{s1} \leq 10$ мм, с шагом $\Delta l_{s1} = 1$ мм; 1 мм $\leq l_{s2} \leq 10$ мм, с шагом $\Delta l_{s2} = 1$ мм; 5 мм $\leq h_{ref} \leq 40$ мм, с шагом $\Delta h_{ref} = 5$ мм.

$$f(m_{opt}) = \min_{m_{opt}} \left(\sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{k_{VSVR,i}(m_{opt})}{n} - k_{VSVR} \right) + \left(\frac{k_{s21,i}(m_{opt})}{n} - k_{s21} \right) \right) \right);$$

где $m_{opt} = (s_{11_{opt}}, s_{12_{opt}}, s_{13_{opt}}, s_{21_{opt}}, s_{22_{opt}}, s_{23_{opt}}, s_{24_{opt}}, s_{3_{opt}}, s_{4_{opt}}, l_{11_{opt}}, l_{12_{opt}}, l_{21_{opt}}, l_{22_{opt}}, l_{s1_{opt}}, l_{s2_{opt}}, h_{s_{opt}}, h_{opt}, h_{ref_{opt}})$, n — количество отсчетов по частоте рабочего диапазона радиостанции; $k_{VSVR} = 1,5$ — требуемое значение КСВ; $k_{VSVR,i}$ — значение КСВ на i -том шаге итерации; k_{s21} — требуемое значение коэффициента развязки; $k_{s21,i}$ — значение коэффициента развязки на i -том шаге итерации.

На основе численных методов электродинамики была разработана компьютерная модель антенны и проведены расчеты. В частности, для проверки сходимости результатов расчеты проводились методом конечных разностей во временной области (КРВО) и методом конечных элементов (МКЭ). В результате решения оптимизационной задачи по поиску минимального значения целевой функции, были получены следующие геометрические размеры антенны: $s_{11} = 23$ мм, $s_{12} = 12$ мм, $s_{13} = 7$ мм, $s_{21} = 10$ мм, $s_{22} = 13$ мм, $s_{23} = 17$ мм, $s_{24} = 20$ мм, $s_3 = 7$ мм, $s_4 = 9$ мм, $l_{s1} = 4$ мм, $l_{s2} = 2$ мм, $l_{11} = 19$ мм, $l_{12} = 9$ мм, $l_{21} = 12$ мм, $l_{22} = 0$ мм, $h_s = 5$ мм, $h = 39$ мм, $h_{ref} = 30$ мм.

Оптимизированная форма излучателя получилась сложной структуры. Результат решения оптимизационной задачи представлен на рис. 2.

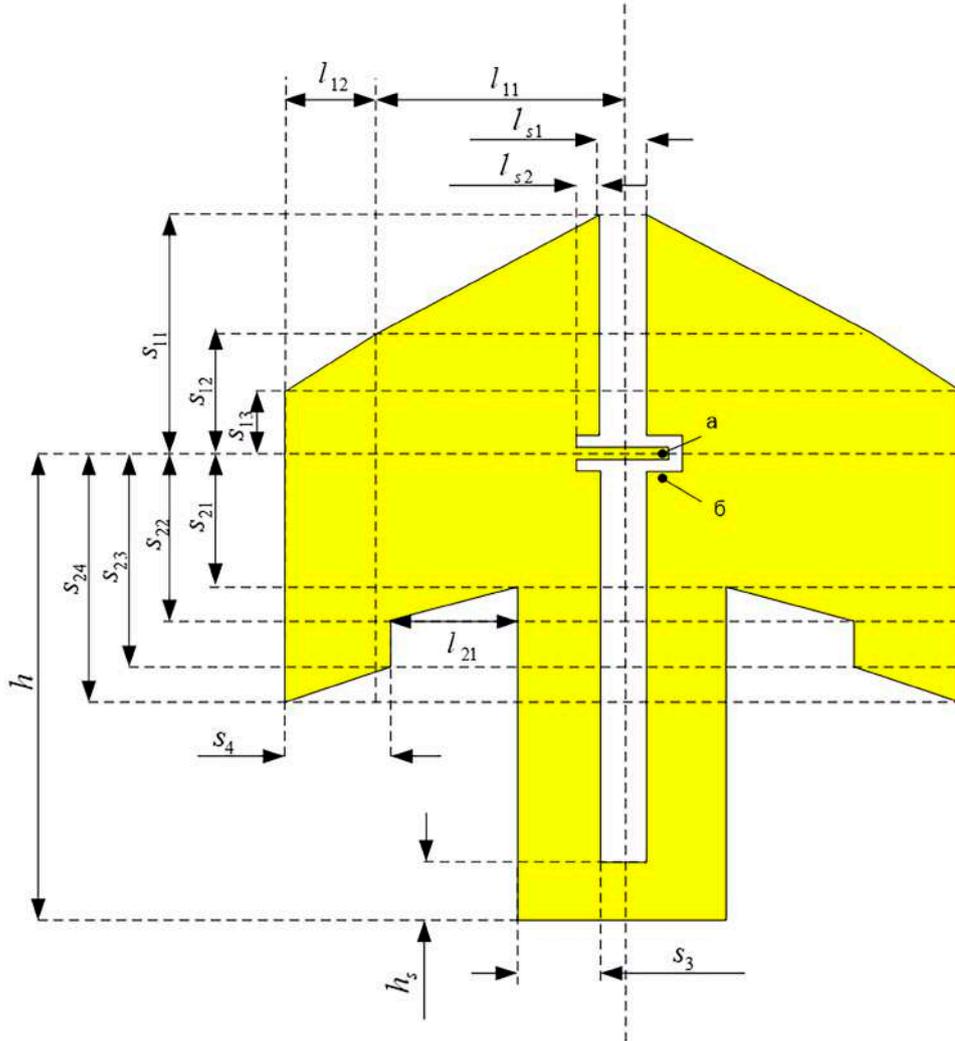


Рис. 2. Результаты оптимизации. Внешний вид одного элемента ортогональных диполей

Общие размеры диполя составили: длина 60 мм, максимальная высота над рефлектором 62 мм. Общий вид пары оптимизированных ортогональных диполей над рефлектором представлен на рис. 3.

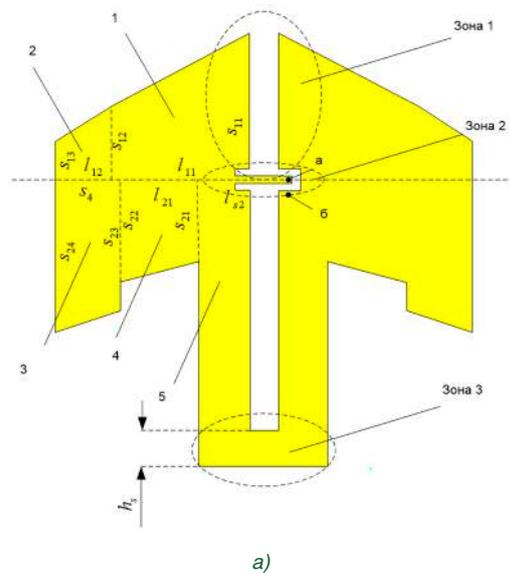
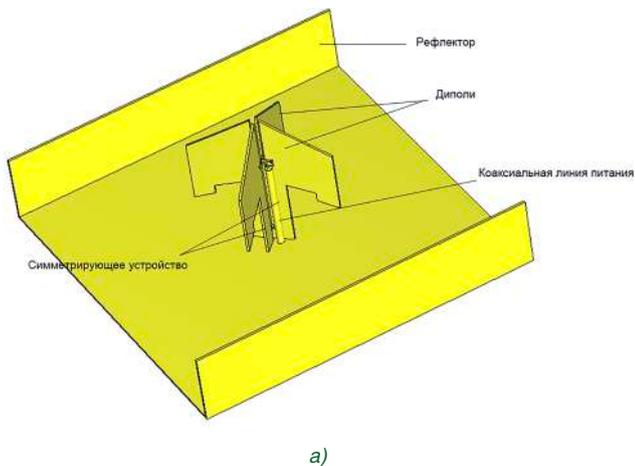


Рис. 3. Общий вид ортогональных диполей над рефлектором: а) общая структура ортогональных диполей; б) общая структура оптимизированного диполя

В результате расчетов и решения оптимизационной задачи общая модель планарных цельнометаллических ортогональных диполей будет включать в себя следующие составные части: диполи, симметрирующее устройство, линия питания антенн, рефлектор. Сложную излучающую поверхность плеча диполя условно можно разделить на несколько частей: четыре трапеции и U-образное симметрирующее устройство (рис. 3, б). Трапеция 1 с длиной сторон s_{11} , s_{12} и длиной основания l_{11} связана электрически через сторону длиной s_{12} с трапецией 2 с длиной сторон s_{12} , s_{13} и длиной основания l_{12} ; трапеция 3 с длиной сторон s_{21} , s_{22} и

длиной основания l_{21} , а также трапеция 4 с длиной сторон s_{23} , s_{24} и длиной основания s_4 электрически связаны между собой через стороны с длинами s_{22} и s_{23} ; основание трапеции 1 электрически связано с основанием трапеции 3 и 4 и симметрирующим устройством; основание трапеции 2 электрически связано с основанием трапеции 3; основание трапеции 4 электрически связано с симметрирующим устройством 5 через сторону длиной s_{21} ; симметрирующее устройство 5 электрически связано с рефлектором.

Сложная структура металлического диполя позволяет добиться согласования в требуемой полосе частот. График КСВ представлен на рис. 4.

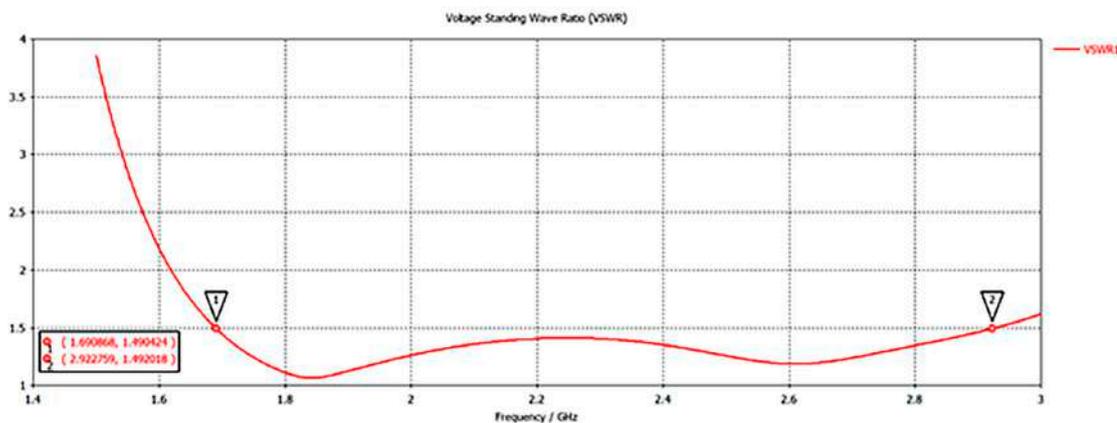


Рис. 4. График КСВ в фидере с волновым сопротивлением 50 Ом

Результаты расчета показали, что у оптимизированных элементов антенной решетки значение КСВ полностью удовлетворяет требованиям. Имеется запас по ширине полосы частот, который позволяет в некоторой степени компенсировать погрешности при конструировании экспериментального образца. Как показали расчеты, разработанный элемент антенной решетки для требуемой полосы частот обеспечивает согласование по

КСВ не выше 1,4 ($kVSWR \leq 1,4$), что существенно повышает энергетические характеристики антенной системы.

Следующий важный параметр для двух антенных устройств, работающих в непосредственной близости, это коэффициент развязки между входами/выходами для ортогонально расположенных антенн. На рис. 5 представлен график зависимости коэффициента развязки от частоты.

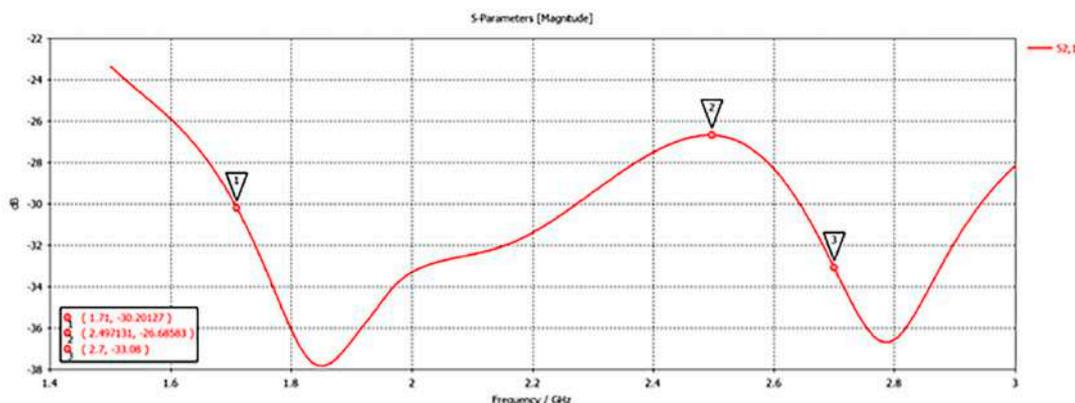
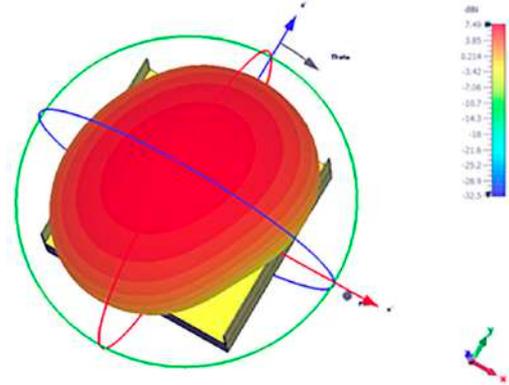
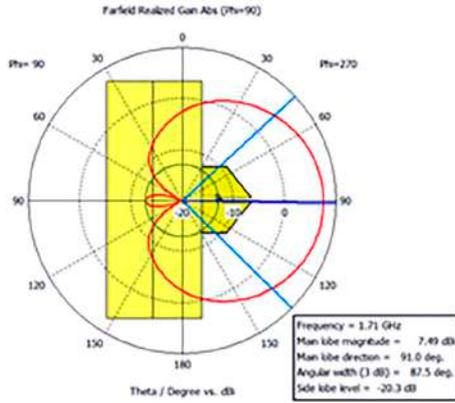


Рис. 5. Коэффициент развязки между ортогональными излучателями элемента антенной решетки

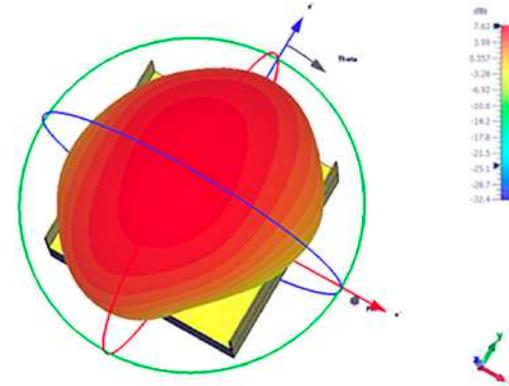
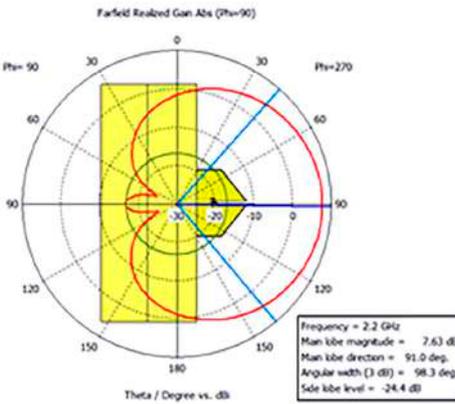
Развязка между ортогональными диполями в требуемой полосе частот не превышает -26 дБ, что соответствует заданным требованиям.

Следует отметить, что у ортогональных антенн, состоящих из излучателей, расположенных в одной плоскости с симметрирующими устройством и расположенных перпендикулярно плоскости рефлектора, развязка выше, чем у антенн, излучающая плоскость которых расположена в плоскости, параллельной плоскости рефлектора.

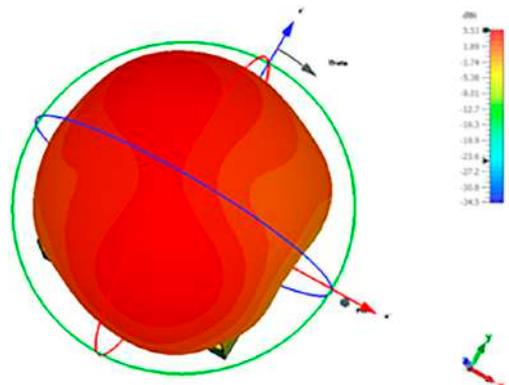
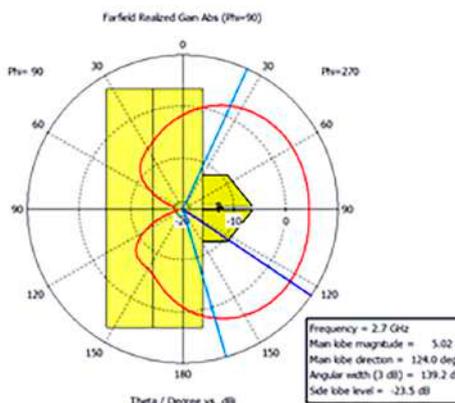
Ортогональные металлические диполи, расположенные над рефлектором, обладают направленными свойствами. Диаграммы направленности антенны представлены на рис. 6.



а)



б)



в)

Рис. 6. Диаграмма направленности для одиночного излучателя с поляризацией +45 элемента антенной решетки на разных частотах:
 а) частота 1710 МГц; б) частота 2200 МГц; в) частота 2700 МГц

Коэффициент усиления одиночного элемента антенной решетки на разных частотах в пределах 8 дБ, однако, на частоте 2700 МГц, направленные свойства ослабевают, и КУ падает до 5,5 дБ. Высота антенны над рефлектором рассчитана таким образом, что позволяет сохранять однонаправленное излучение во всей полосе частот.

Результаты расчетов позволяют сделать вывод, что разработанная двухполяризационная антенна удовлетворяет требованиям по широкополосным свойствам, взаимному влиянию, форме ДН, и может быть применена в качестве элемента антенной решетки.

Разработка линейной антенной решетки

Секторная антенна базовой станции должна работать в широкой полосе частот с высоким коэффициентом усиления не менее 15 дБ. Учитывая ДН и коэффициент усиления антенного элемента, рассчитанного выше, для получения требуемого коэффициента усиления, достаточно антенной решетки из 8-ми элементов.

Расстояние между элементами антенной решетки для минимизации паразитных боковых лепестков и для недопущения «развала» главного лепестка ДН целесообразно выбирать из условия $l_n = 0,8\lambda_{min}$. Учитывая верхнюю частоту рабочего диапазона f_{max} МГц, тогда $l_n = 89$ мм. Проведенные расчеты 8-элементной линейной антенной решетки показали, что для достижения требуемого результата достаточно, чтобы расстояние между элементами было $l_n = 87$ мм. Расчеты электрических характеристик антенной решетки проводились с учетом радиопрозрачного пластикового корпуса. Общий вид антенной решетки представлен на рис. 7.

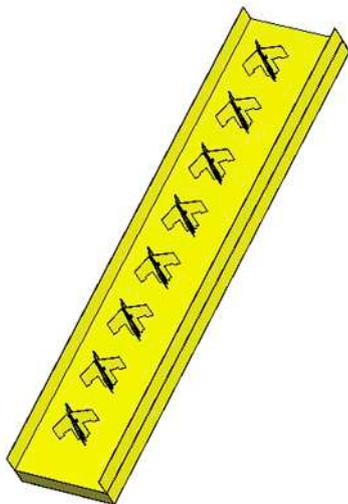


Рис. 7. Общий вид антенной решетки

Модель антенной решетки представляет собой систему из восьми пар ортогональных излучателей, расположенных над рефлектором П-образной формы. Под рефлектором расположена модель специальной ниши для антенного делителя и линий питания антенных элементов.

Был проведен расчет электрических характеристик антенной решетки. Расчет КСВ представлен на рис. 8.

Как показали расчеты, КСВ антенной решетки не превышает 1,4 в полосе частот 1710–2700 МГц. Также антенная решетка обладает требуемым значением развязки ниже -25 дБ, график представлен на рис. 9.

Диаграмма направленности антенной решетки для различных частот рабочего диапазона представлена на рис. 10.

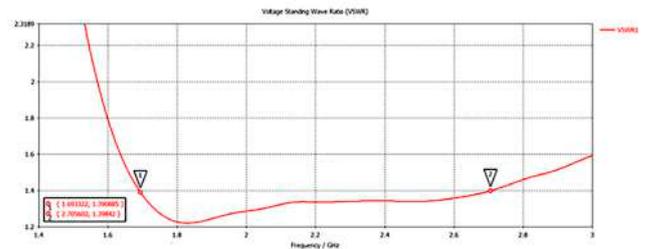


Рис. 8. Коэффициент стоячей волны в фидере с волновым сопротивлением 50 Ом

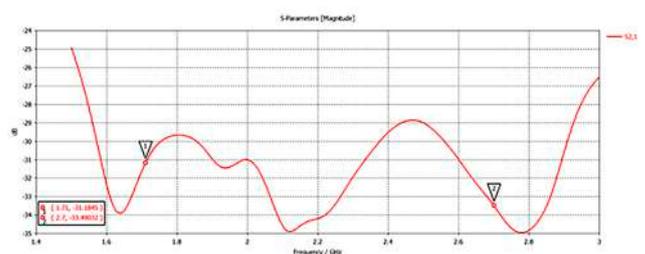
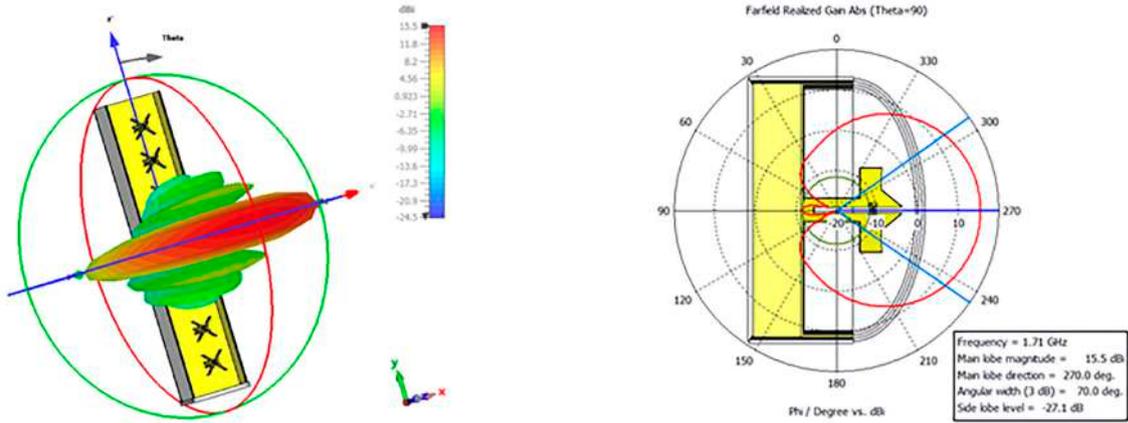
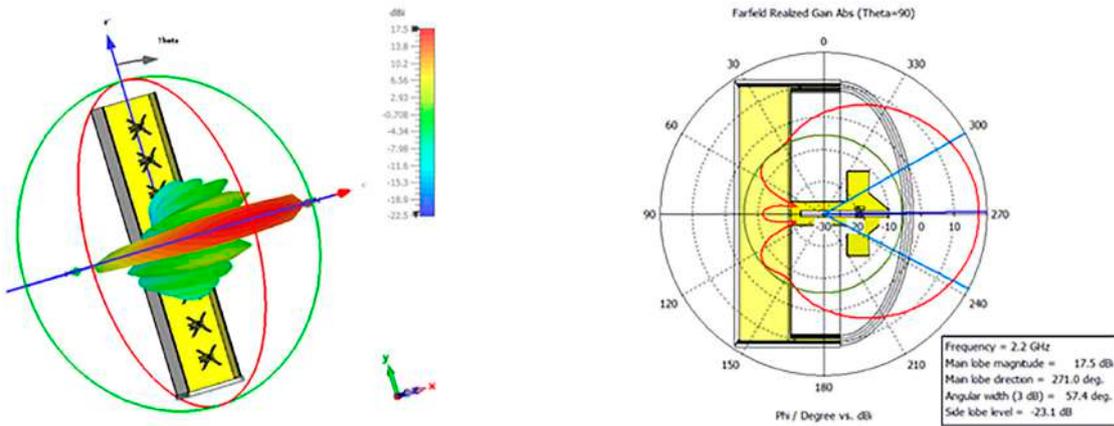


Рис. 9. Коэффициент развязки линейной антенной решетки

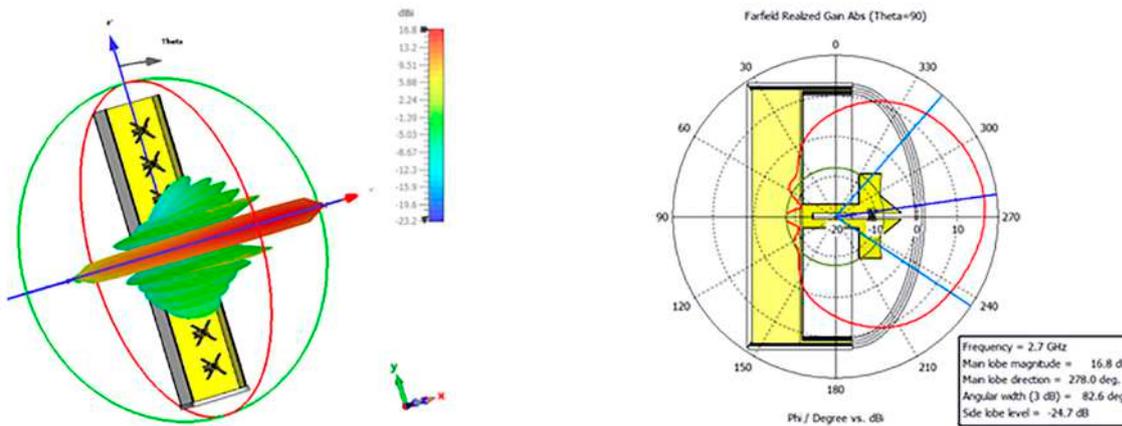
Результаты расчета ДН показали отличные результаты. Диаграмма направленности стабильна во всем рабочем диапазоне, ширина главного лепестка по уровню половинной мощности не превышает 70°, а КУ не ниже 15 дБ во всем рабочем диапазоне.



а)

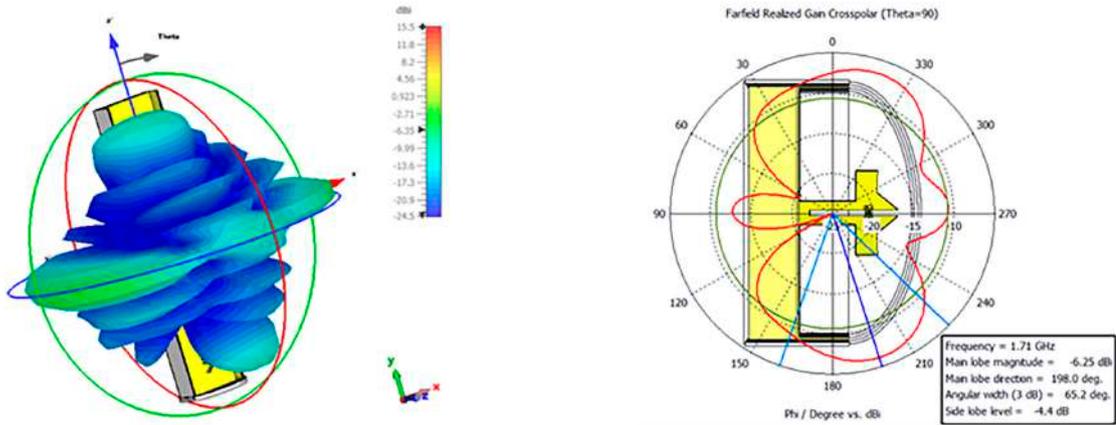


б)

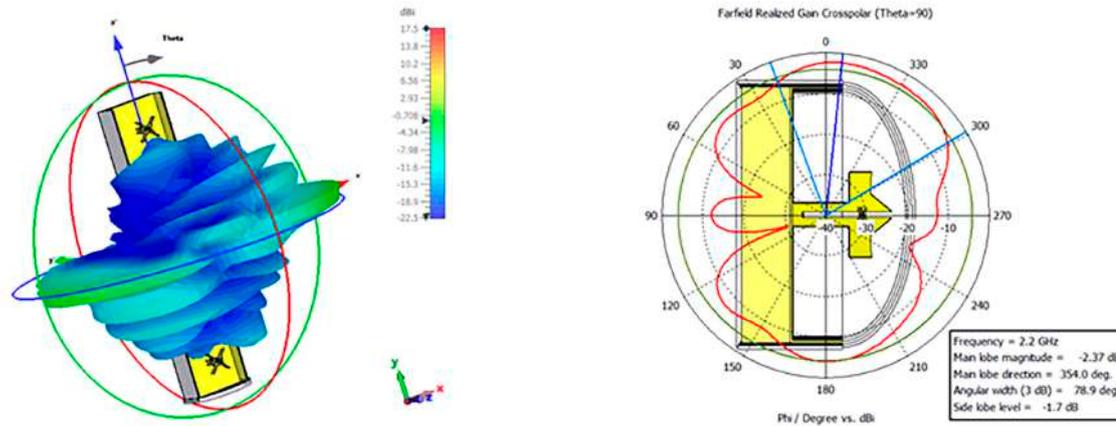


в)

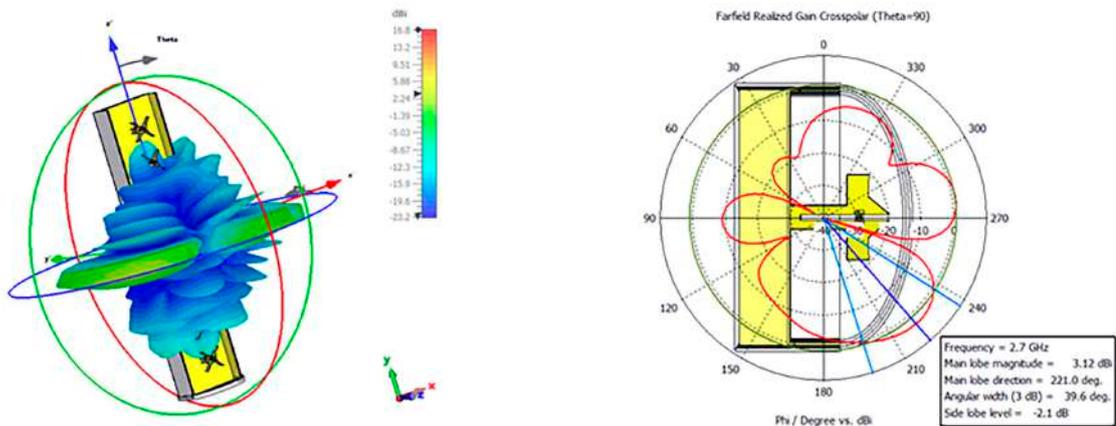
Рис.10. Диаграмма направленности антенной решетки с поляризацией +45 на разных частотах:
 а) частота 1710 МГц; б) частота 2200 МГц; в) частота 2700 МГц



а)



б)



в)

Рис.11. Кросс-поляризационная характеристика антенной решетки с поляризацией +45 на разных частотах:
 а) частота 1710 МГц; б) частота 2200 МГц; в) частота 2700 МГц

Изготовление экспериментального образца

Был изготовлен полноразмерный экспери-

ментальный образец для измерения и проверки расчетных характеристик.

График КСВ представлен на рис. 12.



Рис.12. Диаграмма направленности антенной решетки с поляризацией +45 на разных частотах: а) частота 1710 МГц; б) частота 2200 МГц; в) частота 2700 МГц

Внешний вид экспериментального образца представлен на рис.13.



Рис. 13 Внешний вид экспериментального образца

Выводы

Антенна удовлетворяет требованиям по КСВ. Антенный элемент легко изготовить из металла, он не требует дополнительной гибки и сборки, достаточно установить его над рефлектором и припаять симметрирующее устройство к рефлектору. Следует отметить, что данный элемент имеет недостаток, связанный со сложностью припаивания кабеля в точку питания. Латунь достаточно тонкая и гибкая, что приводит к изменению расстояния между диполями (зазор), что требует дополнительного регулирования и подстройки при установке элемента, целесообразно доработать пригодность элемента как антенны с практической точки зрения.

Литература

1. Пак Д. А. Антенны базовых станций в сотовых сетях мобильной связи // Молодежь. Наука. Инновации, 2022. Т. 1. С. 216–218.
2. Корнюхин В. И. Плоские печатные панельные антенны для базовых станций / В. И. Корнюхин, А. В. Фадеева // Технологии информационного общества: Сборник трудов XVIII Международной отраслевой научно-технической конференции, Москва, 27–28 февраля 2024 года. – Москва: Московский технический университет связи и информатики, 2024. С. 75–80.
3. Широкополосная двухполяризационная антенная решетка планарных диполей для базовых станций мобильной связи / К. В. Кобрин, Z. Li, В. А. Следков, М. Б. Мануилов // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 1.
4. Власенко В. И. Двухполяризационная антенна для базовой станции подвижной радиосвязи / В. И. Власенко, С. В. Дворников // Телекоммуникации. 2021. № 5. С. 8–16.
5. Кочетков В. А. Численные методы и инструменты моделирования антенных решеток РЭС СВЧ диапазона / В. А. Кочетков И. В. Солдатиков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 9. С. 91–101.

6. Дубовицкий М. А. Оптимизация протяженной антенной решетки из апертурных элементов по критерию минимизации уровня дифракционного излучения / М. А. Дубовицкий, М. С. Михайлов // Молодёжь и будущее авиации и космонавтики: сборник аннотаций конкурсных работ XIV Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов, Москва, 21–25 ноября 2022 года. – Москва: Издательство "Перо", 2022. С. 97–98.
7. Кочетков В. А. Численные методы и инструменты моделирования антенных решеток РЭС СВЧ диапазона / В. А. Кочетков, И. В. Солдатиков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. № 9. С. 91–101.
8. Алгоритмы аппроксимации электромагнитного поля и синтеза диаграмм направленности антенных решеток / И. А. Баранников, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, С. М. Федоров // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29, № 1. С. 56–74.
9. Артемов М. Л. Направления совершенствования характеристик перспективных антенных систем / М. Л. Артемов, О. В. Афанасьев, М. П. Сличенко // Радиотехника. 2023. Т. 87, № 5. С. 184–198.
10. Перспективы миниатюризации размеров электрически малых антенн в условиях ограничений на полосы рабочих частот / В. Ф. Лось, И. О. Порохов, С. В. Агасиева, Г. А. Гудков // Электромагнитные волны и электронные системы. 2023. Т. 28, № 4. С. 57–76.

DEVELOPMENT OF AN ANTENNA GRID WITH A PLANAR ANTENNA ELEMENT

Borodulin R. U.¹, Lukyanov N. O.², Lyanguzov D. A.³

Keywords: *element optimization, reflector, high-frequency divider*

Abstract

The purpose of the work is analysis and development of an all-metal antenna element for sector base station antenna with the best electrical performance, in compared to elements made by the technology of printed boards.

Research methods: *as numerical methods for determining electrical characteristics elements the method of finite differences in time region and finite element method, as a method for determining the quasi-optimal structure of the emitter – gradient optimization method.*

The result of the study consist in the development of an antenna array, the choice of geometric sizes and electrical characteristics is justified. Comparison of the results of the calculation and measurement of the characteristics of the antenna layout showed the correspondence of practical and theoretical results. According to the results, the antenna array was made recommendations for improving the antenna structure for a practical point of view were formulated.

The scientific novelty consist in resulting structure planar antenna element.

References

1. Pak D. A. Antenny bazovyh stancij v sotovyh setjah mobil'noj svjazi // Molodezh'. Nauka. Innovacii. 2022. Т. 1. S. 216 – 218.
2. Kornjuhin V. I. Ploskie pechatnye panel'nye anteny dlja bazovyh stancij / V. I. Kornjuhin, A. V. Fadeeva // Tehnologii informacionnogo obshhestva: Sbornik trudov XVIII Mezhdunarodnoj otraslevoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Moskva 27–28 fevralja 2024 goda. – Moskva: Moskovskij tehniceskij universitet svjazi i informatiki, 2024. S. 75 – 80.
3. Shirokopolosnaja dvuhpoljarizacionnaja antennaja reshetka planarnyh dipolej dlja bazovyh stancij mobil'noj svjazi / K. V. Kobrin Z. Li, V. A. Sledkov, M. B. Manuilov // Zhurnal radiojelektroniki. 2024. № 1.
4. Vlasenko V. I. Dvuhpoljarizacionnaja antenna dlja bazovoj stancii podvizhnoj radiosvjazi / V. I. Vlasenko, S. V. Dvornikov // Telekommunikacii. 2021. № 5. S. 8 – 16.
5. Kochetkov V. A. Chislennye metody i instrumenty modelirovanija antennyh reshetok RJeS SVCh diapazona / V. A. Kochetkov, I. V. Soldatikov // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. 2021. № 9. S. 91 – 101.

¹Roman U. Borodulin, Dr.Sc. (in Tech.), Associate Professor, Associate Professor of the Radiocommunications of the Military Academy of Communications, Saint-Petersburg, Russia. E-mail: borodulroman@yandex.ru

²Nikolay O. Lukyanov, Ph.D. (in Tech.), Senior Lecturer of the Department of Radio Communication of the Military Academy of Communications, Saint-Petersburg, Russia. E-mail: lukyanovno@yandex.ru

³Danila A. Lyanguzov, Ph.D. (in Tech.), Head of department (organization training scientific pedagogical personnel) of Military Academy of Communications, Saint-Petersburg, Russia. E-mail: danilalgz@yandex.ru

6. Dubovickij M. A. Optimizacija protjazhennoj antennoj reshetki iz aperturnyh jelementov po kriteriju minimizacii urovnja difrakcionnogo izlucheniya / M. A. Dubovickij, M. S. Mihajlov // Molodjozh' i budushhee aviacii i kosmonavtiki: sbornik annotacij konkursnyh rabot XIV Vserossijskij mezhotraslevoj molodjozhnyj konkurs nauchno-tehnicheskikh rabot i proektov, Moskva, 21–25 nojabrja 2022 goda. – Moskva: Izdatel'stvo "Pero", 2022. S. 97 – 98.
7. Kochetkov V. A. Chislennye metody i instrumenty modelirovaniya antennyh reshetok RJeS SVCh diapazona / V. A. Kochetkov, I. V. Soldatkov // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – 2021. № 9. S. 91 – 101.
8. Algoritmy approksimacii jelektromagnitnogo polja i sinteza diagramm napravlenosti antennyh reshetok / I. A. Barannikov, Ju. G. Pasternak, V. A. Pendjurin, S. M. Fedorov // Jelektromagnitnye volny i jelektronnye sistemy. 2024. T. 29, № 1. S. 56 – 74.
9. Artemov M. L. Napravlenija sovershenstvovanija harakteristik perspektivnyh antennyh sistem / M. L. Artemov, O. V. Afanas'ev M. P. Slichenko // Radiotehnika. 2023. T. 87, № 5. S. 184 – 198.
10. Perspektivy miniatjurizacii razmerov jelektricheski malyh antenn v uslovijah ogranichenij na polosy rabochih chastot / V. F. Los', I. O. Porohov, S. V. Agasieva, G. A. Gudkov // Jelektromagnitnye volny i jelektronnye sistemy. 2023. T. 28, № 4. S. 57 – 76.

