

Научная статья

УДК 621.396.674.3

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-4-51-66>

EDN:AEIIDH



Разработка секторной антенны для базовой станции сотовой связи с антенным элементом на диэлектрической подложке

Николай Олегович Лукьянов¹, lukyanovNO@yandex.ru

Данила Андреевич Лянгузов² ✉, lyanguzov.da@sut.ru

Артём Геннадьевич Чернышов², chernyshov.ag@sut.ru

¹Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность темы состоит в необходимости развития сетей сотовой связи, что с одной стороны, ставит перед инженерами задачу по разработке антенных устройств, обеспечивающих необходимую дальность связи, а с другой стороны, накладывает ограничения на линейные размеры излучателей с сохранением требований по простоте изготовления и надежности эксплуатации, с учетом неблагоприятных погодных условий. В условиях перехода к стандартам связи нового поколения возникает потребность в создании антенных систем, способных работать в широком диапазоне частот и обеспечивать устойчивый уровень сигнала при высокой плотности абонентов. Особую значимость приобретает разработка антенных решеток, позволяющих формировать заданные диаграммы направленности и обеспечивать равномерное покрытие обслуживаемой территории.

Цель исследования заключается в разработке малогабаритной антенной решетки с требуемыми электрическими характеристиками. Антенные элементы должны отличаться технологичностью изготовления.

В качестве численных методов для вычисления электрических характеристик антенны использованы **метод конечных элементов** и **метод конечных разностей во временной области**. Для решения задачи сокращения линейных размеров антенного элемента с сохранением направленных и диапазонных свойств применен **градиентный метод оптимизации**.

Результатом исследования является полноразмерный экспериментальный образец линейной антенной решетки базовой станции сотовой связи. Его конструкция и характеристики обоснованы в данной работе.

Научная новизна: описание методики нового подхода в изготовлении элемента антенны, отличающегося от существующих использованием специальной подстилающей вставки под каждый элемент антенной решетки.

Практическая значимость результатов научного исследования заключается в разработке антенной решетки, имеющую безыскаженную диаграмму направленности в диапазоне частот 1710–2700 МГц и коэффициент усиления не менее 15 дБ.

Ключевые слова: антенна, антенная решетка, диполь, сотовая связь, метод конечных разностей во временной области, метод конечных элементов

Ссылка для цитирования: Лукьянов Н.О., Лянгузов Д.А., Чернышов А.Г. Разработка секторной антенны для базовой станции сотовой связи с антенным элементом на диэлектрической подложке // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 4. С. 51–66. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-4-51-66. EDN:AEIIDH

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-4-51-66>

EDN:AEIIDH

Development of a Sector Antenna for a Cellular Base Station with an Antenna Element on a Dielectric Substrate

 **Nikolay O. Lukyanov**¹, LukyanovNO@yandex.ru **Danila A. Lyanguzov**² ✉, lyanguzov.da@sut.ru **Artem G. Chernyshov**², chernyshov.ag@sut.ru

¹Telecommunications Military Academy,
St. Petersburg, 194064, Russian Federation

²The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Annotation

The relevance of the topic is to develop cellular networks, which, on the one hand, requires the development of antenna devices that provide the required communication range, and on the other hand, imposes restrictions on the linear dimensions of emitters while maintaining the requirements for ease of manufacture and reliability of operation, taking into account adverse weather conditions. With the transition to next-generation communication standards, there is an increasing demand for antenna systems capable of operating over a wide frequency range and providing a stable signal level under high subscriber density. Of particular importance is the development of antenna arrays that allow the formation of specified radiation patterns and ensure uniform coverage of the serviced area.

The goal is to develop a small-sized antenna array with the required electrical characteristics. Antenna elements should be distinguished by manufacturability. **The finite element method (FEM) and the finite difference method in the time domain (FDTD)** are used as numerical methods for calculating the electrical characteristics of the antenna. **The gradient optimization method** is used to solve the problem of reducing the linear dimensions of the antenna element while maintaining directional and range properties.

The result of the study is a full-size experimental sample of a linear antenna array of a cellular base station. Its design and characteristics are substantiated in this work.

Novelty: description of the method of a new approach to the manufacture of an antenna element, which differs from existing ones by using a special underlying insert under each element of the antenna array.

The practical significance of the results of scientific research lies in the development of an antenna array with a distortion-free directional diagram in the frequency range of 1710–2700 MHz and a gain of at least 15 dB.

Keywords: antenna, antenna array, dipole, cellular communication, FDTD, FEM

For citation: Lukyanov N.O., Lyanguzov D.A., Chernyshov A.G. Development of a Sector Antenna for a Cellular Base Station with an Antenna Element on a Dielectric Substrate. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(4):51–66. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-4-51-66. EDN:AEIIDH

Введение

Мобильная сотовая связь и высокоскоростной интернет стали неотъемлемой частью человеческого общества, затрагивающей широкий спектр его деятельности. Полноценная жизнь человека в современном мире невозможна без сотовой связи. Одним из проблемных вопросов обеспечения мобильной радиосвязи является необходимость формирования системы ретрансляторов и базовых

станций. Антенные системы базовых станций сотовой связи играют важнейшую роль в приеме и передаче радиосигнала. Дальность, качество связи и скорость приема и передачи информации существенно зависят от электрических параметров антенн. Линейные антенные решетки секторных антенн базовых станций являются сложной конструкцией, требующей соблюдения множества па-

раметров. Их разработка требует широкого спектра знаний в области технической электродинамики. Параметры антенн, такие как ширина главного лепестка диаграммы направленности (ДН), кроссполяризационная характеристика, коэффициент усиления (КУ), коэффициент стоячей волны в фидере, существенно зависят от конструкции излучающей поверхности элемента антенной решетки, формы и размеров рефлектора, конструктивных элементов секторной антенны, находящихся в непосредственной близости от излучателя. В Российской Федерации руководящими документами^{1, 2, 3} определены достаточно высокие требования к электрическим характеристикам (ЭХ) антенн базовых станций сотовой связи, а именно:

- коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) в фидере с волновым сопротивлением ($\rho_{\text{ф}}$) 50 или 75 Ом не должен превышать 1,5 ($k_{\text{св}} \leq 1,5$);
- 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;
- уровень поляризационной развязки в главном направлении излучения для антенн, функционирующих с двумя ортогональными поляризациями, должен составлять величину не менее 17 дБ;
- для антенн с секторной ДН коэффициент усиления G должен удовлетворять следующему условию $G \leq 10 \lg (360^\circ / \Delta\varphi^\circ) + 13$ дБи.

Соблюдение данных условий позволяет добиться необходимых дальности и качества связи.

Развитие систем сотовой связи и освоение новых радиочастотных диапазонов требует создания новых антенных систем. При проектировании секторных антенн базовых станций сотовой связи применяется технология разнесенной поляризации [1], для этого разрабатываются антенные элементы с линейной поляризацией. Они расположены ортогонально друг другу под углами $\pm 45^\circ$ относительно нормали к поверхности земли. Это позволяет повысить пропускную способность канала [2]. Кроме того, для обеспечения работы в нескольких поддиапазонах в современных базовых станциях все чаще применяются широкополосные антенные элементы. Востребованным и широко используемым является диапазон частот 1700–2700 МГц, здесь применяются как металлические, так и изготовленные по технологии печатных плат антенные элементы.

В [3–13] приведено описание различных антенных элементов, имеющих как отличия (в основном это форма излучающей поверхности и схема питания), так и выраженные общие сходства. В большинстве случаев используются ортогональные диполи, расположенные над рефлектором. Излучающая поверхность таких антенн находится в плоскости рефлектора, а плечи имеют с последним короткозамкнутую линию. Секторная антенна является линейной антенной решеткой с рефлектором. Учитывая диапазон рабочих частот, а также высокие требования по согласованию, развязке и параметрам характеристики направленности (ХН), необходимо точно соблюдать расчетные размеры, геометрию элементов антенны и их взаимное расположение в линейной решетке.

Постановка задачи на разработку антенной решетки с антенным элементом на диэлектрической подложке

Проектирование антенной решетки сводится к решению задач разработки и оптимизации элемента антенной решетки, линейной антенной решетки с рефлектором и высокочастотного делителя мощности [14].

При решении первой подзадачи необходимо добиться наименьших размеров излучающей поверхности антенного элемента, при сохранении заданных характеристик.

Этапы оптимизации:

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

С учетом вышеизложенного сформулируем требования к излучающему элементу секторной антенны для базовых станций сотовой связи:

во-первых, КСВН в фидере с волновым сопротивлением 50 Ом не должен превышать 1,5 в полосе частот 1710–2700 МГц;

во-вторых, величина развязки между входами / выходами для антенных элементов, функционирующих на двух ортогональных поляризациях или в двух и более диапазонах частот, должна составлять величину не менее 25 дБ в заданной полосе частот.

В качестве излучателя выберем ортогональные симметричные вибраторы над рефлектором, излучающие поверхности которых расположены в плос-

¹ ГОСТ Р 56154-2014 Антенны приемопередающие для центровых (базовых) и мобильных радиостанций сухопутной подвижной радиосвязи и их характеристики». М.: Стандартинформ, 2014.

² Руководящий документ РД 45.261-2002 «Антенны базовых станций систем сотовой подвижной связи. Технические требования». Утв. Минсвязи РФ. 2002.

³ Приказ Мининформсвязи РФ от 23.11.2006 № 153 «Требования к параметрам антенн для базовых станций систем подвижной радиотелефонной связи».

кости рефлектора. Учитывая, что излучатель состоит из двух ортогональных элементов, а именно из излучателя и симметрирующего устройства на специальной стойке, удобно изготавливать антенное устройство на основе технологии печатных плат, используя диэлектрические подложки из материала FR4 с медным напылением. В данном случае высока вероятность получения требуемых параметров и характеристик антенны с высокой точностью. Такие антенны достаточно просто изготовить. Пример и схема антенного устройства, выбранного в качестве исходного элемента для оптимизации, представлена на рисунке 1.

Исходя из требований, предъявляемых к характеристикам секторных антенн базовых станций для антенного элемента, важнейшими параметрами являются КСВН и ДН. Требуется добиться оптимальной формы излучающей поверхности, что даст нужные ЭХ антенны (см. рисунок 1а). Для этого разделим поверхность прямоугольного плеча антенны на несколько элементов: первый элемент со сторонами s_1, s_2 и длиной l_1 , который связан электрически со вторым отрезком со сторонами s_2, s_3 и длиной l_2 , который, в свою очередь,

связан электрически с третьим отрезком со сторонами s_3, s_4 и длиной l_3 . Плечи ортогональных вибраторов по умолчанию примем симметричными. Параметры, подлежащие оптимизации, определим через значения ширины отрезков s_1, s_2, s_3 и s_4 , а также длин отрезков, соответственно, l_1, l_2 и l_3 .

Одним из важных параметров симметричного вибратора, влияющих на согласование антенны в полосе частот, является расстояние между плечами вибратора (питающий зазор z). Кроме того, симметричный вибратор расположен над рефлектором на определенной высоте, которая также является важным параметром; от ее величины зависит как согласование, так и форма, а также направленные свойства ДН. Как показали предварительные расчеты и выводы из различных источников [3–13], сама форма рефлектора также будет оказывать влияние на характеристики антенны. П-образный отражатель прямоугольной формы выберем в качестве рефлектора. Рефлектор возьмем шириной 150 мм, одним из параметров оптимизации рассмотрим высоту его П-образных краев.

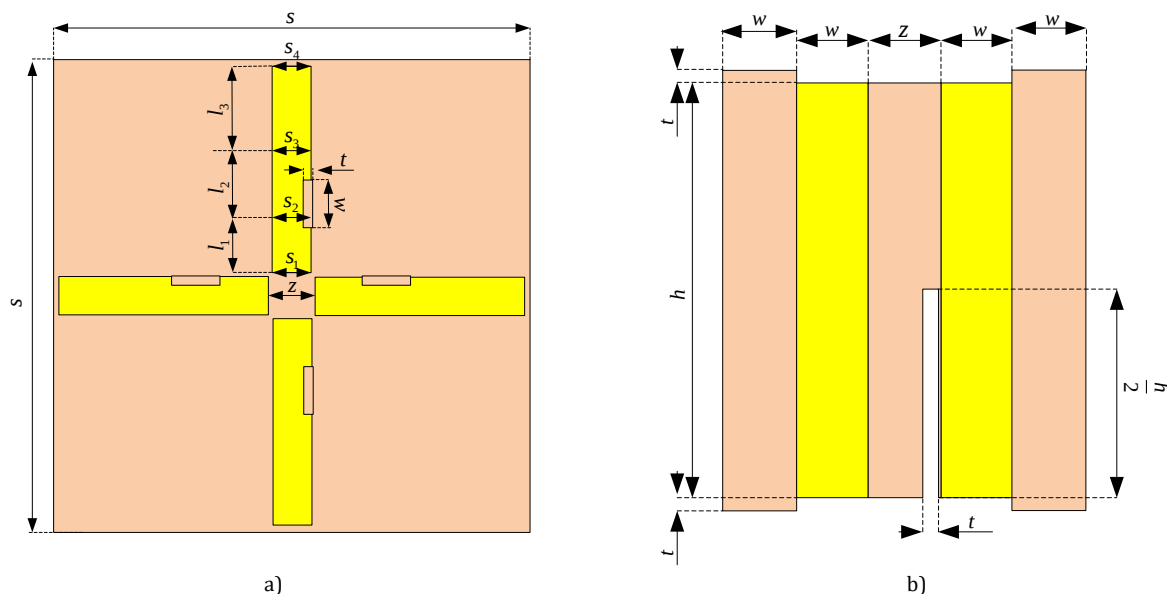


Рис. 1. Схема прототипа излучателя: а) излучатель; б) стойка с симметрирующим устройством

Fig. 1. Schematic Diagram of the Emitter Prototype: a) Emitter; b) Rack with Balancing Device

Расчет электрических характеристик антенного элемента

Требуется решить многокритериальную задачу при поиске оптимального размера излучателя. Воспользуемся градиентным методом оптимизации.

Определим критерии оптимизации.

1) КСВН в фидере с волновым сопротивлением 50 Ом ($\rho_{feed} = 50 \text{ Ом}$), не превышающим значения

1,5 ($k_{VSVR} \leq 1,5$) в полосе частот 1710–2700 МГц.

2) Коэффициент развязки между входами / выходами k_{S21} для ортогонально расположенных антенных элементов, значение которого во всей полосе частот не должно превышать – 25 дБ или 0,06 ($k_{S21} \leq 0,06$).

Определим пределы, в которых будут осуществляться поиски оптимальных размеров излучателя. Область выбора параметров должна быть достаточной для решения задачи, но с другой стороны – минимальной для снижения трудоемкости и времени решения задачи.

Зададим пределы изменения параметров:

- 1 мм ≤ s_1 ≤ 10 мм, с шагом $\Delta s_1 = 1$ мм;
- 10 мм ≤ s_2 ≤ 30 мм, с шагом $\Delta s_2 = 1$ мм;
- 10 мм ≤ s_3 ≤ 30 мм, с шагом $\Delta s_3 = 1$ мм;
- 10 мм ≤ s_4 ≤ 30 мм, с шагом $\Delta s_4 = 1$ мм;
- 1 мм ≤ l_1 ≤ l_2 , с шагом $\Delta l_1 = 1$ мм;
- 5 мм ≤ l_2 ≤ l_3 мм, с шагом $\Delta l_2 = 1$ мм;

- 10 мм ≤ l_3 ≤ 35 мм, с шагом $\Delta l_3 = 1$ мм;
- 2 мм ≤ z ≤ $s_1 + 1$ мм; с шагом $\Delta z = 1$ мм;
- 30 мм ≤ h ≤ 40 мм, с шагом $\Delta h = 1$ мм;
- 5 мм ≤ h_{ref} ≤ 40 мм, с шагом $\Delta h_{ref} = 5$ мм;
- 1 мм ≤ w ≤ 10 мм, с шагом $\Delta w = 1$ мм.

С учетом заданных параметров и критериев оптимизации, целевая функция примет вид (1), где, n – количество отсчетов по частоте рабочего диапазона радиостанции; k_{VSVR} = 1,5 – требуемое значение КСВН; k_{VSVR_i} – значение КСВН на i -м шаге итерации; k_{S21} – требуемое значение коэффициента развязки; k_{S21_i} – значение коэффициента развязки на i -м шаге итерации.

$$f(m_{opt}) = \min_{m_{opt}} \left(\sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{k_{VSVR_i}(m_{opt})}{n} - k_{VSVR} \right) + \left(\frac{k_{S21_i}(m_{opt})}{n} - k_{S21} \right) \right) \right), \quad (1)$$

при $m_{opt} = (s_{1_opt}, s_{2_opt}, s_{3_opt}, s_{4_opt}, l_{1_opt}, l_{2_opt}, l_{3_opt}, z, h_{opt}, h_{ref_opt})$.

При разработке компьютерной модели антенны и проведении расчетов использовались численные методы электродинамики. Сходимость результатов расчетов проверена методом конечных разностей во временной области (КРВО) и методом конечных элементов (МКЭ).

При решении задачи получены геометрические размеры антенны:

- $s_1 = 5$ мм, $s_2 = 18$ мм, $s_3 = 24$ мм, $s_4 = 24$ мм,
- $z = 6$ мм, $l_1 = 7$ мм, $l_2 = 9$ мм, $l_3 = 20$ мм,
- $w = 6$ мм, $h = 37$ мм, $h_{ref} = 30$ мм, $t = 1$ мм.

Общие размеры диполя составили: длина 59 мм, ширина 24 мм, размеры общей диэлектрической подложки для размещения ортогональных диполей составил квадрат с длиной стороны $s = 61$ мм, высота над рефлектором h составила 37 мм. Общая схема и оптимизированная форма антенны представлена на рисунке 2.

Для защиты от вредного воздействия неблагоприятных факторов окружающей среды антенную решетку целесообразно изготавливать в радиопрозрачном корпусе, используя при этом пластик или текстолит. Как экспериментальный образец была разработана модель пластикового радиопрозрачного корпуса, внешний вид представлен на рисунке 3. В качестве материала задана модель из ABS пластика со значением относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{ABS} = 2,9$.

В результате проведенных дополнительных расчетов были получены следующие окончательные результаты, с учетом влияния пластикового защитного корпуса, размеры антенны составили:

- $s_1 = 5$ мм, $s_2 = 18$ мм, $s_3 = 23$ мм, $s_4 = 23$ мм,
- $z = 6$ мм, $l_1 = 7$ мм, $l_2 = 9$ мм, $l_3 = 19,5$ мм,
- $w = 6$ мм, $h = 36$ мм, $h_{ref} = 30$ мм, $t = 1$ мм.

Предварительные расчеты проводились без учета влияния пластикового защитного радиопрозрачного корпуса на ЭХ антенного элемента.

Обобщенная модель антенного элемента антенной решетки включает в себя следующие составные части: 1 – антенна на диэлектрической подложке; 2 – симметрирующее устройство; 3 – линия питания антенн; 4 – рефлектор. Схема антенного устройства, рассчитанная с учетом радиопрозрачного корпуса и доработанной схемой питания, представлена на рисунке 4.

Излучающая поверхность антенны представляет собой два ортогональных оптимизированных полосковых диполя длиной $l = 59$ мм и шириной $s = 24$ мм, расположенных под диэлектрической подложкой в форме квадратной пластины с длинами сторон 60×60 мм и толщиной 1 мм. Антенна расположена над рефлектором П-образной формы с размерами 150×150 мм и высотой бортов 30 мм. Рефлектор и плечи диполей связаны электрически с помощью полосковых линий каждая шириной 6 мм, расположенных на диэлектрических стойках длиной 36 мм, что соответствует высоте подвеса антенны над рефлектором. Ортогональные излучатели запитаны с помощью коаксиальных кабелей, электрически связаны с симметрирующим устройством, а между плечами антенны проходят переходные полосковые линии питания.

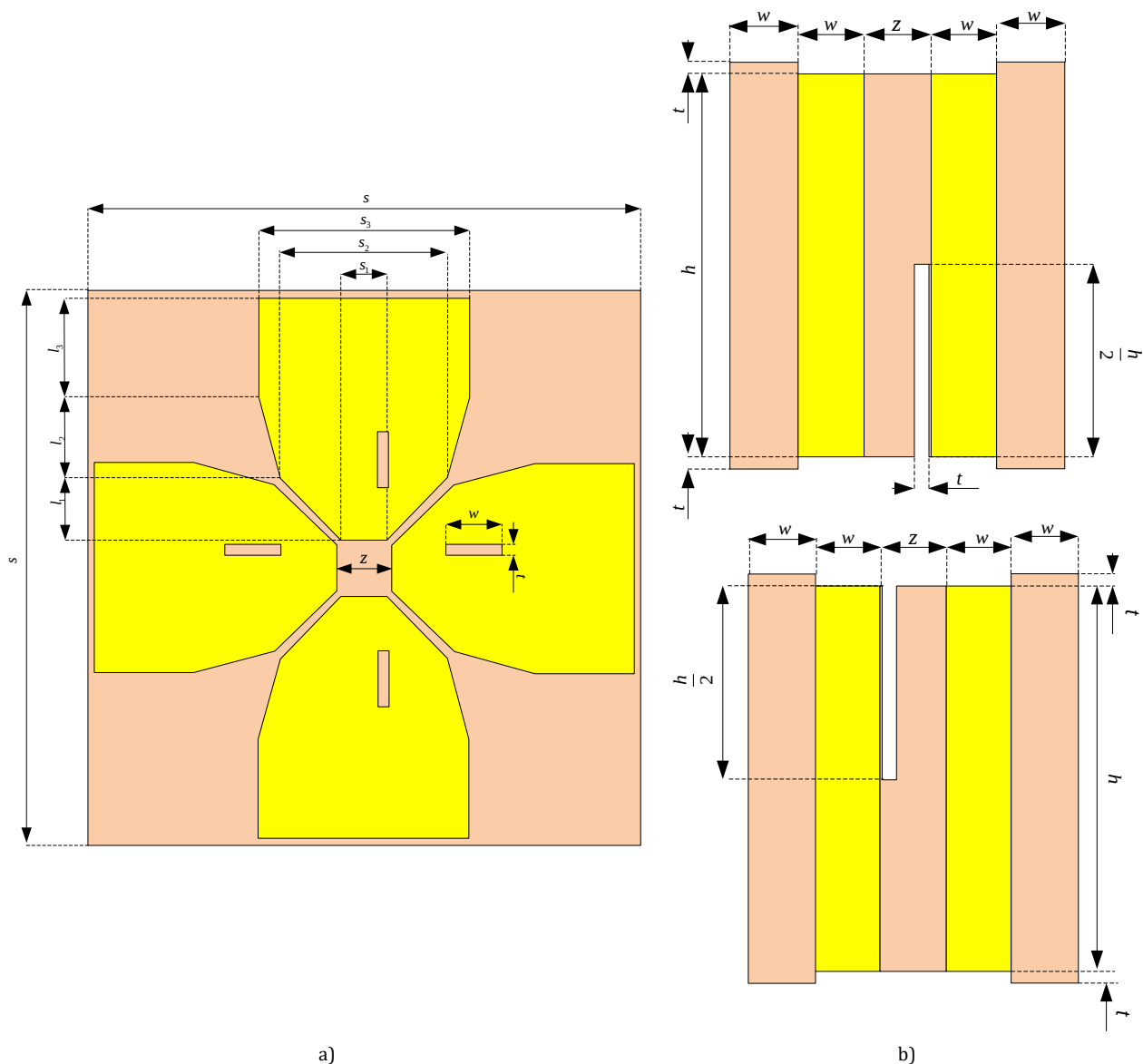


Рис. 2. Результаты оптимизации. Внешний вид ортогональных полосковых вибраторов: а) излучатели; б) симметрирующее устройство (из двух частей, соединяемых через прорезь)

Fig. 2. Optimization Results. External Appearance of Orthogonal Strip Vibrators: a) Emitters; b) Balancing Device (of Two Parts Connected through a Slot)

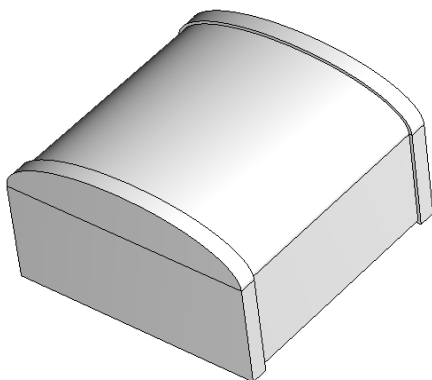


Рис. 3. Общий вид радиопрозрачного корпуса для одного элемента антенной решетки

Fig. 3. General View of the Radio-Transparent Housing for One Element of the Antenna Array

Форма и широкие полосковые пластины плеч диполя позволяют добиться согласования в требуемой полосе частот. График КСВН представлен на рисунке 5а. В соответствии с расчетами, требования, предъявляемые к элементам антенной решетки по КСВН, полностью удовлетворены. Более того, для компенсации погрешностей при построении экспериментального образца имеется запас по ширине полосы частот. Рассчитанный элемент антенной решетки обеспечит согласование по КСВН не выше 1,4 ($k_{св} \leq 1,4$) для требуемой полосы частот, что даст выигрыш в энергетических характеристиках антенной системы. График зависимости коэффициента развязки в полосе частот, определяющий пригодность разрабатываемой антенны, представлен на рисунке 5б.

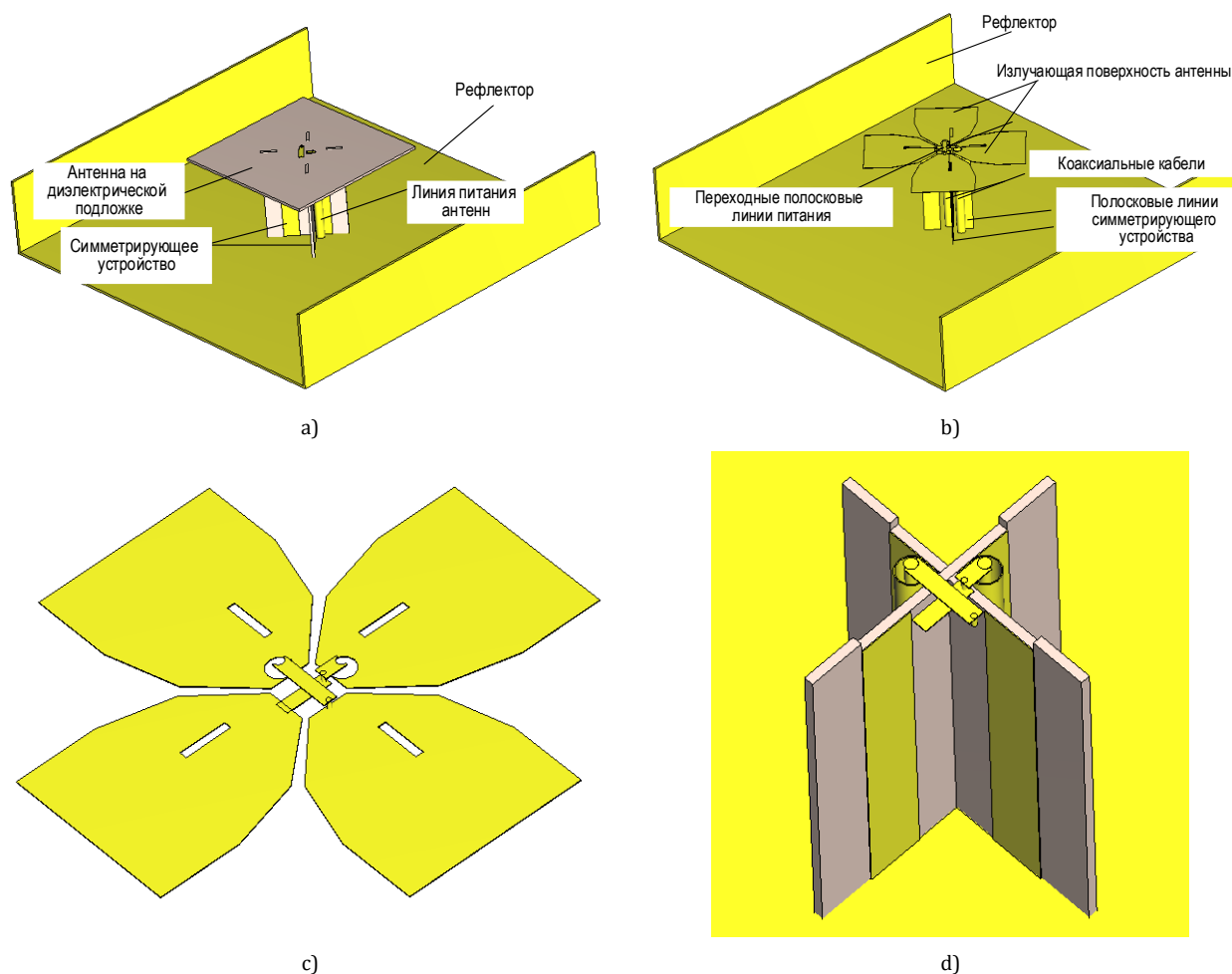


Рис. 4. Общая схема построения широкополосного ортогонального диполя над рефлектором: а) общий внешний вид антенны; б) металлическая часть антенны; в) вид излучающей поверхности с полосковой схемой питания между плечами диполя; д) стойка с симметрирующим устройством и линиями питания ортогональных диполей

Fig. 4. General Scheme of Construction of a Broadband Orthogonal Dipole Over a Reflector: a) General Appearance of the Antenna; b) Metal Part of the Antenna c) View of The Radiating Surface with a Strip Feeding Circuit Between the Dipole Arms d) Stand with a Balun and Feeding Lines of Orthogonal Dipoles

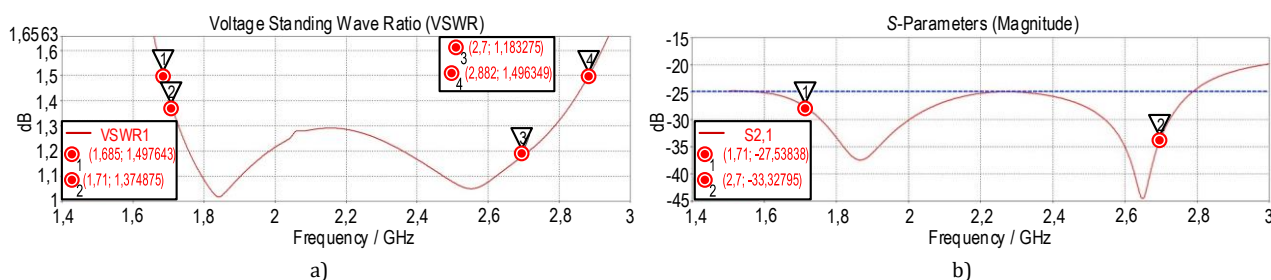


Рис. 5. Частотные распределения КСВН в фидере с волновым сопротивлением 50 Ом (а) и коэффициента согласования между ортогональными излучателями элемента антенной решетки (б)

Fig. 5. Frequency Distributions of VSWR in a Feeder with a Wave Impedance of 50 Ohm (a) and Frequency Distribution of The Matching Coefficient Between Orthogonal Radiators of An Antenna Array Element (b)

Развязка между ортогональными диполями в заданной полосе частот не превышает -25 дБ. Как показали расчеты и проведенный анализ, она зависит от формы рефлектора, а также формы и электрических параметров пластикового корпуса антенной решетки. С увеличением высот бортов коэффициент развязки возрастал. Однако увеличение высоты

бортов позволяет сузить ширину ДН. ДН антенны представлена на рисунке 6. КУ одиночного элемента антенной решетки достигает величины 8 дБ. На верхних частотах диапазона ДН незначительно распадается. Определена высота антенны над рефлектором для обеспечения однонаправленности излучения в заданной полосе частот.

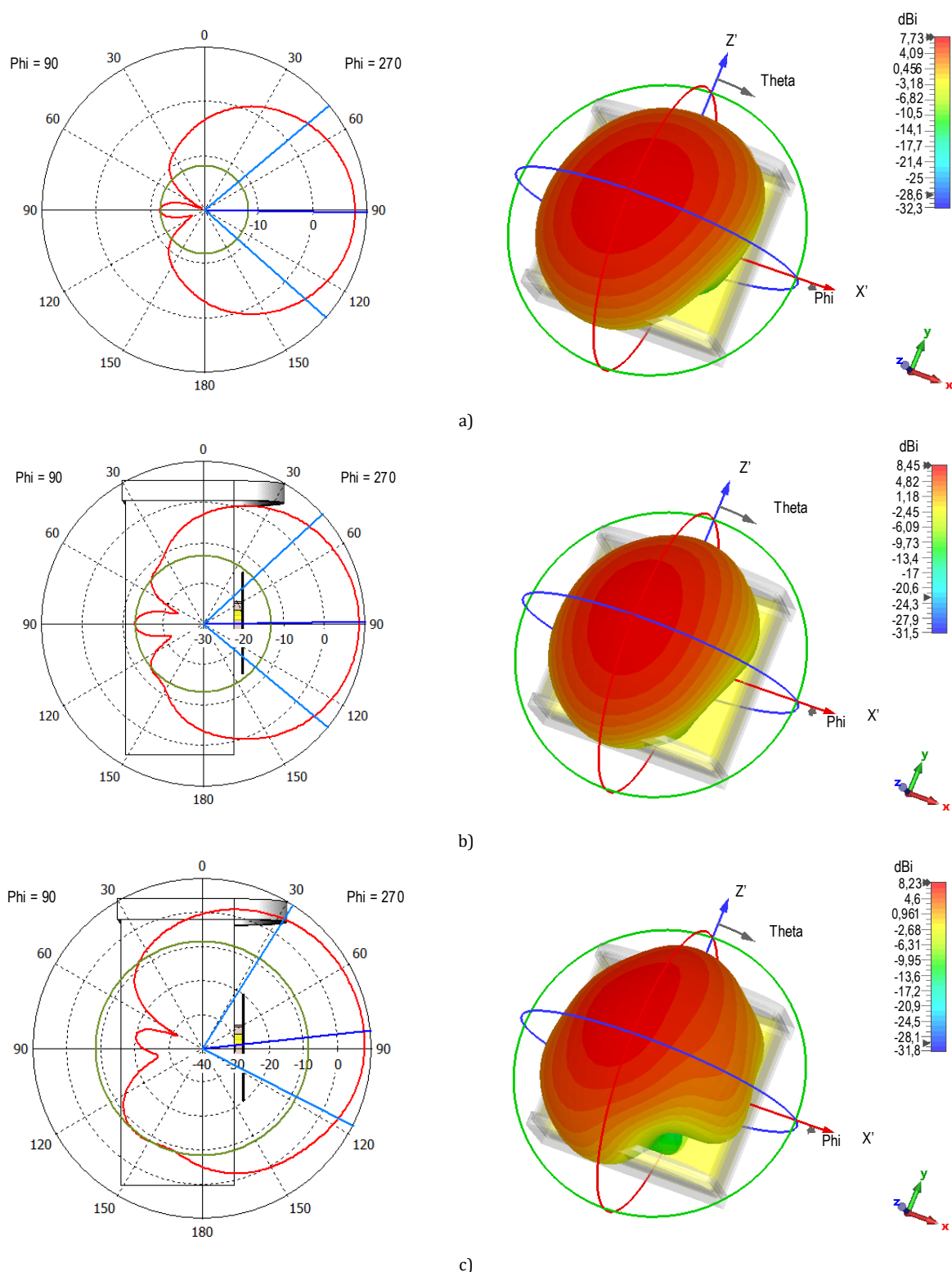


Рис. 6. Диаграмма направленности для одиночного излучателя с поляризацией $+45^\circ$ элемента антенной решетки на различных частотах: а) 1710 МГц; б) 2200 МГц; в) 2700 МГц

Fig. 6. Directional Pattern for a Single Radiator with Polarization Of $+45^\circ$ of the Antenna Array Element at Different Frequencies: 1710 MHz; б) 2200 MHz; в) 2700 MHz

Таким образом, 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

В соответствии с требованиями к секторной антенне базовой станции, она должна работать с коэффициентом усиления не менее 15 дБ в широкой полосе частот. Исходя из этого, для получения требуемого коэффициента усиления достаточно антенной решетки из восьми элементов.

Для минимизации паразитных боковых лепестков и недопущения «развала» главного лепестка ДН, расстояние между элементами антенной решетки l_n следует выбирать из условия $l_n = 0,8\lambda_{\min}$. Так как верхняя граница рабочего диапазона $f_{\max} = 2700$ МГц, тогда $l_n = 89$ мм. На основании расчетов можно сделать вывод, что результат будет достигнут, если расстояние между элементами составит $l_n = 87$ мм. Все расчеты антенной решетки произведены с учетом радиопрозрачного пластикового корпуса. На рисунке 7 представлен общий вид антенной решетки.

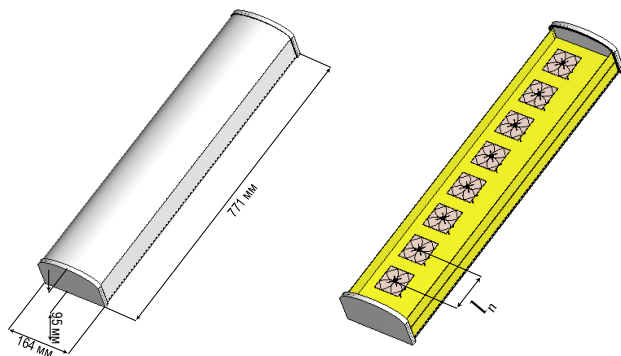


Рис. 7. Общий вид антенной решетки

Fig. 7. General View of the Antenna Array

Система из восьми пар ортогональных излучателей, расположенных над рефлектором П-образной формы, входит в модель антенной решетки. Ниша для антенного делителя и линий питания находится под рефлектором. Результаты расчета КСВН представлены на рисунке 8.

Исходя из результатов расчета, можно сделать вывод, что в полосе частот 1710–2700 МГц КСВН антенной решетки не превышает 1,5, а значение коэффициента развязки ниже –25 дБ (рисунок 9).

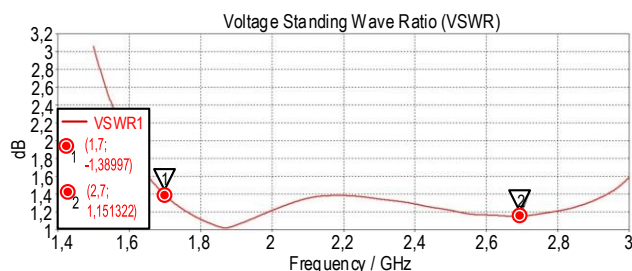


Рис. 8. Коэффициент стоячей волны в фидере с волновым сопротивлением 50 Ом

Fig. 8. Standing Wave Ratio in a Feeder with a Wave Impedance of 50 Ohm

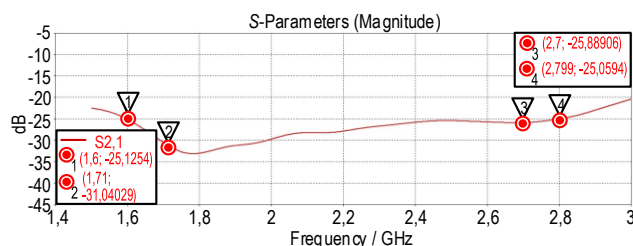


Рис. 9. Коэффициент развязки линейной антенной решетки

Fig. 9. Isolation Coefficient of a Linear Antenna Array

ДН антенной решетки для различных частот рабочего диапазона, а также кроссполаризационная характеристика представлены на рисунках 10 и 11, соответственно.

ДН имеет безыскаженную форму во всем рабочем диапазоне частот, ширина главного лепестка по уровню половинной мощности не превышает 70° , а КУ составляет величину не ниже 15 дБ во всем рабочем диапазоне. Заявленные характеристики позволяют использовать разработанную антенную решетку в качестве антенны для базовой станции сотовой связи. При расчете ЭХ особенности крепления антенного элемента к рефлектору не учитывались: на практике соединение данных элементов методом точечной пайки приведет к ухудшению согласования антенны и потере мощности.

Изготовление экспериментального образца

Для измерения и проверки расчетных характеристик был изготовлен полноразмерный экспериментальный образец линейной антенной решетки базовой станции сотовой связи. Излучатели и стойки были изготовлены с высокой точностью из стеклотекстолитовой платы FR4 с односторонней металлизацией. Изображение антенного элемента представлено на рисунке 12.

Рефлектор и ниша для размещения антенного делителя и линий питания изготовлена из латунного листа толщиной 1 мм. В латунном листе заранее определены посадочные места для установки антенны, а также технологические отверстия для прокладки коаксиального кабеля. Они вырезаны методом лазерной резки. Общий вид размещения антенных элементов над рефлектором представлен на рисунке 13. Пластиковый радиопрозрачный корпус изготовлен на 3D-принтере из ABS пластика с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,9$ (рисунок 14).

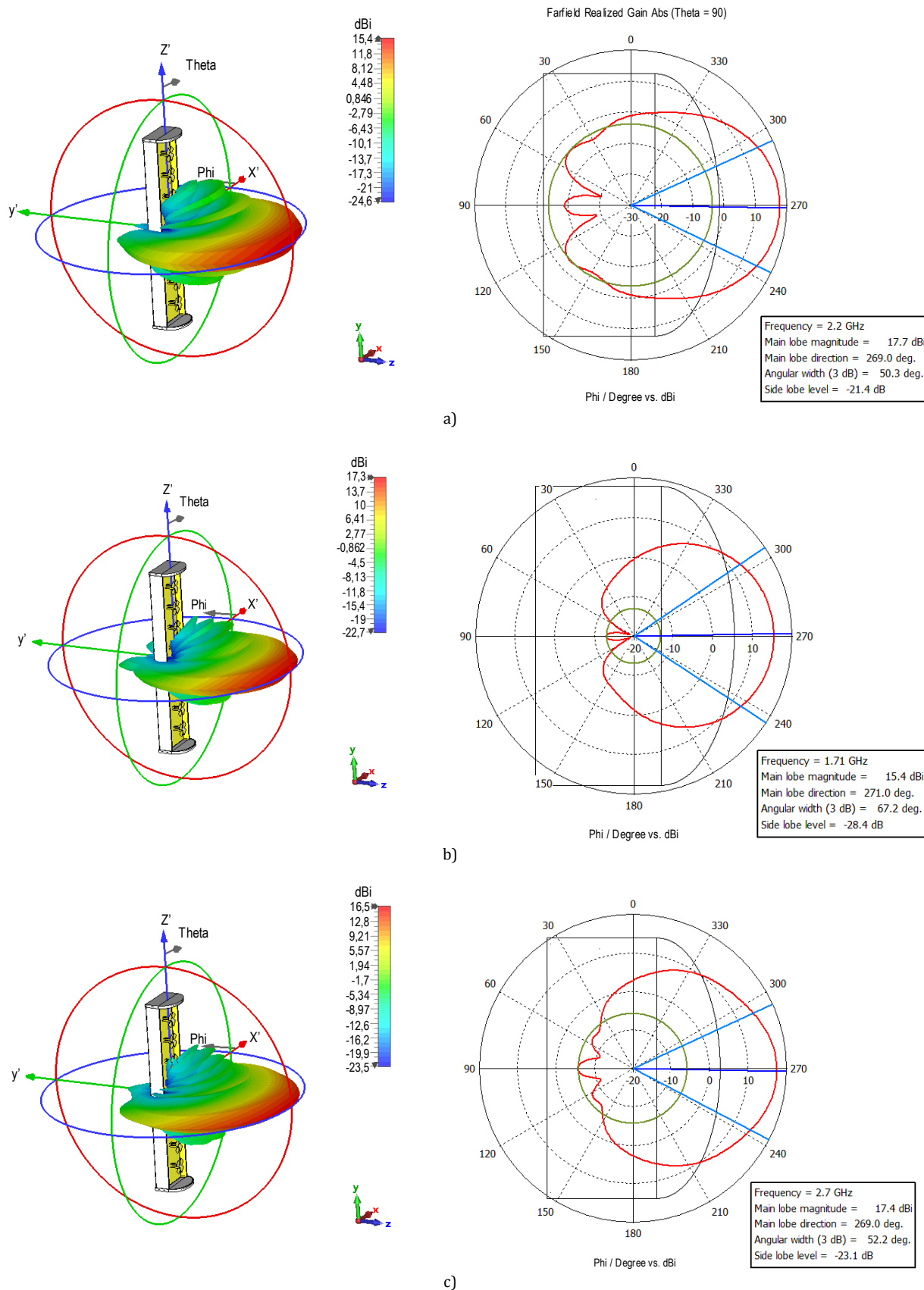


Рис. 10. Диаграмма направленности антенной решетки с поляризацией $+45^\circ$ на различных частотах:
а) 1710 МГц; б) 2200 МГц; в) 2700 МГц

Fig. 10. Directional Pattern of the Antenna Array with Polarization $+45^\circ$ at Different Frequencies: а) 1710 MHz; б) 2200 MHz; в) 2700 MHz

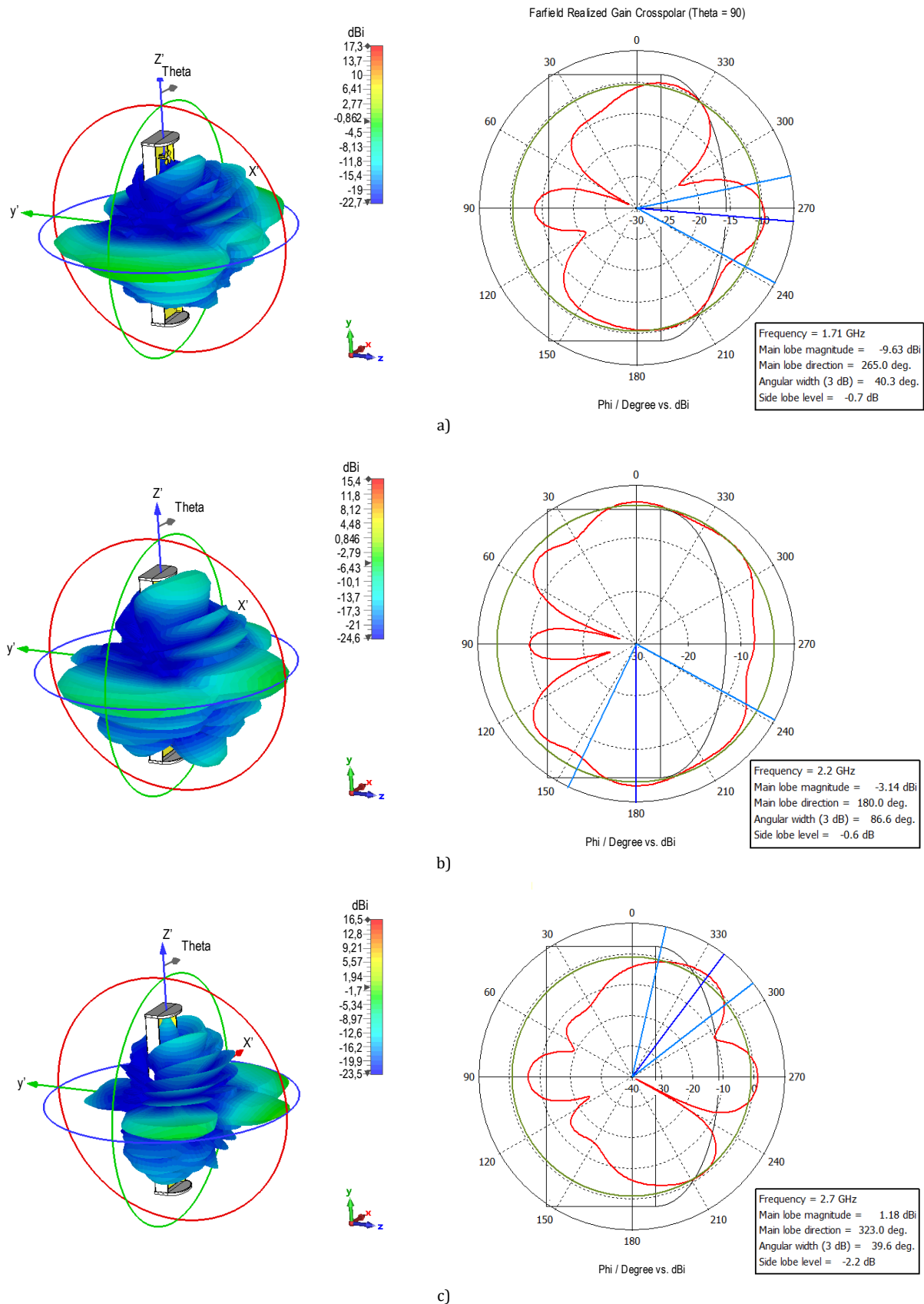


Рис. 11. Кросс-поляризационная характеристика антенной решетки с поляризацией $+45^\circ$ на различных частотах:
а) 1710 МГц; б) 2200 МГц; в) 2700 МГц

Fig. 11. Cross-Polarization Characteristic of the Antenna Array with Polarization $+45^\circ$ at Different Frequencies: а) 1710 MHz; б) 2200 MHz; в) 2700 MHz

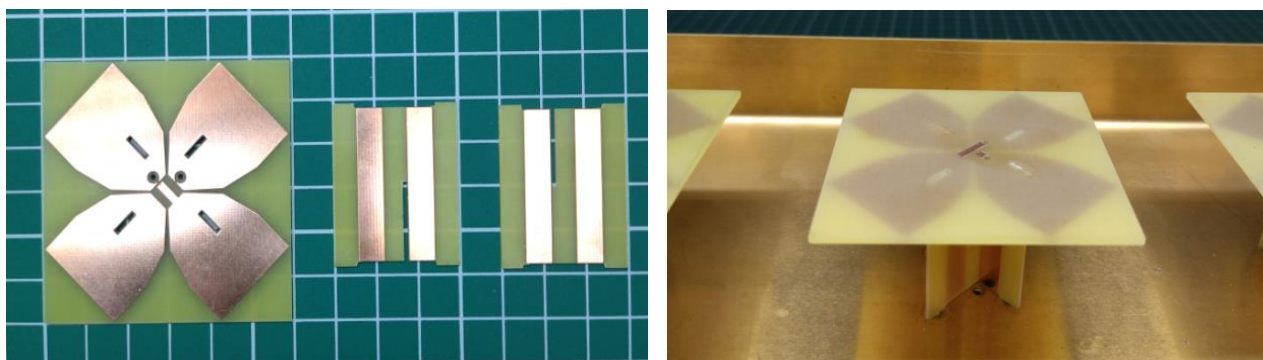


Рис. 12. Внешний вид экспериментального образца антенного элемента

Fig. 12. External Appearance of the Experimental Sample of the Antenna Element

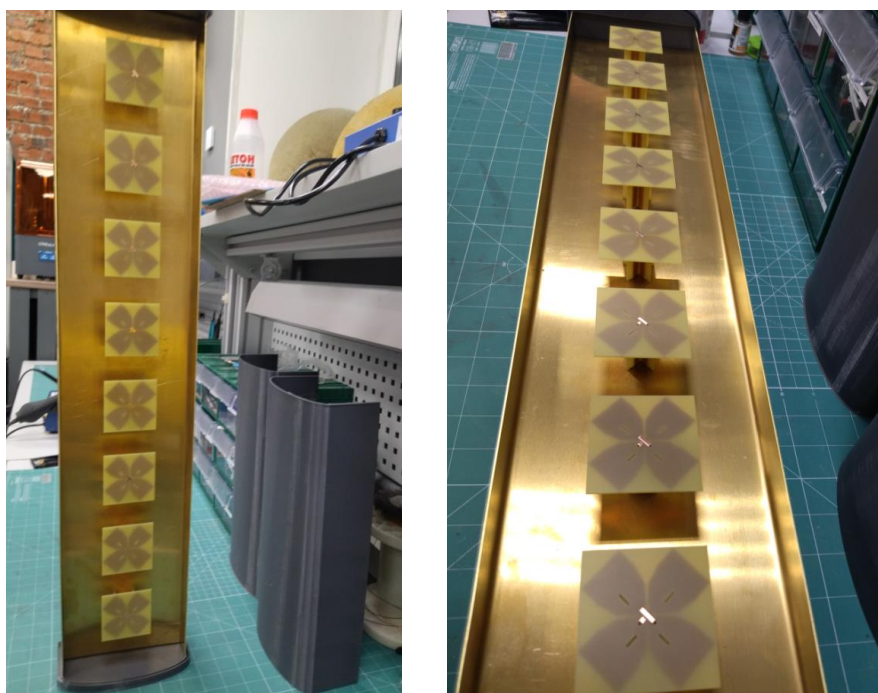


Рис. 13. Расположение элементов антенной решетки над рефлектором

Fig. 13. Arrangement of Antenna Array Elements above the Reflector

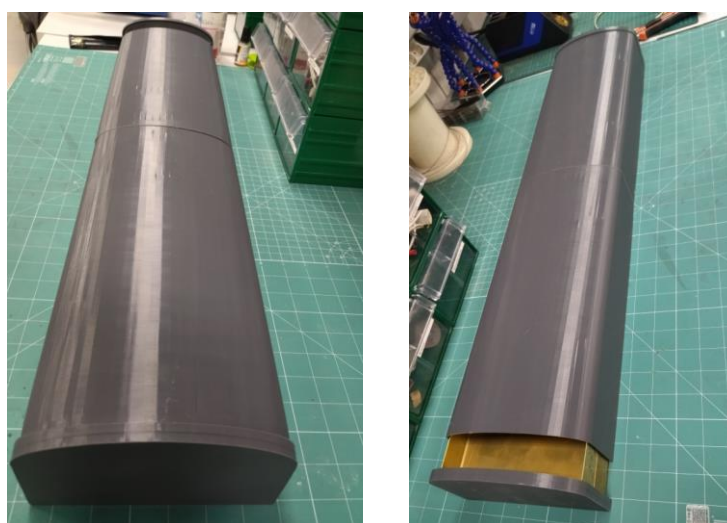


Рис. 14. Сборка радиопрозрачного корпуса

Fig. 14. Assembling a Radio-Transparent Case

Линейная антенная решетка базовой станции сотовой связи должна обеспечивать работу с двумя ортогональными поляризациями -45° и $+45^\circ$. Для этого используется два восьмиканальных делителя, на каждый делитель нагружено по восемь элементов одной поляризации. Чтобы подключить антенны к делителю, используется коаксиальный кабель RG175, 50 Ом. Кабель к делителю подключается через разъемы SMA GSA-1139-RP и KLS1-SMA005. Необходимое количество разъемов, элементов крепления и питания представлено в таблице 1.

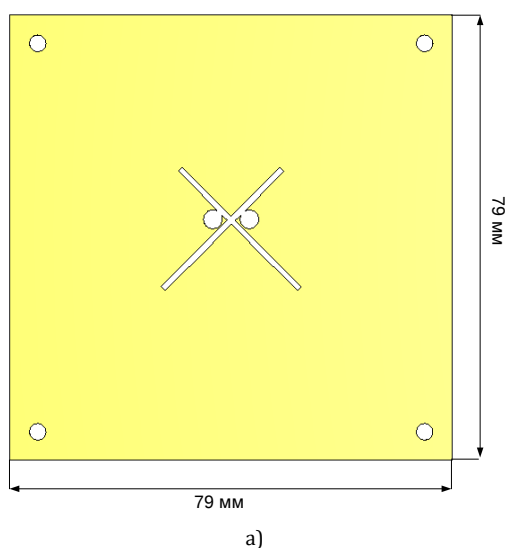
ТАБЛИЦА 1. Расчет числа разъемов, элементов крепления и питания

TABLE 1. Calculation of the Number of Connectors, Fastening Elements and Power Supply

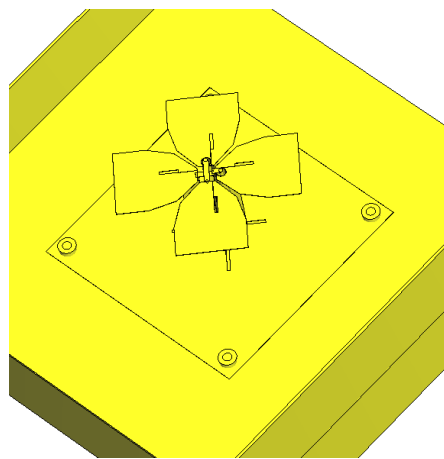
№п/п	Наименование	Маркировка	Количество
1	Коаксиальный кабель	RG175	18 м
2	ВЧ-разъем SMA	GSA-1139-RP	18 шт.
3	ВЧ-разъем SMA	KLS1-SMA005	20 шт.

Первоначальные экспериментальные исследования показали некоторые особенности в моделировании и конструктивной проработке антенной решетки. Из-за необходимости электрического соединения антенного элемента и рефлектора необходима прочная спайка, при этом происходит сильный нагрев места посадки антенны. Для упрощения сборки и повышения надежности конструкции был проведен расчет специальной подстилающей вставки под каждый элемент антенной решетки. Элемент будет крепиться к рефлектору через специальную вставку, электрически связанную с симметрирующим устройством с помощью спайки, вся конструкция антенного элемента будет скреплена с рефлектором с помощью болтов.

Внешний вид компьютерной модели антенны с подстилающей вставкой представлен на рисунке 15. На рисунке 16 представлен экспериментальный образец антенного элемента. На рисунке 17 представлены результаты измерения коэффициента отражения антенного элемента.



a)



b)

Рис. 15. Антенный элемент над подстилающей вставкой: а) подстилающая вставка; б) общий вид проводящей поверхности элемента антенной решетки

Fig. 15. Antenna Element above the Underlying Insert: a) Underlying Insert; b) General View of the Conducting Surface of the Antenna Array Element

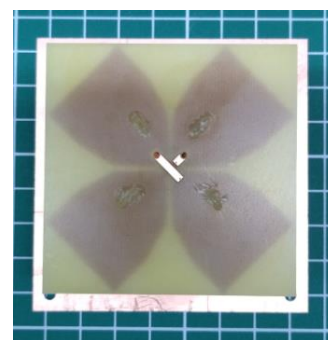
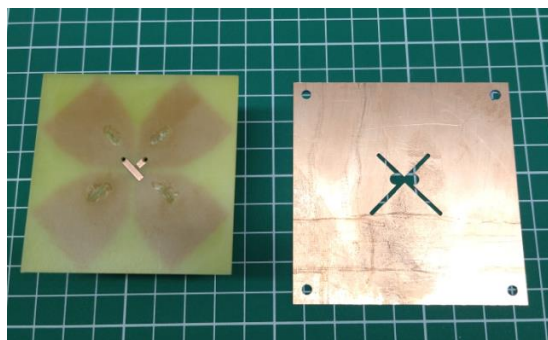


Рис. 16. Внешний вид экспериментального образца элемента антенной решетки

Fig. 16. External Appearance of the Experimental Sample of the Antenna Array Element

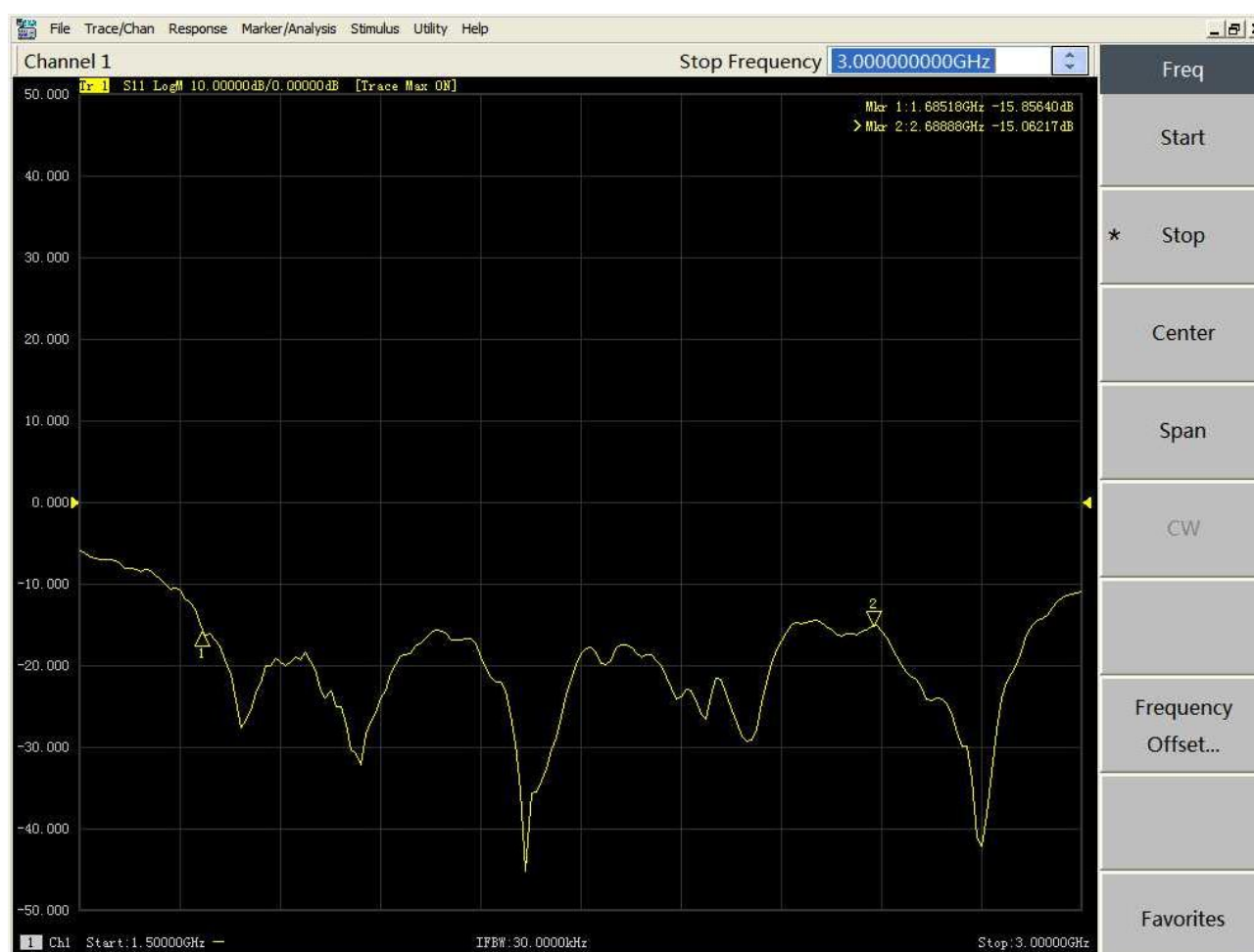


Рис. 17. График коэффициента отражения элемента антенной решетки

Fig. 17. Graph of the Reflection Coefficient of an Antenna Array Element

Направлением дальнейших исследований служит расчет экспериментального образца антенного делителя для полной сборки и измерения электрических характеристик разработанной секторной антенны. Затем будет проведен сравнительный анализ экспериментального образца с некоторыми существующими секторными антеннами. Дополнительно предполагается провести оптимизацию конструкции для работы в условиях реальной эксплуатации, включая влияние внешних факторов, таких как осадки, температура и ветровые нагрузки. Это позволит повысить надежность и долговечность антенны при использовании в базовых станциях операторов сотовой связи.

Заключение

Разработана секторная антенна для базовой станции сотовой связи с антенным элементом на диэлектрической подложке. Проанализированы ее ЭХ, обоснован выбор геометрических размеров. Изготовлен экспериментальный образец. Антенна обладает требуемой направленностью (ширина главного лепестка по уровню половинной мощности не превышает 70° и диапазонность (КУ составляет величину не ниже 15 дБ в диапазоне частот 1710–2700 МГц). Проведенное исследование подтвердило эффективность предложенной конструкции и перспективность для дальнейшего использования.

Список источников

1. Liao B., Liu B., Deng S. A dual-polarized radiation element, antenna and its applications. Chinese Patent, no. CN201610561359.5, 15.07.2016.
2. Zhi N., Li K.-M. Antennas for Base Stations in Wireless Communications. New York, 2009. 372 p.
3. Wu Q., Li H., Wong S.-W., Lin Y.-C., He Y. A Low-Profile Dual-Polarized Dielectric Resonator Antenna for 2G/3G/4G Base Station Applications With Gain Enhancement // Proceedings of the International Workshop on Radio Frequency and Antenna Technologies (iWRF&AT, Shenzhen, China, 31 May – 03 June 2024). IEEE, 2024. PP. 486–488. DOI:10.1109/iWRFAT61200.2024.10594368

4. You C., He Y., Li W., Zhang L. A Novel High-Isolation Positive-and-Negative-45-Degree Dual-Polarization 5G mm Wave Micro Base Station Antenna // *Proceedings of the International Symposium On Antennas And Propagation (ISAP, Kuala Lumpur, Malaysia, 30 October – 02 November 2023)*. IEEE, 2023. PP. 450–454. DOI:10.1109/ISAP57493.2023.10388575
5. Huang W., He Y., Khan A. A Novel Sub-6 GHz and Millimeter Wave Shared-Aperture 5G Base Station Antenna // *Proceedings of the International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China, Hangzhou, China, 15–18 August 2023)*. IEEE, 2023. PP. 1071–1072. DOI:10.23919/ACES-China60289.2023.10249829
6. Liao G., He Y., Song C. A Shared-Aperture Compact Quad-Band Linearly-Polarized Base Station Antenna // *Proceedings of the 12th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP, Nanjing, China, 22–25 September 2024)*. IEEE, 2024. PP. 318–331. DOI:10.1109/APCAP62011.2024.10882098
7. Zhang L., Liu T., He Y. Wideband Dual-Polarized Antenna With Novel Grid Patch for Base Station Applications // *Proceedings of the 12th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP, Nanjing, China, 22–25 September 2024)*. IEEE, 2024. PP. 962–967. DOI:10.1109/APCAP62011.2024.10881000
8. You C., He Y., Li W., Zhang L., Wong S.-W., Zhou Z. Design of Slot-Coupled Broadband 5G mm Wave Base Station Antenna Based on Double-Layer Patch // *Proceedings of the International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP, Guangzhou, China, 27–29 November 2022)*. IEEE, 2022. DOI:10.1109/IMWS-AMP54652.2022.10106844
9. Huang W., He Y., Li W., Zhang L., Wong S.-W., Zeng Z. A Low-Profile Dual-Polarized Wideband Antenna for 5G Massive MIMO Base Station // *Proceedings of the International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM, Guangzhou, China, 28–30 November 2021)*. IEEE, 2021. PP. 2367–2371. DOI:10.1109/iWEM53379.2021.9790399
10. Li R., He Y., Song C. A Broadband SIW-Based Filtering Antenna for 5G mmWave Base Station Application // *Proceedings of the International Workshop on Antenna Technology (iWAT, Sendai, Japan, 15–18 April 2024)*. IEEE, 2024. PP. 351–353. DOI:10.1109/iWAT57102.2024.10535836
11. Tu Z., Cui Y., Li R. A Compact Dual Broadband Shared-Aperture Antenna Array for 5G Base Station Applications // *Proceedings of the Conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA, Guangzhou, China, 14–17 December 2022)*. IEEE, 2022. PP. 2767–2774. DOI:10.1109/CAMA56352.2022.10002619
12. Li H., Xu J., Nan Y., Chen Q. Zhou C. Low-Profile Dual-Band Shared-Aperture Base Station Antennas Based on FSS Radiators // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2024. Vol. 23. Iss. 6. PP. 1894–1898. DOI:10.1109/LAWP.2024.3372529
13. Shi H., Wu S., Shang F. Broadband magnetoelectric dipole antenna for 5G base station applications // *Proceedings of the 13th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE, Zhuhai, China, 01–04 December 2021)*. IEEE, 2021. PP. 660–663. DOI:10.1109/ISAPE54070.2021.9753134
14. Бородулин Р.Ю., Лукьянов Н.О., Лянгузов Д.А. Разработка антенной решетки с планарным антенным элементом // *Телекоммуникации и связь*. 2025. № 1(4). С. 74–85. DOI:10.21681/3034-4050-2025-1-74-85. EDN:FKUAKL

References

1. Liao B., Liu B., Deng S. *A dual-polarized radiation element, antenna and its applications*. Chinese Patent, no. CN201610561359.5, 15.07.2016
2. Zhi N., Li K.-M. *Antennas for Base Stations in Wireless Communications*. New York; 2009. 372 p.
3. Wu Q., Li H., Wong S.-W., Lin Y.-C., He Y. A Low-Profile Dual-Polarized Dielectric Resonator Antenna for 2G/3G/4G Base Station Applications With Gain Enhancement. *Proceedings of the International Workshop on Radio Frequency and Antenna Technologies, iWRF&AT, 31 May – 03 June 2024, Shenzhen, China*. IEEE; 2024. p.486–488. DOI:10.1109/iWRFAT61200.2024.10594368
4. You C., He Y., Li W., Zhang L. A Novel High-Isolation Positive-and-Negative-45-Degree Dual-Polarization 5G mm Wave Micro Base Station Antenna. *Proceedings of the International Symposium On Antennas And Propagation, ISAP, 30 October – 02 November 2023, Kuala Lumpur, Malaysia*. IEEE; 2023. p.450–454. DOI:10.1109/ISAP57493.2023.10388575
5. Huang W., He Y., Khan A. A Novel Sub-6 GHz and Millimeter Wave Shared-Aperture 5G Base Station Antenna. *Proceedings of the International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium, ACES-China, 15–18 August 2023, Hangzhou, China*. IEEE; 2023. p.1071–1072. DOI:10.23919/ACES-China60289.2023.10249829
6. Liao G., He Y., Song C. A Shared-Aperture Compact Quad-Band Linearly-Polarized Base Station Antenna. *Proceedings of the 12th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, APCAP, 22–25 September 2024, Nanjing, China*. IEEE; 2024. p.318–331. DOI:10.1109/APCAP62011.2024.10882098
7. Zhang L., Liu T., He Y. Wideband Dual-Polarized Antenna With Novel Grid Patch for Base Station Applications. *Proceedings of the 12th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, APCAP, 22–25 September 2024, Nanjing, China*. IEEE; 2024. p.962–967, DOI:10.1109/APCAP62011.2024.10881000
8. You C., He Y., Li W., Zhang L., Wong S.-W., Zhou Z. Design of Slot-Coupled Broadband 5G mm Wave Base Station Antenna Based on Double-Layer Patch. *Proceedings of the International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications, IMWS-AMP, 27–29 November 2022, Guangzhou, China*. IEEE; 2022. DOI:10.1109/IMWS-AMP54652.2022.10106844
9. Huang W., He Y., Li W., Zhang L., Wong S.-W., Zeng Z. A Low-Profile Dual-Polarized Wideband Antenna for 5G Massive MIMO Base Station. *Proceedings of the International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition, iWEM, 28–30 November 2021, Guangzhou, China*. IEEE; 2021. p.2367–2371. DOI:10.1109/iWEM53379.2021.9790399
10. Li R., He Y., Song C. A Broadband SIW-Based Filtering Antenna for 5G mmWave Base Station Application. *Proceedings of the International Workshop on Antenna Technology, iWAT, 15–18 April 2024, Sendai, Japan*. IEEE; 2024. p.351–353. DOI:10.1109/iWAT57102.2024.10535836

11. Tu Z., Cui Y., Li R. A Compact Dual Broadband Shared-Aperture Antenna Array for 5G Base Station Applications. *Proceedings of the Conference on Antenna Measurements and Applications, CAMA, 14–17 December 2022, Guangzhou, China*. IEEE; 2022. p.2767–2774. DOI:10.1109/CAMA56352.2022.10002619
12. Li H., Xu J., Nan Y., Chen Q. Zhou C. Low-Profile Dual-Band Shared-Aperture Base Station Antennas Based on FSS Radiators. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2024;23(6):1894–1898. DOI:10.1109/LAWP.2024.3372529
13. Shi H., Wu S., Shang F. Broadband magnetoelectric dipole antenna for 5G base station applications. *Proceedings of the 13th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, ISAPE, 01–04 December 2021, Zhuhai, China*. IEEE; 2021. p.660–663. DOI:10.1109/ISAPE54070.2021.9753134
14. Borodulin R.U., Lukyanov N.O., Lyanguzov D.A. Development of an antenna grid with a planar antenna element. *Telecommunications and Communications*. 2025;1(4):74–85. DOI 10.21681/3034-4050-2025-1-74-85. EDN:FKUAKL

Статья поступила в редакцию 30.04.2025; одобрена после рецензирования 04.07.2025; принята к публикации 15.08.2025.

The article was submitted 30.04.2025; approved after reviewing 04.07.2025; accepted for publication 15.08.2025.

Информация об авторах:

ЛУКЪЯНОВ
Николай Олегович

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры радиосвязи Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного
 <https://orcid.org/0000-0002-2441-4385>

ЛЯНГУЗОВ
Данила Андреевич

кандидат технических наук, инженер, преподаватель кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0003-2626-0962>

ЧЕРНЫШОВ
Артём Геннадьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0003-1523-1955>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.