



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.6.8>

УДК: 520.628; 621.396.67

РАЗРАБОТКА МИКРОПОЛОСКОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ДЛЯ СРЕДСТВ БЕСПРОВОДНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА НА ОСНОВЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ

**П.О. Панченко, А.А. Шмаков, И.С. Скварник,
Л.Г. Стаценко, В.А. Селезнев**

**Дальневосточный федеральный университет
690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10**

Статья поступила в редакцию 13ноября 2024 г.

Аннотация. Использование отечественной элементной и производственной базы, в процессе исследования, являлось одной из приоритетных задач при создании новых устройств приемопередающей техники. Современные беспроводные коммуникации требуют антенн с высоким коэффициентом усиления, широкой полосой пропускания и минимальными размерами для обеспечения высокой производительности в широком диапазоне частот. Этим требованиям соответствует конструкция микрополосковых антенн. В работе представлены результаты проектирования, включая выбор материала подложки, геометрические параметры антенных элементов и методы улучшения характеристик антенны. Был проведен сравнительный анализ результатов численного моделирования. Особое внимание уделено практическим аспектам конструирования и тестирования, что позволит использовать выработанные рекомендации для разработки высокоэффективных микрополосковых антенных систем в системах связи, радиолокации и беспроводных сетях. Для проектирования и моделирования антенн использовалось программное обеспечение CST studio, которое позволяет конструировать модели любой

сложности перед созданием их натуральных прототипов, что позволяет добиться наибольшей эффективности при разработке и исследовании перспективных антенных систем.

Ключевые слова: антенная решетка, моделирование, микрополосковая антенна, излучатель, диаграмма направленности, коэффициент усиления.

Финансирование: данная работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности по проекту № FZNS-2023-0008.

Автор для переписки: Панченко Павел Олегович, panchenko.po@students.dvfu.ru

Введение

С развитием электроники и появлением современных технологий изготовления печатных плат стала возможна разработка микрополосковых антенн (МПА) [1,2], в наши дни они повсеместно используются для создания приемопередающих устройств.

В основе МПА лежит полосковая линия передачи, геометрия и рабочая частота которой являются определяющими факторами при проектировании. [3,4] МПА обладают рядом преимуществ по сравнению с другими типами антенн, такими как компактные размеры, низкая стоимость производства, легкость интеграции, плоская конструкция, гибкость дизайна. [5]

МПА представляют большой интерес для созданий каналов связи и последней мили. В информационных технологиях «последняя миля» – это канал, организованный между поставщиком услуги и ее конечным потребителем. Существует множество способов организации подобного канала, например, посредством кабельного подключения или с использованием технологии Wi-Fi [6]. Но для клиентов, которым требуется высокая скорость соединения, и расположенных в местности со сложным рельефом, или удаленных от магистральных линий связи, выходом является использование радиорелейных линий (РРЛ).

Основными критериями выбора МПА для использования в каналах связи для организации «последней мили» являются относительная дешевизна и небольшие массогабаритные показатели приемопередающего оборудования, при приемлемых значениях скорости передачи данных в каналах связи.

В настоящее время в России в основном используется оборудование таких иностранных компаний как Ericsson, Intracom, NEC, а количество отечественных решений для организации РРЛ крайне мало. Одним из вариантов решения данной проблемы является производство антенн на основе микрополосковой технологии с использованием отечественной элементной и производственной базы.

1. Численная модель и результаты расчетов одиночной антенны

Существует множество методов расчета МПА, известные соотношения [7,8,10] достаточно точно описывают характеристики излучателей, необходимых для требуемого частотного диапазона.

Наиболее распространенным частотным диапазоном для РРЛ является 5600-6400 МГц. Используя начальные (таблица 1) и рассчитанные (таблица 2) параметры проектируем модель излучателя (рис. 1).

Таблица 1. Начальные параметры.

Параметр	Величина
Резонансная частота, $f_{рез}$	5,25 ГГц
Проницаемость, ϵ	4,3
Толщина подложки, h	1,575 мм
Резонансная длина волны, $\lambda_{рез}$	57,1 мм

Значения основных параметров участков микрополосковых элементов [10] используемых при дальнейшем моделировании приведены в таблице 2.

Моделирование учитывало такие параметры, как частота, тип антенны, толщина диэлектрической подложки, геометрические параметры металлизации.

Таблица 2. Рассчитанные параметры.

Параметр	Величина
Ширина патча, W	17,6 мм
Эффективная проницаемость, $\varepsilon_{\text{эф}}$	3,79
Длина патча, L	13,2 мм
Ширина выреза, W_v	0,225 мм
Длина выреза, L_v	4,1 мм

По полученным значениям длины и ширины патча была построена модель для проверки характеристик излучателя (рис. 1).

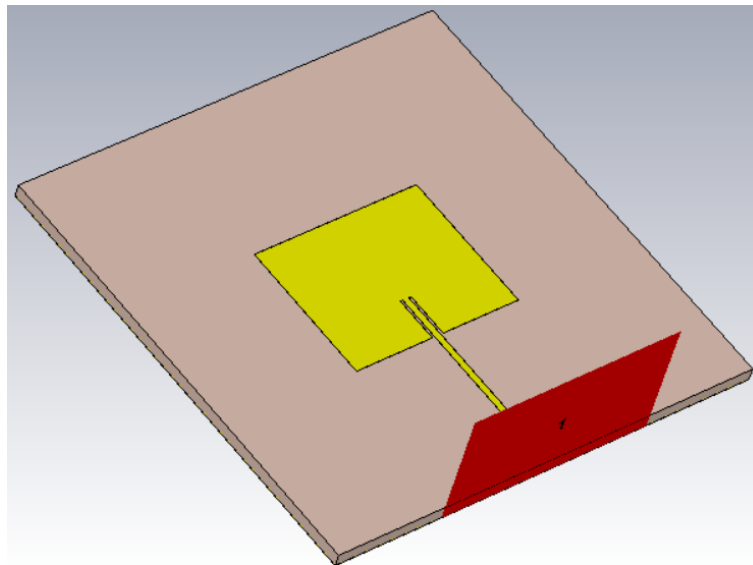


Рис. 1. Модель излучателя.

Одним из основных параметров, которые можно использовать для оценки качества модели, является коэффициент отражения S_{11} . На рис. 2 представлен график параметра S_{11} , полученной модели излучателя, из которого видно, что резонансная частота соответствует требуемой. Ширина полосы пропускания по уровню минус 10 дБ составляет 176 МГц.

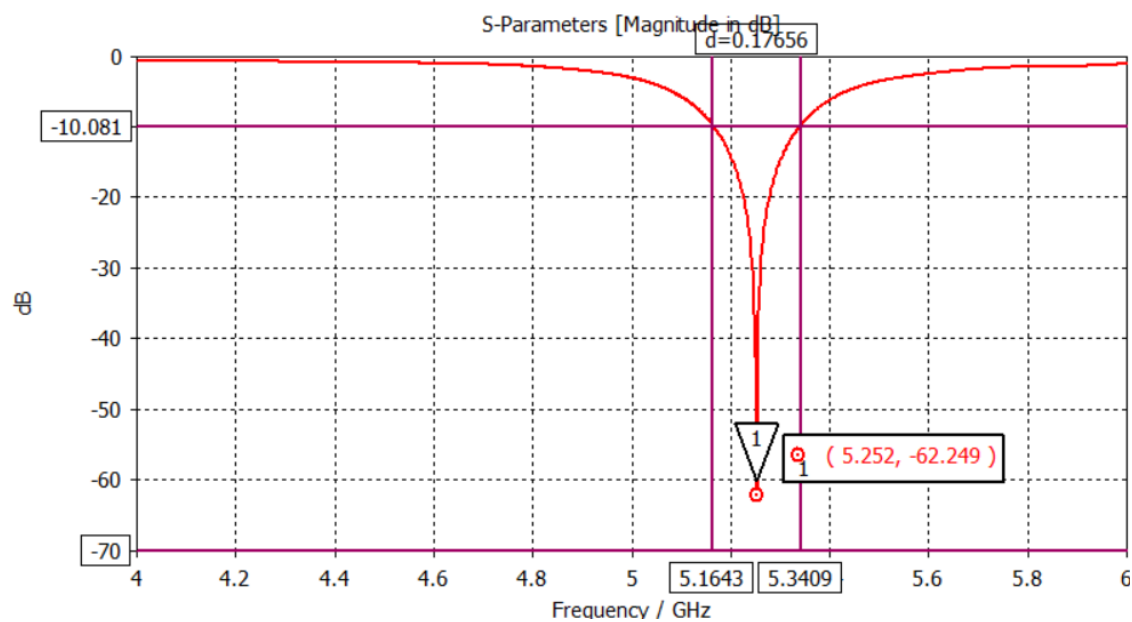
Рис. 2. График параметра S₁₁.

Рис. 3 демонстрирует диаграмму направленности рассчитанной антенны, полученную в результате моделирования.

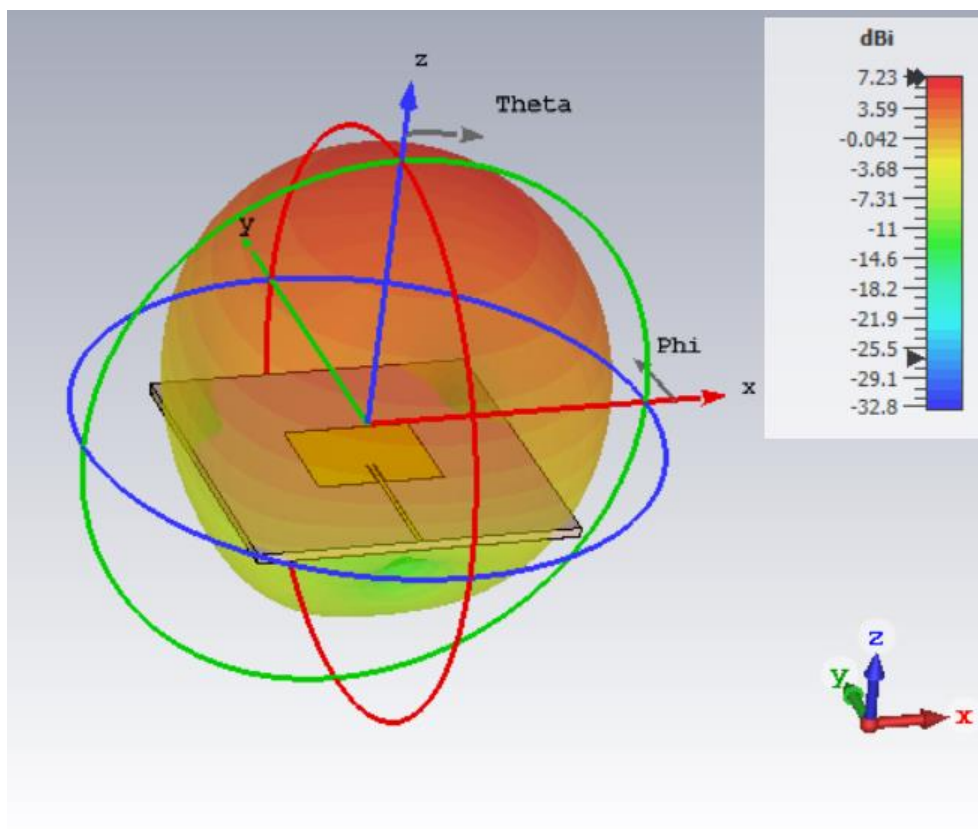


Рис. 3. Трехмерная диаграмма направленности.

2. Численная модель и результаты расчетов антенной решетки

Для создания каналов связи типа «точка-точка», которые применяются в условиях сложного рельефа и невозможности прокладки проводных линий связи, используются антенны с высоким коэффициентом усиления и узкой диаграммой направленности. Чтобы добиться высоких показателей этих характеристик наиболее эффективным решением будет объединение нескольких излучателей в антенную решетку, что приведет к значительному усилению сигнала. В статье исследуется конфигурация из 16 элементов (рис. 4). Данное количество излучателей является одним из наиболее оптимальных вариантов, для получения антенны с малым значением коэффициента отражения, необходимых геометрических параметров модели и стоимости производства.

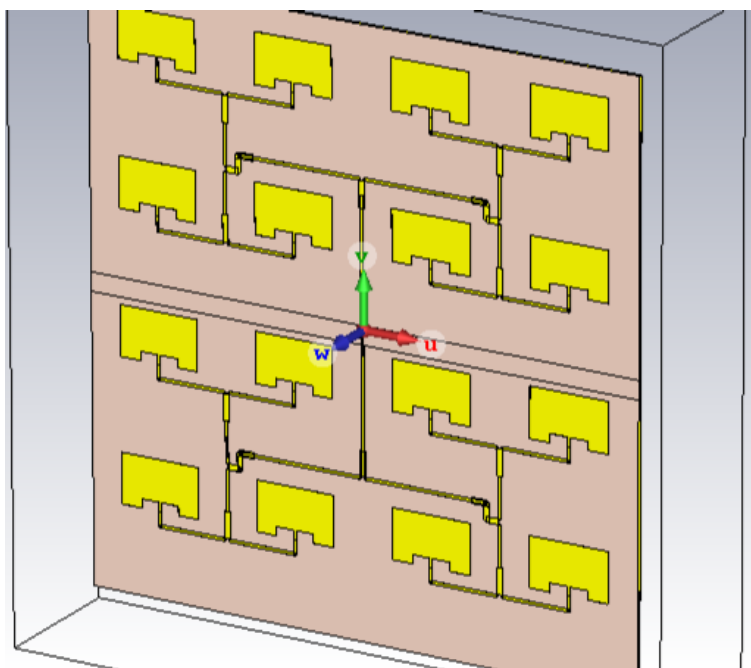


Рис. 4. Массив из 16 излучателей.

На рис. 5 изображен график параметра S_{11} для антенной решетки из 16 излучающих элементов. Из графика видно, что полоса пропускания по уровню минус 10 дБ увеличилась на 100 МГц и составляет 279 МГц. Согласно стандарту IEEE 802.16 такой полосы будет достаточно для РРЛ с дальностью связи до 50 км.[9]

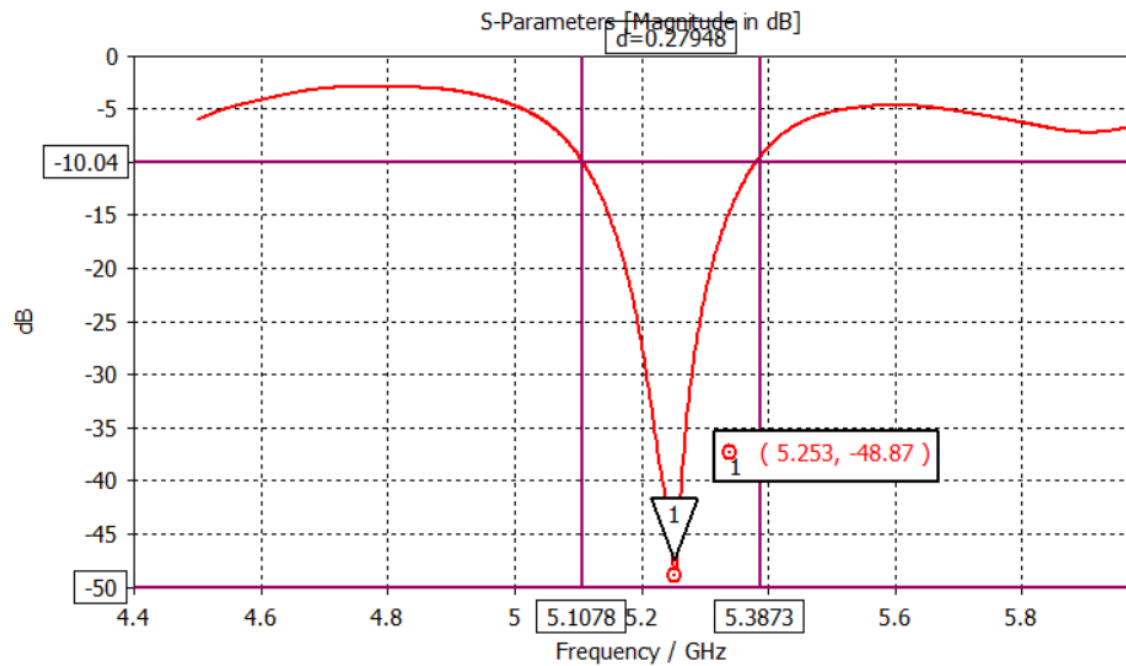


Рис. 5. График параметра S11 для 16 элементов.

Формирование антенной решетки из множества излучателей, позволяет улучшить направленные свойства в сравнении одиночным элементом (рис. 6). Видно, что коэффициент направленного действия увеличился в 2,4 раза и составил 18,8 дБ.

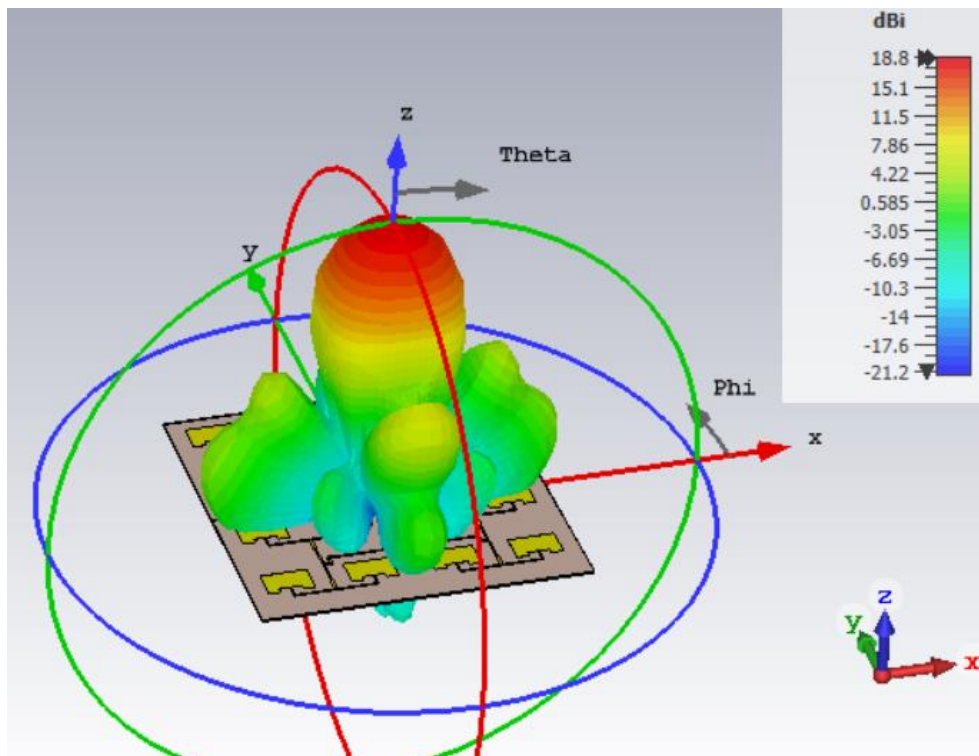


Рис. 6. Диаграмма направленности решетки 4x4.

Важным элементом в конструкции антенны являются микрополосковые линии. Для моделирования принято входное сопротивление антенны 100 Ом. Исходя из принятого сопротивления выбирается ширина линии W_d , равная 0,71 мм.

Для СВЧ техники, применяются специальные текстолиты с низкой диэлектрической проницаемостью и малыми потерями, например, на основе тефлона (PTFE) или керамических наполнителей. Эти материалы обеспечивают минимальные потери сигнала и стабильные электрические характеристики при работе на высоких частотах, что важно для антенн, фильтров и других СВЧ-устройств. Также существуют гибкие текстолиты (flex-платы), которые используются там, где требуется создание гибких или многослойных конструкций. Таким образом, разнообразие текстолитов позволяет адаптировать материал под конкретные задачи, обеспечивая баланс между механическими и электрическими свойствами, что делает их незаменимыми в современной технике [11].

Наиболее распространенные стеклотекстолиты отечественных производителей, которые возможно применять для конструирования антенной техники и их параметры представлены в таблице 3.

Таблица 3. Основные электрические параметры отечественных подложек.

Марка диэлектрика	Проницаемость, ϵ	Тангенс угла потерь, $tg \delta \cdot 10^4$
ФФ-4	2	3
ФАФ-4Д	2,6	10
ФЛАН-10	10	15
ЭМ-4	4,7	2,4

В таблице 4 приведены параметр аналогичного материала иностранного производства.

Таблица 4. Иностраный аналог подложки.

Иностраный материал	ϵ	$tg \delta \cdot 10^4$	Российский аналог
TEFLON 7	2,1	2	ФФ-4
RD250	2,5	18	ФАФ-4Д
TP1020	10,2	15	ФЛАН-10
FR-4	5,4	3,5	ЭМ-4

Данные расчетов с применением диэлектрика марки ЭМ-4, изображенных на рис. 7 и 8 получены для размеров антенны указанных в таблице 5. Данный диэлектрик был выбран для исследования, так как является аналогом одного из самых распространенных материалов для использования в качестве диэлектрических подложек в радиотехнике.

Таблица 5. Параметры элементов антенны.

Параметр	Значение
Ширина патча, W	20,8 мм
Длина патча, L	2,8 мм
Ширина выреза, W_B	3,75 мм
Длина выреза, L_B	2,62 мм

Результаты моделирования антенной решетке на основе материала ЭМ-4 представлены на рис. 7 и 8. Частота резонанса составила 5,27 ГГц, ширина полосы пропускания по уровню минус 10 дБ равна 97 МГц, коэффициент направленного действия 19 дБ

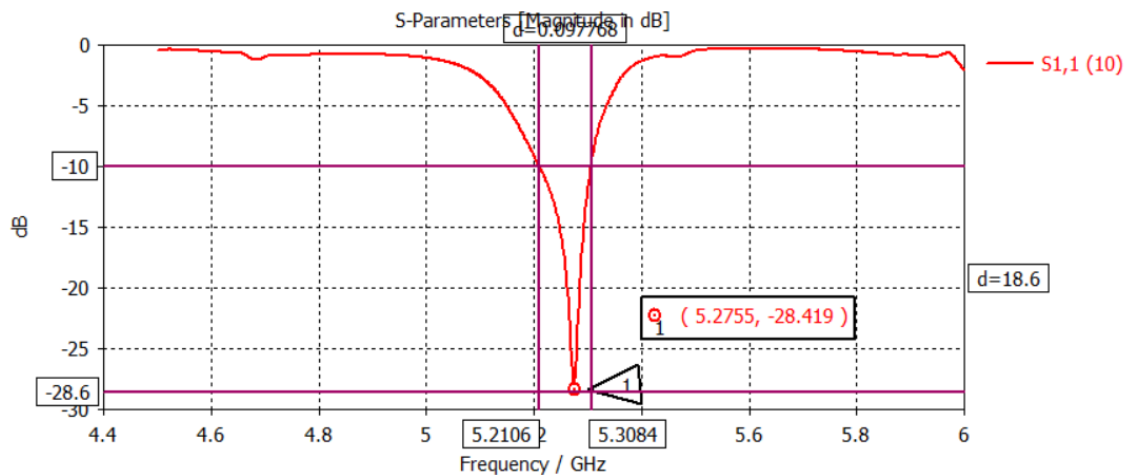


Рис. 7. График параметра S11 при использовании ЭМ-4.

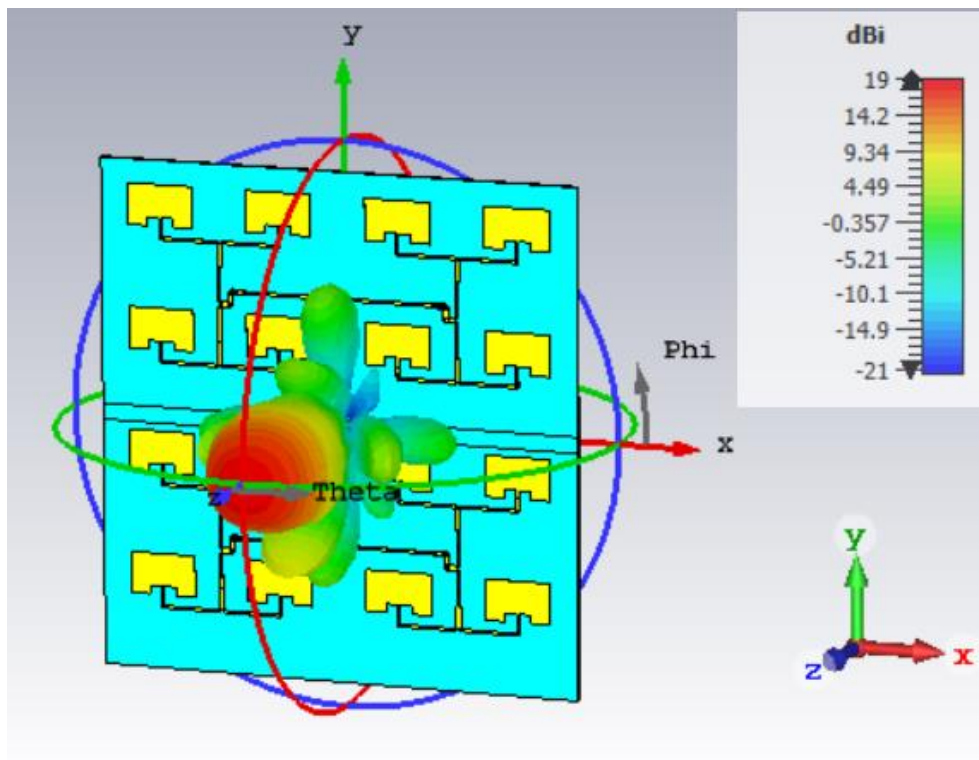


Рис. 8. Диаграмма направленности антенной решетки при применении ЭМ-4.

По результатам проведенного моделирования антенной решетки на основе отечественных материалов можно сделать вывод, что их применение требует настройки параметров МПА для того, чтобы добиться необходимой частоты 5,25 ГГц. Также возможно использование этих материалов, но с измененной толщиной слоя, что приведет к смещению резонансной частоты. Это будет являться критичным, так как выбранный диапазон является нелицензируемым и может использоваться без предварительной регистрации радиочастот любыми лицами. Изменение резонансной частоты в зависимости от толщины диэлектрика можно увидеть на рис. 9 на примере разных толщин материала ЭМ-4[12]. Толщина диэлектрика изменялась от 0,1 до 1,5 мм и из графика видно, что с увеличением толщины диэлектрика, частота резонанса уменьшается. Для дальнейшего изменения параметров антенн возможно использование диэлектрика различной толщины.

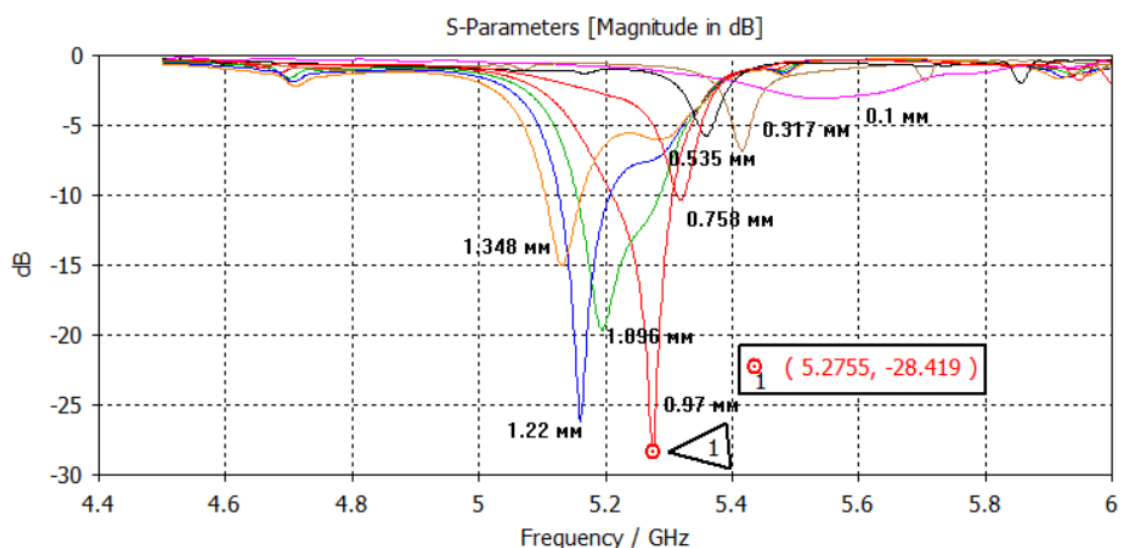


Рис. 9. График параметра S11 при разных толщинах диэлектрика.

Заключение

В ходе выполнения работы была разработана микрополосковая антенная решетка, предназначенная для функционирования в Ku-диапазоне частот. На основе теоретических расчетов и компьютерного моделирования в среде CST Studio Suite удалось спроектировать антенную решетку с удовлетворительными параметрами направленности, коэффициента усиления и согласования. Полученные результаты моделирования демонстрирует применимость предложенного подхода к созданию антенн для современных радиотехнических систем.

Особое внимание в исследовании было уделено выбору материала подложки – текстолита ЭМ-4, который является альтернативой иностранному материалу FR-4 в отечественном производстве. Проведённый анализ показал, что при корректном учёте параметров материала можно добиться хорошей работы антенны даже на относительно высоких частотах. Это делает ЭМ-4 разумным компромиссом между стоимостью и техническими характеристиками при проектировании микрополосковой антенной решетки.

Полученные результаты подтверждают возможность создания эффективных, малогабаритных и недорогих антенн для задач мобильной и спутниковой связи, организации РРЛ, навигации и других направлений. Разработанная методика проектирования может быть адаптирована под различные частотные диапазоны и топологии антенн. Антенна соответствует требованиям стандартов к

широкополосным сетям. Существующее на рынке оборудование представлено в основном иностранными производителями, а количество отечественных микрополосковых антенн невелико и создаётся с применением иностранных материалов. Описанные в данной статье результаты говорят, что возможно использование отечественных материалов с подходящими характеристиками для широкополосной связи.

Применение фазированных решеток с электронным управлением диаграммой направленности позволит улучшить усиление и коэффициент направленного действия, будет являться дорогостоящим решением и для удешевления производства подобных антенн возможно использования компонентов отечественного производства. В дальнейшем планируется проведение натурных экспериментов для подтверждения расчетов и оценки влияния конструктивных допусков и технологических факторов на характеристики антенны.

Финансирование: данная работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности по проекту № FZNS-2023-0008.

Литература

1. Bernhard J. T. et al. A commemoration of Deschamps' and Sichak's 'Microstrip microwave antennas': 50 years of development, divergence, and new directions //Proc. of the 2003 Antenna Applications Symp. – 2003. – С. 189-230. <https://www.researchgate.net/publication/235117312>
2. Munson R. Microstrip phased array antennas //1973 EIC 11th Electrical Insulation Conference. – IEEE, 1973. – С. 281- <https://doi.org/10.1109/EIC.1973.7468714>
3. Mehta A. Microstrip antenna //International Journal of Scientific & Technology Research. – 2015. – Т. 4. – №. 3. – С. 54-57. <https://www.researchgate.net/publication/276165361>
4. Саломатов Ю. и др. Устройства сверхвысоких частот и антенны. – Litres, 2022.

5. Mishra R. An overview of microstrip antenna //HCTL Open International Journal of Technology Innovations and Research (IJTIR). – 2016. – Т. 21. – №. 2. – С. 39-55.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.161524>
6. Rana M. S. et al. Microstrip patch antennas for various applications: a review //Indonesian journal of Electrical Engineering and computer science. – 2023. – Т. 29. – №. 3. – С. 1511-1519. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v29.i3.pp1511-1519>
7. Tiwari R., Sharma R., Dubey R. Microstrip patch antenna array design anaylsis for 5G communication applications //Smart Moves Journal Ijoscience. – 2020. – Т. 6. – №. 5. – С. 1-5.
8. Werfelli H. et al. Design of rectangular microstrip patch antenna //2016 2nd International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP). – IEEE, 2016. – С. 798-803.
<https://doi.org/10.1109/ATSIP.2016.7523197>
9. Pareit D. et al. The history of WiMAX: A complete survey of the evolution in certification and standardization for IEEE 802.16 and WiMAX //IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2011. – Т. 14. – №. 4. – С. 1183-1211.
10. Гупта К., Гардж Р., Чадха Р. Машинное проектирование СВЧ устройств. – 1987.
11. Akinola S., Hashimu I., Singh G. Gain and bandwidth enhancement techniques of microstrip antenna: a technical review //2019 International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy (ICCIKE). – IEEE, 2019. – С. 175-180. <https://doi.org/10.1109/ICCIKE47802.2019.9004278>
12. Mishra R. et al. Design and analysis of microstrip patch antenna for wireless communication //International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. – 2019. – Т. 8. – №. 7. – С. 663-666.
<https://www.researchgate.net/publication/333043997>

Для цитирования:

Панченко П.О., Шмаков А.А., Скварник И.С., Стаценко Л.Г., Селезнев В.А. Разработка микрополосковой антенной решетки для средств беспроводного широкополосного доступа на основе отечественной элементной базы. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.6.8>