

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн

Разработка, оптимизация и экспериментальная реализация миниатюрной
гибкой антенны для работы в диапазонах ISM и сотовой связи

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента _____ 4 _____ курса _____ 4031 _____ группы

направления _____ 03.03.03 «Радиофизика» _____

_____ института физики _____

_____ Чистякова Ивана Алексеевича _____

Научный руководитель
доцент кафедры нелинейной
физики, к. ф. – м. н.

подпись, дата

А. Б. Адилова

Научный консультант
с.н.с. лаборатории
«Материалы специального
назначения» ОНИ НС и
БС СГУ, к. ф. – м. н.

подпись, дата

А. В. Стародубов

Зав. кафедрой
электроники колебаний и
волн, доцент, к. ф. – м. н.

подпись, дата

С. В. Гришин

Саратов, 2021 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ АНТЕНН	5
1.1. Линии передачи.....	5
1.2. Общие характеристики антенн	6
1.3. Методы миниатюризации микрополосковых антенн	6
ГЛАВА 2. ЧИСЛЕННОЕ 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ	7
2.1. Копланарная линия передачи	7
2.2. Компактная антенна 30×20 мм	8
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	11
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	12

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность выбранной темы обусловлена востребованностью устройств гибкой электроники, необходимостью их применения в широком спектре приложений, таких как телекоммуникации, медицина, различные датчики, обеспечение безопасности, носимые устройства и другие [1]. Их компактных размер, малый вес, относительно низкая стоимость изготовления с использованием недорогих гибких подложек делает гибкую электронику весьма привлекательной [2]. Очевидно, что развитие устройств гибкой электроники невозможно без разработки, создания и исследования антенн, посредством которых осуществляется «общение» устройств друг с другом, передача данных, отслеживание местоположения и так далее. Тенденция к расширению функционала устройств гибкой электроники неминуемо сводится к требованиям миниатюризации, что в свою очередь влечет предъявление таких требований и к гибким антеннам. Поэтому миниатюризация [3] гибких антенн – важное направление в современных системах связи, таких как беспроводные телекоммуникационные сервисы и связанные с ними приложения для передачи голосовых и информационных данных.

Цель исследования – разработка конструкции компактной антенны размером не более 30×30 мм на гибкой диэлектрической подложке из полиимида для работы в области диапазонов ISM и сотовой связи.

Для достижения цели в исследовании выполнены следующие **задачи**:

1. Ознакомление основами принципов распространения электромагнитных волн и теорией антенн.
2. Изучение сведений и практических навыков для проектирования в ANSYS.
3. Обзор методов миниатюризации [3].
4. Проектирование и оптимизация дизайна компактной антенны на гибкой диэлектрической подложке для диапазонов ISM и сотовой связи.

5. Расчёт радиотехнических характеристик для дизайна смоделированных проектов антенн.
6. Исследование экспериментальных радиотехнических характеристик сконструированной антенны с помощью векторного анализатора цепей.
7. Сравнение экспериментальных характеристик с результатами численного моделирования.

Научная новизна данного исследования заключается в разработке и исследовании радиоэлектронных компонентов (антенны, линии передачи) на гибких диэлектрических подложках.

ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ АНТЕНН

Основное назначение антенны – излучение или приём радиоволн [4]. Для передачи сигнала от источника к антенне необходима линия передачи. В следующем разделе представлена информация об этих устройствах.

1.1. Линии передачи

Линия передачи (ЛП) СВЧ – это устройство, которое ограничивает область распространения электромагнитных колебаний и направляющее поток электромагнитной энергии СВЧ в заданном направлении. ЛП могут содержать проводники и диэлектрическое заполнение (см. рис. 1). Электромагнитные волны в линиях передачи в зависимости от наличия или отсутствия у них продольных составляющих E_z и H_z (ось Z направлена в сторону распространения электромагнитной волны) можно разделить на четыре типа [5]: поперечная электромагнитная волна (Т-волна или ТЕМ-волна), электрическая волна (Е-волна или ТМ-волна), магнитная волна (Н-волна или ТЕ-волна), гибридная волна (НЕ-волна или ЕН-волна).

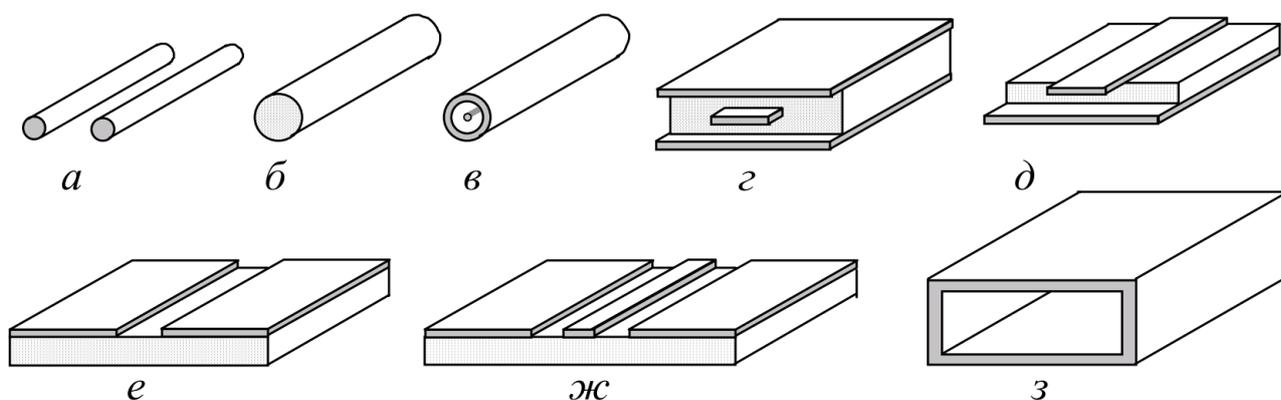


Рис. 1. Основные типы линий передачи:

а – двухпроводная; *б* – диэлектрическая; *в* – коаксиальная; *г* – симметричная полосковая; *д* – микрополосковая; *е* – щелевая; *ж* – копланарная; *з* – прямоугольный волновод

В данной выпускной работе антенна сконструирована именно с копланарным типом ввода/вывода, так как для микрополосковой линии необходимо два слоя металлизации: сверху и снизу, а копланарная линия

требует только одного слоя, что существенно упрощает процесс изготовления такой антенны.

1.2. Общие характеристики антенн

Как известно, любая антенна выполняет функцию преобразования одного типа волны в другой. Направление преобразования энергии не имеет значения для принципа работы. Параметры, описанные в этой главе, одинаково действительны для передачи и приема.

В данном исследовании антенна характеризовалась следующими параметрами: коэффициент отражения, полоса пропускания, направленность и диаграмма направленности.

Для определения рабочего диапазона антенны исследуют зависимость коэффициента отражения S_{11} от частоты подаваемого сигнала на антенну. Считается, что приемлемый уровень отраженного сигнала от антенны составляет около 10% от падающего сигнала, соответственно те диапазоны частот, в которых $S_{11} < -10$ дБ общепринято считать рабочими частотными диапазонами, если нет более жестких условий.

1.3. Методы миниатюризации микрополосковых антенн

С каждым годом все больше растет интерес к портативным (компактным), легким, низкопрофильным и гибким электронным устройствам.

Существует несколько подходов к миниатюризации [3] подобных антенн, реализованных в [6], [7], [8], [9]: использование подложки с высоким значением диэлектрической проницаемости, формирование множественных изгибов в геометрии антенны и использование фрактальных структур.

На рис. 2 изображена последовательная траектория миниатюризации исследуемой антенны.

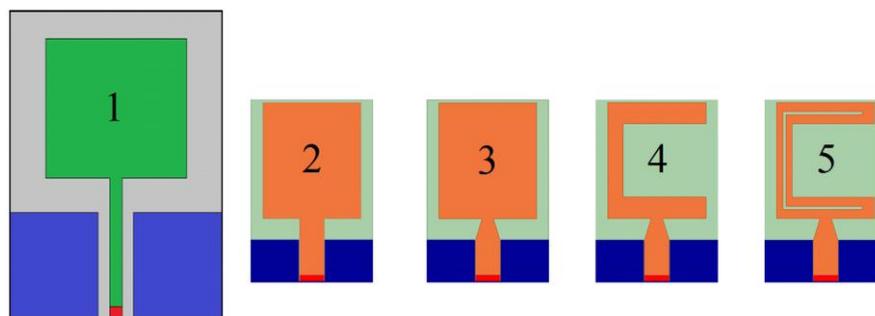


Рис. 2. Последовательная траектория миниатюризации, выполненная в данной работе.

Миниатюризация в данном исследовании заключалась в подборе гибкой подложки с более высоким значением диэлектрической проницаемости, далее произведено уменьшение размера подложки до 30×20 мм с дальнейшим согласованием сигнальной линии и прямоугольного патча (участок сужения рис. 2 (3)), далее для перемещения рабочего диапазона в область меньших частот в патче сделан прямоугольный вырез в горизонтальном направлении в котором реализован продольный симметричный вырез шириной 0.5 мм.

ГЛАВА 2. ЧИСЛЕННОЕ 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В данной работе при проведении численных расчетов использовался пакет полностью трехмерного электромагнитного моделирования ANSYS HFSS, а для изготовления и исследования необходимых структур на гибкой диэлектрической подложке используется метод лазерной абляции и следующее оборудование: лазерный станок Мини Маркер 2–20А4, векторный анализатор электрических цепей (ВАЦ), оптический микроскоп проходящего света.

2.1. Копланарная линия передачи

С помощью метода лазерной абляции студент 2 курса института физики Ожогин Иван изготовил экспериментальный макет разработанной копланарной линии передачи (CPW), который представлен на рис. 3.



Рис. 3. Конечный вариант CPW, где (слева) – трехмерная модель в среде ANSYS HFSS, (справа) – экспериментальная реализация

Совместными усилиями с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ) исследована частотная зависимость коэффициентов отражения и передачи до 26.5 ГГц. Сравнение теории и эксперимента представлено на рис. 4.

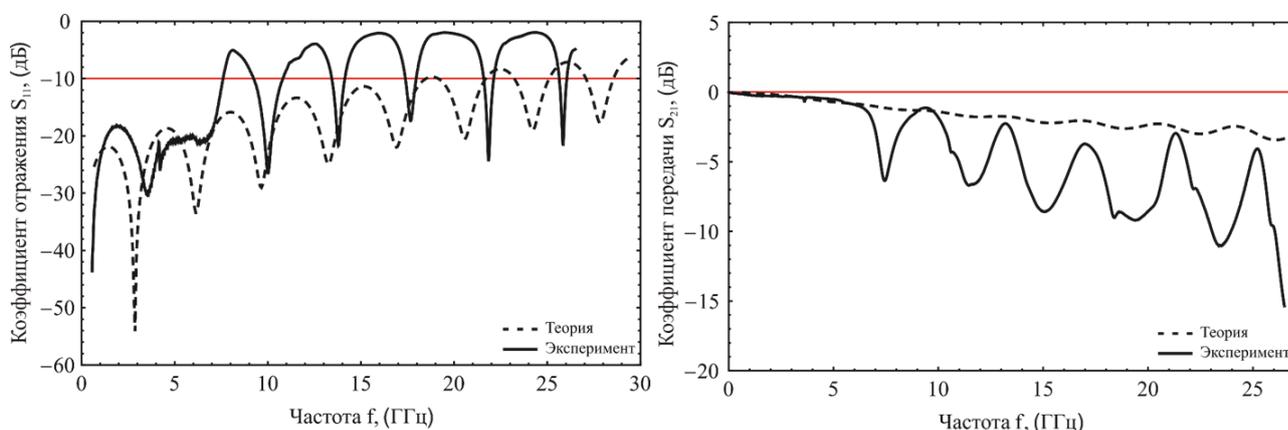


Рис. 4. Сравнение теории и эксперимента, где (слева) – частотная зависимости коэффициента отражения, (справа) – коэффициента передачи.

Сравнивая результаты численного моделирования и натурального эксперимента можно сказать, что имеется качественное и количественное совпадение полученных данных в области до 6 ГГц.

2.2. Компактная антенна 30×20 мм

Начальной точкой служила антенна, разработанная в [10], которая демонстрировала рабочий диапазон частот в полосе от 1.5 ГГц до 3.5 ГГц. Однако существенным недостатком антенны являлся её размер 120×40 мм. Была проделана трудоемкая работа по оптимизации геометрических параметров антенны, исследовано влияние размеров составных элементов

антенны и расстояний между ними на S-параметры и диаграмму направленности. Результаты последовательной миниатюризации представлены на рис. 5.

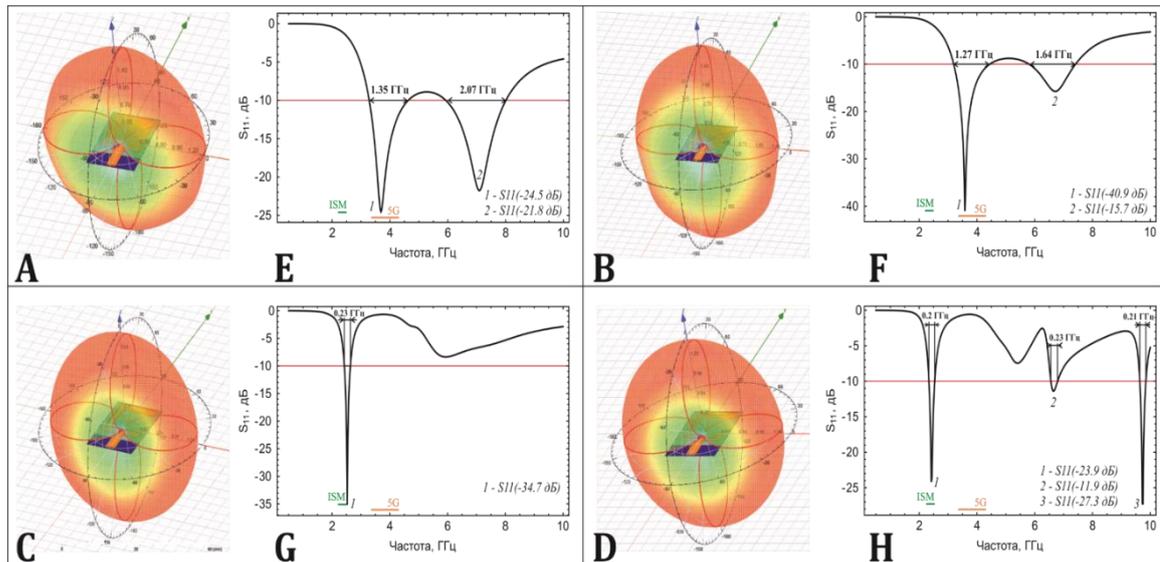


Рис. 5. Траектория оптимизации дизайна антенны и диаграмма направленности (A-D) (слева) и частотная зависимость коэффициента отражения S_{11} каждого из дизайнов (E-H) (справа)

Также методом лазерной абляции была произведена серия экспериментов по созданию макета конечного варианта смоделированной антенны. Изготовление антенны осуществлял Ожогин Иван. На рис. 6 представлен вид антенны.

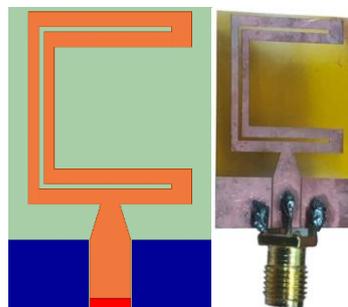


Рис. 6. Конечный вариант миниатюрной антенны, где (слева) – численное моделирование, (справа) – экспериментальная реализация

Далее с помощью ВАЦ была получена частотная зависимость коэффициента отражения изготовленной антенны (см. рис. 7).

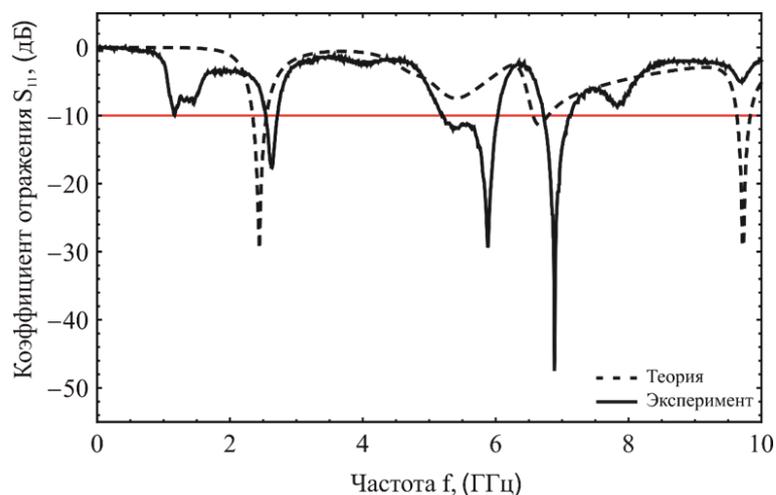


Рис. 7. Частотная зависимость коэффициента отражения

У экспериментального образца антенны – три разные полосы с центральными частотами 2.64; 5.88 и 6.88 ГГц, соответственно. Сравнение теоретических и экспериментальных данных представлено в таблице №1.

Таблица №1. Сравнение теории и эксперимента

		$f_{ц}$, ГГц	$\Delta f_{ц}$, ГГц	BW, ГГц	ΔBW , ГГц	FBW, %	ΔFBW , %	S_{11} , дБ	ΔS_{11} , дБ
1	Теор.	2,43	0,21	0,20	-0,02	8,20	-1,40	-23,90	6,82
	Эксп.	2,64		0,18		6,80		-17,08	
2	Теор.	6,65	-0,77	0,23	0,59	3,50	10,40	-11,90	-17,47
	Эксп.	5,88		0,82		13,90		-29,37	
3	Теор.	9,73	-2,85	0,20	0,18	2,20	3,30	-27,30	-20,21
	Эксп.	6,88		0,38		5,50		-47,51	

где $f_{ц}$ – центральная частота, BW – ширина полосы, FBW – относительная ширина полосы. В таблице №1 под дельта « Δ » понимается абсолютная разность между значениями эксперимента и теории, например $\Delta f_{ц} = f_{ц,эксп.} - f_{ц,теор.}$. Исходя из сравнения видно, что центральная частота ISM диапазона в эксперименте смещена в область более высоких частот на 210 МГц, ширина полосы уменьшилась на 20 МГц, относительная ширина полосы

уменьшилась на 1,4%, а значение коэффициента отражения увеличилось на 6,82 дБ. Результаты по другим диапазонам можно увидеть в таблице №1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении ВКР рассмотрены основные принципы распространения электромагнитных волн и основ теории антенн, произведен обзор методов миниатюризации микрополосковых антенн, изучены необходимые сведения и получены практические навыки для проектирования в среде ANSYS, спроектирован и оптимизирован дизайн компактной антенны размером 30×20 мм на гибкой диэлектрической подложке для работы в диапазонах ISM и сотовой связи, а также копланарной линии передачи для этой антенны. Осуществлён теоретический расчёт основных радиотехнических характеристик, таких как: частотная зависимость коэффициента отражения, диаграмма направленности, рассчитано распределение поверхностных токов на площади проводящего слоя антенны. Проведено сопоставление численно полученных результатов с результатами натурального эксперимента, получено качественное и количественное соответствие. Кроме того, результаты работы представлены на 2 Всероссийских и одной международной научных конференциях, опубликовано 2 тезиса докладов в сборниках конференций и 2 статьи в журнале SPIE Proceedings.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Khaleel H.R. et al. A Compact Polyimide-Based UWB Antenna for Flexible Electronics // *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2012. Vol. 11. P. 564–567.
2. Вендик И.Б. Гибкие антенны и импедансные поверхности для беспроводных систем на поверхности человеческого тела // Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ». P. 165–170.
3. Kula J.S. et al. Patch-antenna miniaturization using recently available ceramic substrates // *IEEE Antennas Propag. Mag.* 2006. Vol. 48, № 6. P. 13–20.
4. Бова Н.Т., Резников Г.Б. Антенны и устройства СВЧ. Киев: 2-е изд., перераб. и доп. Вища школа. Головное изд-во, 1977. 260 p.
5. Тюрнев В.В. Теория цепей СВЧ. Красноярск: Учеб. пособие, Красноярск: ИПЦ. - КГТУ, 2003. 194 p.
6. Faria J. V. Flexible antennas design and test for human body applications. 2015.
7. Werner D.H., Ganguly S. An overview of fractal antenna engineering research // *IEEE Antennas Propag. Mag.* 2003. Vol. 45, № 1. P. 38–57.
8. Ahdi Rezaeieh S., Abbosh A., Antoniadis M.A. Compact cpw-fed planar monopole antenna with wide circular polarization bandwidth // *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2013. Vol. 12. P. 1295–1298.
9. Rahimi M. et al. Miniaturization of antenna for wireless application with difference metamaterial structures // *Prog. Electromagn. Res.* 2014. Vol. 145. P. 19–29.
10. Чистяков И.А., Стародубов А.В. Разработка, исследование и оптимизация антенны на гибкой диэлектрической подложке для работы в ISM диапазоне // *Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика.* Саратов: Издательство "Техно-Декор", 2020. P. 303–304.