

На правах рукописи



Уваров Антон Владимирович

**Сверхширокополосные печатные ненаправленные
интегральные антенны для устройств беспроводной
радиосвязи**

Специальность 2.2.14 «Антенны, СВЧ устройства и их технологии»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, г. Москва.

Научный руководитель:

Дмитриев Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, гл. научн. сотр. лаб. 341 ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

Официальные оппоненты:

Комаров Вячеслав Вячеславович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры "Радиоэлектроника и телекоммуникации" Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А.

Чистюхин Виктор Васильевич, кандидат технических наук, профессор Института микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина (Институт МПСУ), НИУ МИЭТ

Ведущая организация: Ярославский государственный университет им.

П.Г. Демидова

Защита состоится «18» марта 2022 г. В 11 ч. 00 мин. На заседании Диссертационного совета 24.1.111.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН (ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН) по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН и на сайте: <http://cplire.ru/rus/dissertations/Uvarov/index.html>

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя учёного секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « ____ » _____ 202_ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.111.02
доктор физико-математических наук



Кузьмин Л.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Интерес к сверхширокополосным (СШП) антеннам связан с их многочисленным применением как в сверхширокополосных, так и многодиапазонных многофункциональных системах. Разработка современных устройств с каждым годом предъявляет все более строгие требования к габаритным размерам устройств, заставляет искать более компактные конфигурации, что вступает в конфликт с требованиями по ширине полосы рабочих частот антенн. В стремлении получить максимально возможные характеристики из объема и площади, доступных для антенны, инженеры сталкиваются с вопросами фундаментальных ограничений характеристик антенн, а также возможности достижения этих предельных характеристик при соблюдении технологичности конструкции антенны. Вопросы, связанные с фундаментальными ограничениями антенн, могут быть сформулированы разными способами в зависимости от задачи, которая стоит перед инженером, например насколько малой можно сделать антенну, насколько широким может быть рабочий диапазон антенны при заданных ограничениях на размер, насколько низкой может быть рабочая частота антенны заданного размера, насколько высокий КУ может быть получен антенной заданного размера и многими другими. Для ответа на заданные выше вопросы необходимо сформулировать ограничения на характеристики антенн и определить зависимости между ними. Этот вопрос фундаментальных физических ограничений изучался многими авторами на протяжении последних 70 лет. Однако большинство из исследований, даже самые недавние из них, были сфокусированы на узкополосных антеннах. Существует сложность интерпретации и применения полученных ранее фундаментальных ограничений для СШП-антенн, поскольку большинство вышеупомянутых работ формулируют фундаментальные физические ограничения в терминах добротности и центральной частоты и поэтому не могут быть напрямую

применены для случая СШП-антенн. В данной работе фундаментальные ограничения сформулированы в терминах нижней частоты диапазона и его ширины, применимых для СШП-антенн, и детально разобраны в главе 2.

В то же время в производстве все шире применяются печатные антенны, выполненные на одной подложке и в одном технологическом процессе вместе с приемо-передающими цепями. Благодаря своим свойствам такие антенны обладают хорошей воспроизводимостью и повторяемостью характеристик, а также обеспечивают высокую надежность работы устройства. Интерес к печатным СШП-антеннам ставит следующие задачи: (1) поиск теоретических ограничений на достижимые характеристики именно печатных антенн, или, другими словами, исследование вопроса, насколько они далеки от фундаментального предела, известного для объемных антенн; (2) выбор наиболее эффективной конфигурации и топологии антенны в зависимости от предъявляемых к устройству требований; (3) решение практической задачи электромагнитной совместимости антенны и приемо-передающих цепей устройства беспроводной радиосвязи. В работе предложены решения всех трех задач.

В работе сделан отдельный акцент на монополярной печатной антенне как на одной из наиболее популярных конфигураций печатных СШП-антенн, широко применяемых на практике. При этом отметим, что сформулированные в главе 3 аналитические выражения для вычисления оптимальной геометрии по заданным электродинамическим требованиям, а также объяснение СШП-свойств антенны до этого момента ранее не были представлены другими авторами.

Интеграция печатных антенны на одной подложке с приемо-передающим модулем в рамках одного технологического процесса позволяет разработчику не использовать для установки антенны разъемов и дополнительных настроечных соединительных схем, отказаться от процесса монтажа антенны в устройство, что, в свою очередь, снижает как

себестоимость печатной платы без разъемов, так и стоимость сборки конечного устройства с антенной. Но, что более важно, интегральная конфигурация приемопередатчика и антенны — это способ дополнительной миниатюризации размера готового устройства. Так, например, приемопередающие цепи устройства могут быть размещены на одном из плечей печатной монополярной антенны. Однако для решения этой задачи важно уметь проводить анализ электромагнитной совместимости и понимать топологические ограничения подобного интегрального расположения. Основные принципы и методы проектирования интегральных антенных структур на всех этапах разработки детально разобраны в главе 4.

Цель диссертационной работы

Цель работы — исследование физических ограничений на характеристики сверхширокополосных печатных интегральных антенн для устройств беспроводной радиосвязи, что включает в себя изучение фундаментальных теоретических ограничений на характеристики подобных антенн, сравнительный анализ различных типов СШП печатных антенн, исследование оптимальных свойств наиболее популярного типа СШП печатной антенны — антенны типа «печатный монополь» — и изучение возможности и особенностей интегрального расположения цепей приемопередатчика внутри топологии антенны с целью дополнительной миниатюризации устройств.

Научная новизна

- Выведено предельное соотношение, связывающее характеристики антенн с ее геометрией и размерами для СШП-антенн любой геометрии и формы в терминах нижней частоты и отношения крайних частот рабочего диапазона.

- Вычислены предельные характеристики для прямоугольных печатных СШП-антенн с линейной поляризацией, и проведен сравнительный анализ наиболее распространенных типов печатных СШП-антенн с предельными характеристиками.
- Проведен анализ собственных мод монопольной печатной антенны, объяснены ее СШП свойства, показано, что нижняя частота рабочего диапазона определяется основной дипольной модой, возбуждаемой в структуре антенны, а также выведено эмпирическое соотношение для оценки нижней частоты рабочего диапазона.
- Исследована интегральная компоновка беспроводных устройств радиосвязи с печатной монопольной антенной, подразумевающая расположение цепей приемопередатчика внутри топологии антенны. На практике подтверждена работоспособность предложенной конфигурации и подхода к миниатюризации.

Практическая значимость результатов работы

Выведенное выражение физических ограничений может быть использовано для оценки предельных характеристик СШП-антенн и взаимосвязи между ними для любых типов антенн, их геометрий и форм. Получено конечное аналитическое выражение для оценки предельных характеристик печатных СШП антенн прямоугольной формы, которое может быть использовано для оценки предельных характеристик антенн различных типов при проектировании устройств и выбора оптимальной конфигурации. Спроектирован ряд печатных антенн для устройств беспроводной радиосвязи на основе прямохаотических приемопередатчиков.

Положения, выносимые на защиту

1. Показано, что для СШП антенн существует ограничение на нижнюю частоту рабочего диапазона частот, которое определяется выражением,

зависящим от геометрического размера, форм-фактора и требований к ширине рабочей полосе частот.

2. Представлен подход к оценке электродинамических характеристик СШП антенны при заданном геометрическом размере и, наоборот, предельного размера при заданных требованиях на электродинамические характеристики и геометрической форме. Численно рассчитаны предельные характеристики для печатных антенн прямоугольной формы.
3. Объяснены СШП свойства печатной монополюсной антенны. Выведено аналитическое выражение для предельных характеристик печатной монополюсной антенны в терминах нижней частоты рабочего диапазона.
4. Продемонстрирована возможность уменьшения размеров беспроводных устройств связи методом интегрального размещения цепей приемопередатчика внутри топологии печатной монополюсной антенны.
5. На примере разработанных антенн для приемопередатчиков на основе СШП хаотических сигналов продемонстрирована применимость на практике предложенного подхода к проектированию СШП печатных интегральных антенн.

Апробация результатов

Основные положения и результаты диссертации докладывались на следующих научных конференциях и семинарах:

- Progress in Electromagnetics Research Symposium, Moscow (2009, 2017);
- Научная конференция МФТИ (2010, 2012, 2017);
- International Conference Foundations & Advances in Nonlinear Science, Minsk (2012);
- Всероссийские открытые Армандовские чтения «Широкополосные и сверхширокополосные системы», Муром (2010, 2015, 2017, 2018);

- 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016), Севастополь (2016);
- 5-я Всероссийская микроволновая конференция, Москва (2017);
- 10-я Международная научно-техническая конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации», Российское НТОРЭС имени А. С. Попова, Суздаль (2017);
- Международная молодежная научно-практическая конференция «Путь в науку», Ярославль (2018).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 22 печатные работы, 7 – в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобразования и науки РФ, из них 7 – в журналах, индексируемых в наукометрических базах данных Web of Science и Scopus, и 14 тезисов докладов конференций, а также в главах книги «Процессы передачи и обработки информации в системах со сложной динамикой».

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы, в ней 158 страниц текста и 63 рисунков и 9 таблиц.

Краткое содержание работы

Во **введении** дана общая характеристика диссертации и ее структуры, сформулирована цель работы, обоснованы актуальность и научная новизна, определена практическая значимость работы.

Глава 1 представляет собой краткий обзор по двум ключевым для диссертации темам. Первая — взаимосвязь между характеристиками антенн и ограничения на эти соотношения, которые чаще называют фундаментальными физическими ограничениями. Вторая — обзор сперхширокополосных ненаправленных антенн, наиболее распространенных конфигураций с фокусом на печатные антенны и исследования, описывающие свойства и характеристики соответствующих типов антенн.

Знание фундаментальных ограничений, связывающих между собой ключевые характеристики антенн: электрический размер ka , коэффициент усиления G и относительную ширину диапазона рабочих частот B — позволяет инженерам оценить наименьший предельный размер для антенны с заданными электрическими свойствами, а именно с заданным диапазоном рабочих частот, коэффициентом отражения по входу, поляризацией и коэффициентом усиления. Или, наоборот, определить предельные электрические характеристики, например предельную ширину полосы, при заданных уровне коэффициента отражения по входу и геометрическом размере антенны. В дальнейшем прямой задачей физических ограничений антенн будем называть задачу поиска предельных электродинамических характеристик антенны при заданных геометрическом размере и факторе, а обратной — задачу поиска наименьшего размера антенны при заданных требованиях на электродинамические характеристики антенны.

Рассмотрены этапы развития теории электрически малых антенн, начиная с классических работ Уилера, который ввел понятие электрически малых антенн, и Чу, задавшего направление исследования фундаментальных ограничений для многих следующих авторов на десятки лет. Проведено

сравнение подходов различных авторов, в частности Харрингтона, Колина и Ротшильда, Фанте, МакЛина, Гейи, к выводу предельных выражений коэффициента усиления G , добротности Q и их отношения G/Q , основанных на предложенном Чу подходе — разложении по сферическим модам. Проанализированы допущения и приближения, использованные при выводе, и сформулированы связанные с этим ограничения применимости. Основное ограничение подхода Чу касается антенн с высокой долей запасенной энергией внутри окружающей антенну сферы, например линейный проволочный диполь. Показано, что несмотря на то, что такие антенны удовлетворяют описанным пределам, их характеристики далеки от предельных и могут отличаться в разы и даже на порядки. Поэтому при проектировании подобных антенн предельные соотношения могут быть использованы лишь для качественной оценки характеристик подобных антенн.

В главе 1 отдельное место занимает обзор работ Густафссона, основанных на использовании математического аппарата теории рассеяния, с помощью которого было получено выражение для фундаментального ограничения с учетом геометрической формы антенны. Эти результаты позволяют уточнить ограничения за счет учета геометрической формы антенны и ответить на вопрос, насколько характеристики антенны заданной геометрической формы и размера отличаются от предела Чу.

Следует отметить, что большинство вышеупомянутых и рассмотренных в главе 1 работ формулировали фундаментальные физические ограничения в терминах добротности и центральной частоты и поэтому не могут быть напрямую применены для случая СШП-антенн. Случай фундаментальных физических ограничений СШП-антенн стал одним из предметов исследования данной работы и детально рассмотрен в главе 2.

В конце главы 1 приведен обзор сверхширокополосных ненаправленных антенн, основных наиболее распространенных типов. Сделан акцент на

печатных антеннах как наиболее распространенных для применения среди мобильных устройств радиосвязи. Даны описания конструкций различных типов антенн, для каждого описана теория, объясняющая сверхширокополосные свойства и характеристики антенны. Представлены типичные характеристики, а также их зависимость от параметров геометрии антенн.

Глава 2 посвящена фундаментальному ограничению на свойства СШП-антенн произвольной формы. В ней выведено электродинамическое ограничение на характеристики антенн с полубесконечным диапазоном рабочих частот $(f_c; \infty)$, связывающее направленные свойства антенны, ее коэффициент направленного действия (КНД) D , коэффициент отражения по входу Γ , нижнюю частоту рабочего диапазона, габаритный размер антенны и учитывающее ее геометрическую форму.

$$\frac{(1-\Gamma_{\max}^2)D_{\min}}{k_c^3} \leq \frac{3}{2}\gamma. \quad (1)$$

где k_c – волновое число для нижней частоты f_c рабочего диапазона антенны, $\gamma = (\hat{p}_e^* \gamma_e \hat{p}_e + \hat{p}_m^* \gamma_m \hat{p}_m)$, а γ_e, γ_m – тензоры электрической и магнитной поляризуемости формы антенны соответственно, которые используются для связи дипольного момента рассеянного излучения с вектором поляризации падающей волны.

В дальнейшем подход обобщен на случай антенн с конечным интервалом диапазона рабочих частот $(f_b; f_a)$ и, соответственно, диапазоном длин волн $(\lambda_a; \lambda_b)$:

$$(1 - \Gamma_{\max}^2)D_{\min} \left(\frac{1}{k_b^3} - \frac{1}{k_a^3} \right) \leq \frac{3}{2}\gamma. \quad (2)$$

Получены выражения для ограничения снизу на волновое число, которое эквивалентно ограничению на нижнюю частоту рабочего диапазона, то есть решение прямой задачи физических ограничений антенн для случая

полубесконечного диапазона рабочих частот и для случая с конечным интервалом диапазона рабочих частот.

Для печатных СШП-антенн прямоугольной формы с линейной поляризацией была решена как прямая задача поиска выражения для нижней частоты рабочего диапазона (3), так и обратная задача оценки минимально достижимого размера (4):

$$f_c \geq 0.72 \frac{c}{2\pi a} \sqrt[3]{(1 - \Gamma_{\max}^2) D_{\min}} \quad (3)$$

$$a_{\min} = 0.72 \frac{\sqrt[3]{(1 - \Gamma_{\max}^2) D_{\min}}}{k_c}, \quad (4)$$

Для таких антенн показано, что минимально достижимый размер антенны в 1,9 раза больше предельного диаметра сферы Чу.

Применение полученного фундаментального ограничения продемонстрировано для ряда печатных антенн с линейной поляризацией. Зависимость соотношения (2), связывающего предельные характеристики СШП антенн, от отношения сторон печатной антенны прямоугольной формы приведена на рис. 1. Сопоставление характеристик печатных прямоугольных антенн линейной поляризации с разным отношением длин сторон с полученным фундаментальным ограничением показало, что характеристики антенн на графике лежат строго ниже точного предела.

Численно рассчитаны ограничения на электрический размер антенны, и показано отличие от ограничения, полученного в приближении Чу, на примере печатных прямоугольных антенн при различном соотношении сторон.

Показано, что выведенные соотношения (1) и (2) универсальны и демонстрируют, как в зависимости от ширины диапазона изменяются предельные характеристики антенны. На рис. 2 показана зависимость предельного значения электрического размера антенны от отношения граничных частот рабочего диапазона.

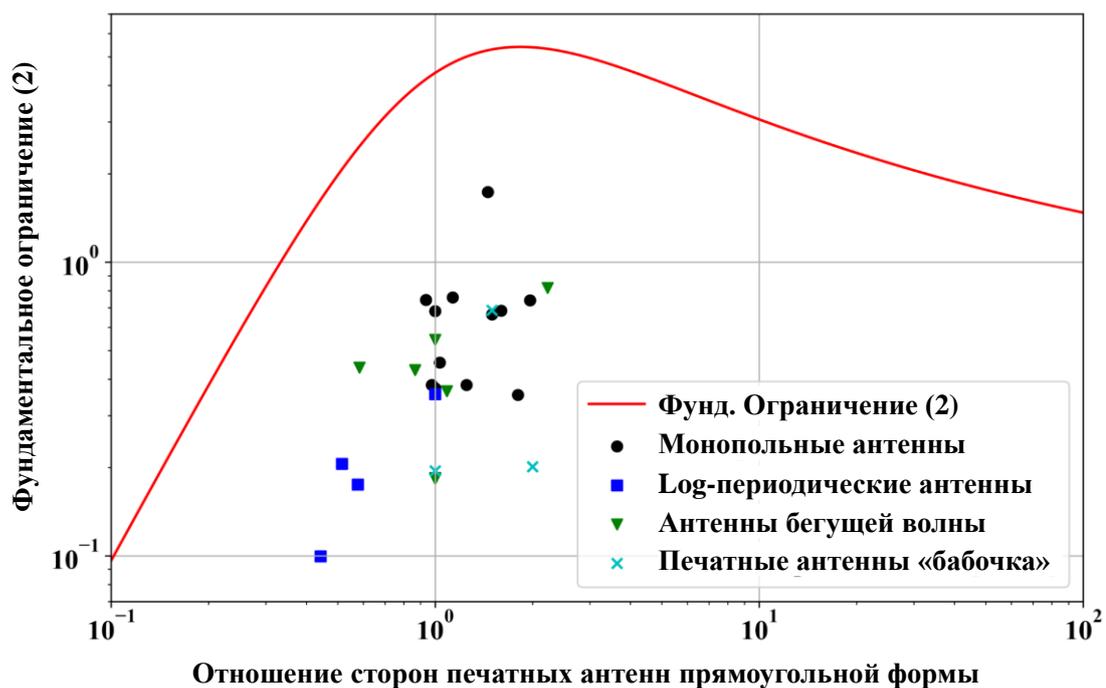


Рис. 1. Сопоставление характеристик опубликованных печатных СШП антенн различных типов линейной поляризации и прямоугольной формы с фундаментальным ограничением на их характеристики (2). По вертикальной оси отложены значения выражения (2) для предельного случая. Точки – характеристики антенн, по данным работ [50-73], см. раздел Литература диссертации.

Изображенная зависимость подтвердила ранее известный факт для случая узкополосных антенн: антенну можно спроектировать сколь угодно малого размера, если допускается пропорциональное сужение полосы. Однако если требуется сверхширокий диапазон рабочих частот, то существует ограничение снизу на электрический размер антенны, причем это ограничение обратно пропорционально кубическому корню из поляризуемости геометрической формы антенны (см. выражение (2)). В пределе соотношение для антенн с конечным интервалом диапазона рабочих частот (2) становится в точности равным пределу, выведенному для случая антенны с полубесконечным диапазоном рабочих частот (1).

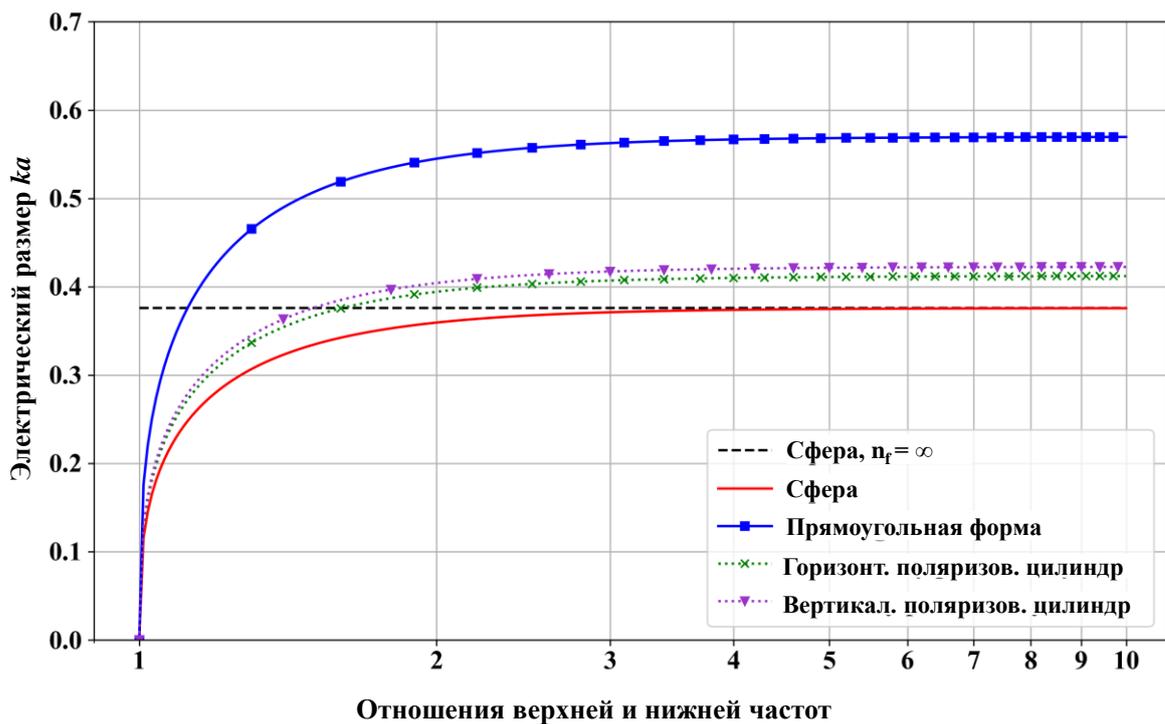


Рис. 2. Зависимость предельного электрического размера антенн от ширины диапазона рабочего диапазона частот (отношения верхней и нижней частот) для различных геометрий антенн: сферической, прямоугольной и цилиндрической формы. Для антенны цилиндрической формы рассмотрены два случая: горизонтальной и вертикальной поляризации антенны. Отношения сторон для цилиндрической и прямоугольной геометрий выбраны оптимальными. Предельный электрический размер, выведенный для случая полубесконечного диапазона рабочих частот и сферической геометрии обозначен на рисунке прямой.

Учет тензора поляризуемости геометрической формы антенны позволил продемонстрировать, что многие классические резонансные антенны, например, диполь, по своим характеристикам близки к предельным для данной геометрической формы и их отличие от предела Чу объясняется именно форм-фактором антенны. Аналогично и для случая СШП-антенны предельные характеристики антенн заданной геометрии могут значительно отличаться от предела Чу. Отдельно в главе 2 отмечено, что существует оптимум на соотношение сторон, габаритных размеров формы антенны. Так, например, для антенны прямоугольной формы максимальное значение предела достигается при отношении сторон 1,85. В отличие от классических

предельных соотношений, полученных ранее Чу-МакЛином и Густафссоном, выведенных в терминах добротности, соотношения в главе 2 сформулированы в терминах нижней частоты и отношения граничных частот рабочего диапазона антенны, что позволяет их использовать как для СШП-, так и для узкополосных антенн.

Глава 3 посвящена анализу свойств антенны типа «печатный монополь». Печатной монопольной антенной с излучателем в форме диска принято называть в антенной технике несимметричный печатный диполь с одним плечом, зачастую имеющим прямоугольную форму, и вторым плечом в форме диска, см. рис. 4.

Печатная монопольная антенна с излучателем в форме диска была выбрана для проведения исследования как одна из наиболее часто применяемых на практике печатных антенн, обладающих СШП свойствами.

На сегодняшний день наиболее распространены два подхода к обоснованию принципов работы печатной «монопольной» антенны и оценке ее свойств. Первый подход заключается в построении эквивалентной антенны в виде цилиндрического монополя и переноса всех свойств и характеристик, численно рассчитанных для цилиндрического монополя на планарную антенну. Подобным образом может быть оценена нижняя частота рабочего диапазона антенны:

$$f_L = \frac{c}{\lambda_{\max}} = \frac{c}{0,24 \cdot (d + r_{eq} + \Delta) \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (5)$$

- Δ – зазор между экраном и площадкой монополя
- r_{eq} – радиус эквивалентной цилиндрической монопольной антенны
- d – высота планарной монопольной антенны (равна диаметру монополя)
- ϵ_{eff} – эффективная диэлектрическая проницаемость антенны, связанная с наличием подложки конечной толщины.

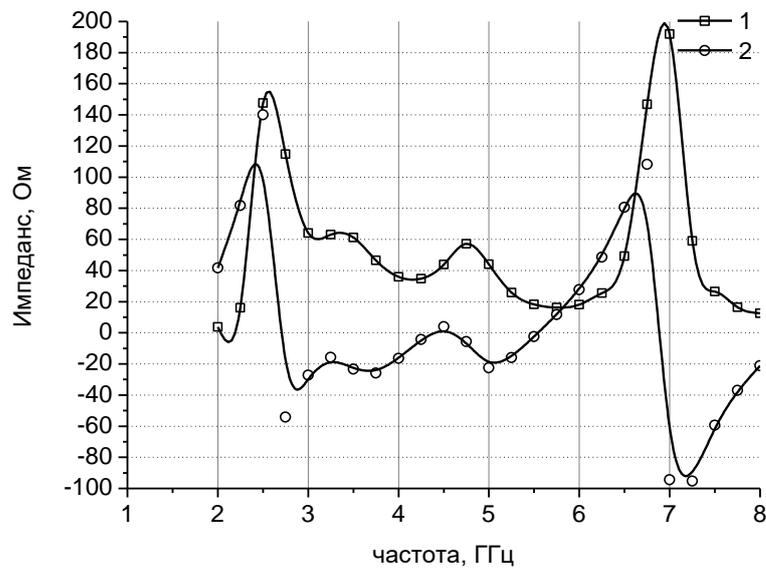
Однако серия численных экспериментов, проведенных автором, показала, что соотношение (5) корректно работает только в случае, если длина

прямоугольного экрана меньше диаметра диска монополя. Второй подход сфокусирован на объяснении сверхширокополосных свойств антенны наличием слабых резонансов, связанных с токами, текущими по кромке диска. Оба подхода не могут в полной мере дать инженерам руководство по проектированию антенн и выбору оптимальной топологии в зависимости от различных требований.

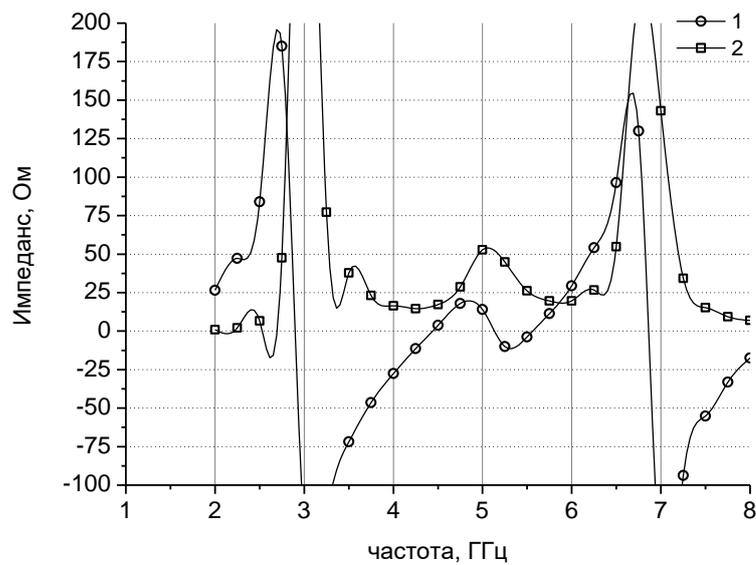
Ряд разработанных печатных монополярных антенн, а также серия численных экспериментов показали, что свойства «монополярной» антенны, ее ширина полосы рабочих частот может в зависимости от настройки изменяться в широких пределах. Для объяснения данных свойств был использован подход, заключающийся в исследовании частотной зависимости импеданса. Для анализа была проведена серия численных экспериментов, в которых ширина и экрана, и самого монополя постепенно уменьшалась как пропорционально, так и независимо друг от друга вплоть до предельного случая — проволочного диполя, — что позволило выделить на частотной характеристике различные резонансы. Рассмотрение случая широкополосной настройки (ширина полосы 30–50%) антенны показало, что положение резонансов на частотной зависимости импеданса хорошо описывается моделью несимметричного диполя (см. рис. 3). Учитывая этот факт, широкую полосу рабочих частот антенны подобного типа можно объяснить за счет несовпадения по частоте слабых резонансов, соответствующих различным плечам несимметричного диполя. Опираясь на это свойство в зависимости от применения, за счет изменения параметров топологии антенны можно варьировать ширину полосы настройки антенны в достаточно широких пределах.

Однако случай сверхширокополосной настройки модель эквивалентного несимметричного диполя не позволяет полностью объяснить. Как видно из рисунка 4, положение первых двух резонансных пиков для монополярной антенны и эквивалентного несимметричного диполя совпадают,

что позволяет сделать вывод об определяющем влиянии дипольной моды на низкочастотные свойства антенны. Однако в области высоких частот (выше 6 ГГц) характеристики антенн кардинально отличаются. Обоснование высокочастотных свойств монополярной дисковой печатной антенны может быть найдено при рассмотрении токовых мод, возбуждаемых в зазоре между экраном и диском. Фактически такая конфигурация представляет собой две включенных в параллель и направленных в противоположные стороны антенны Вивальди (щелевой антенны переменной ширины).



а)



б)

Рис. 3. Частотная зависимость действительной (кривая 1) и мнимой (кривая 2) частей входного импеданса печатной монополярной антенны (а) и эквивалентного тонкого несимметричного диполя (б).

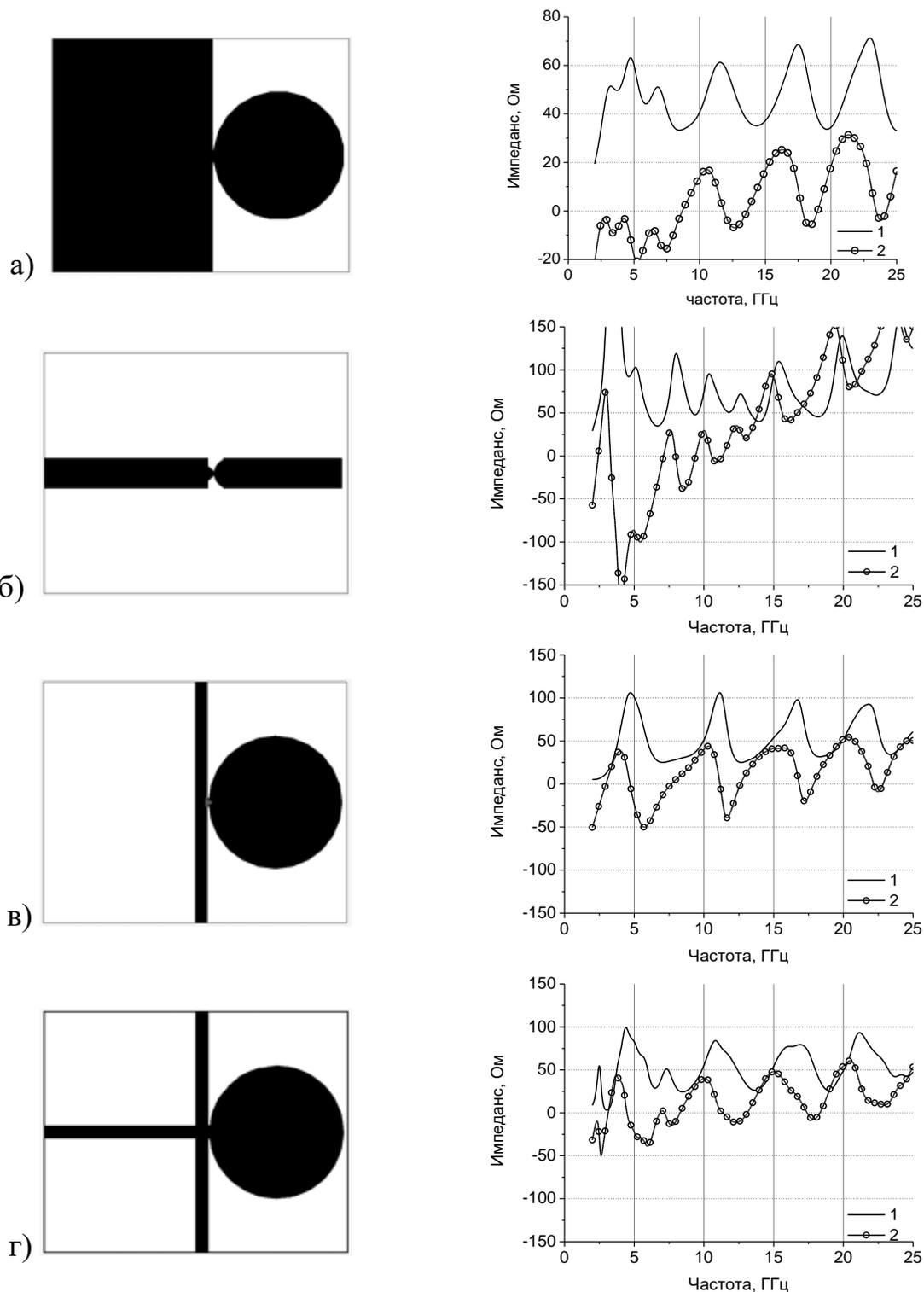


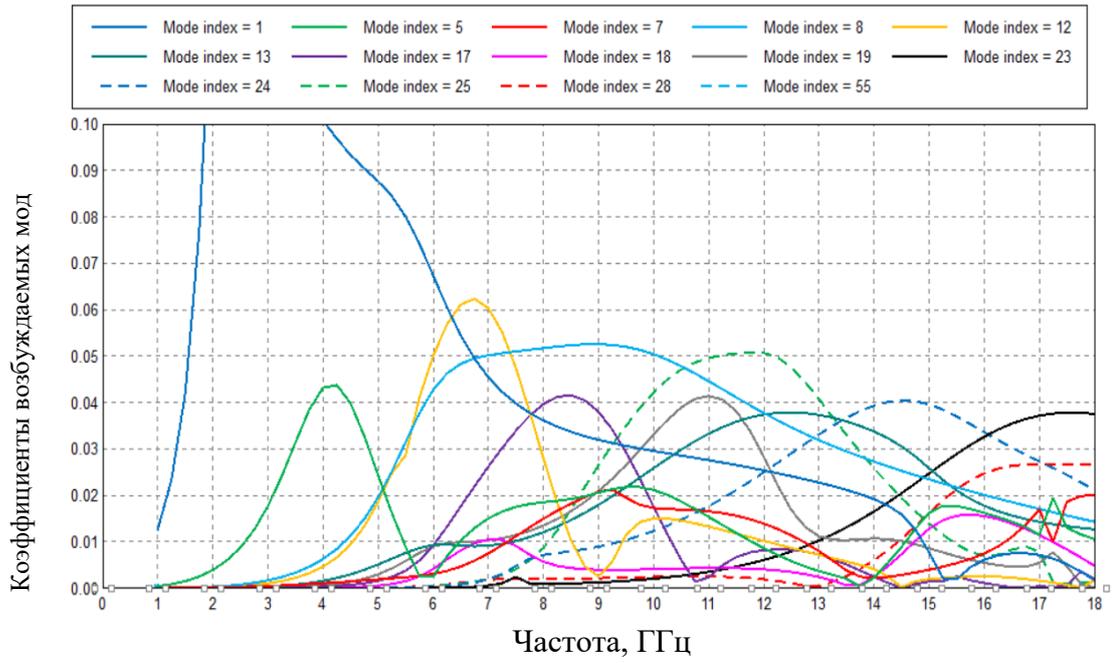
Рис. 4. Сравнение частотных зависимостей входного импеданса антенны для различных топологий: а) – печатная монополярная антенна диапазона 2,5-25 ГГц, б) – модель антенны (несимметричный диполь) с выделенными дипольными модами, в) – модель антенны, представляющая собой антенну Вивальди и с подавленными дипольными модами, г) – гибридная топология, в которой способны возбуждаться как распределения токов, соответствующие дипольным модам, так и щелевым. Сплошная линия соответствует действительной части импеданса, сплошная линия с маркерами в виде окружности – мнимой.

Для верификации выводов, полученных «наивным» методом анализа резонансных особенностей АЧХ импеданса печатной «монопольной» антенны, в дальнейшем был произведена серия численных расчетов характеристических мод, возбуждаемых в структуре антенны. Показано, что структура монопольной антенны поддерживает возбуждение достаточно большого количества серий мод различной природы (см. рис. 5), как емкостных, так и индуктивных. Емкостные моды (см. рис. 6), возбуждаемые в структуре, определяют свойства антенны в нижней части рабочего диапазона, в то время как в верхней части рабочего диапазона антенны преимущественно возбуждаются индуктивные моды диска и прямоугольника (см. рис. 7), не обладающие ярко выраженным резонансным характером. Основная мода по своей структуре токов является дипольной модой, и частота, на которой она возбуждается, определяет нижнюю частоту рабочего диапазона. Для оценки эффективной длины эквивалентного диполя основной моды выведено эмпирическое соотношение:

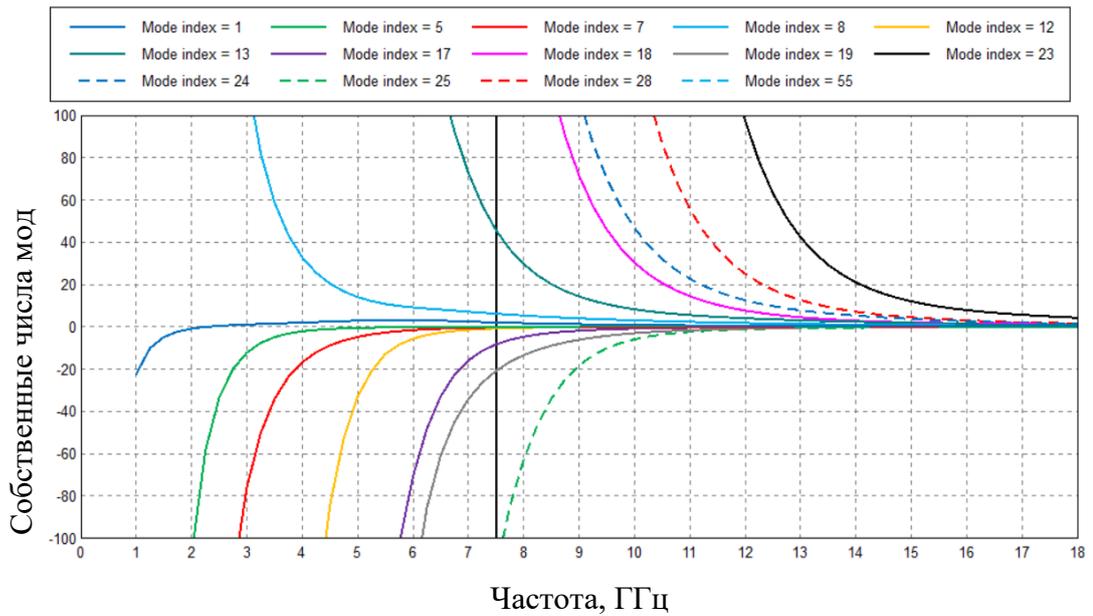
$$L_{eff} = L_{eff}^{sym} + \left(l - \frac{L_{eff}^{sym}}{2} \right) \cdot \left[1 + 0,63 \cdot \frac{w_{gr} - d}{L_{eff}^{sym} / 2} \right], \quad (6)$$

где L_{eff}^{sym} – эффективная длина эквивалентного диполя для симметричного случая. Для случая СШП настройки антенны L_{eff}^{sym} может быть приближенно оценено как πd_{disk} .

Сверхширокополосные свойства монопольной антенны могут быть объяснены возбуждением мод разных типов: дипольной, мод, связанных с диском и прямоугольным плечом, и мод Вивальди, – возбуждение которых в совокупности может обеспечить рабочий диапазон с отношением граничных частот 20:1 и более. Следствием представленного в данной главе исследования свойств антенны типа «печатный монополь» являются рекомендации по проектированию антенн, сформулированные в разделе 3.5 диссертации.

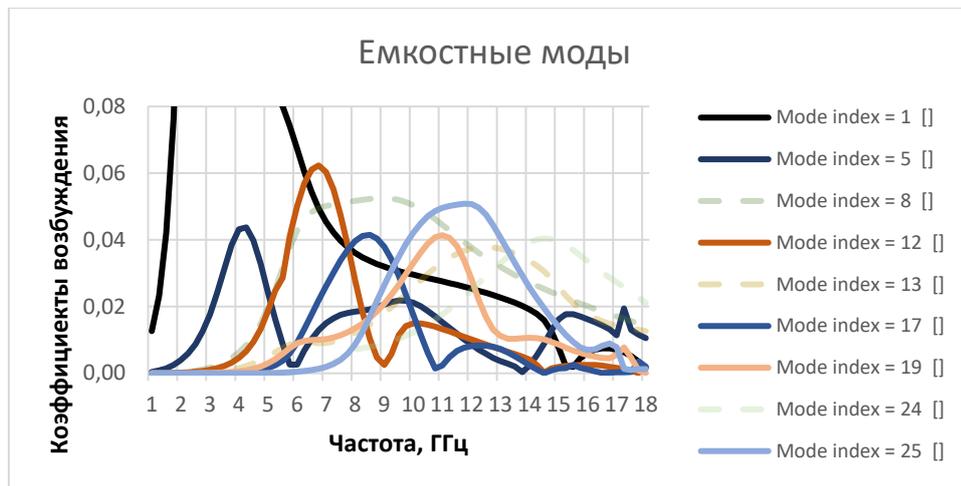


а)

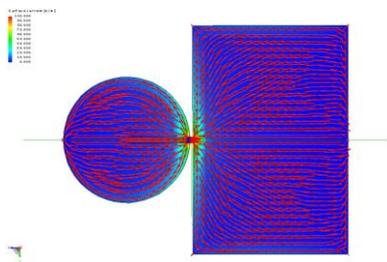


б)

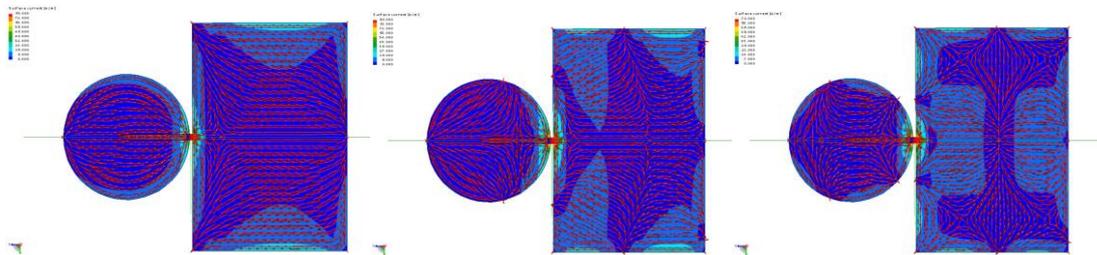
Рис. 5. а) частотная зависимость коэффициентов возбуждения различных характеристических мод и б) частотная зависимость собственных чисел мод, возбуждаемых в СШП-антенне типа «печатный монополь»



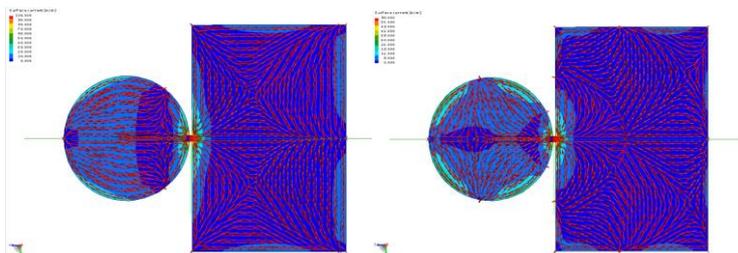
а)



б) Дипольная мода – основана (MI = 1)

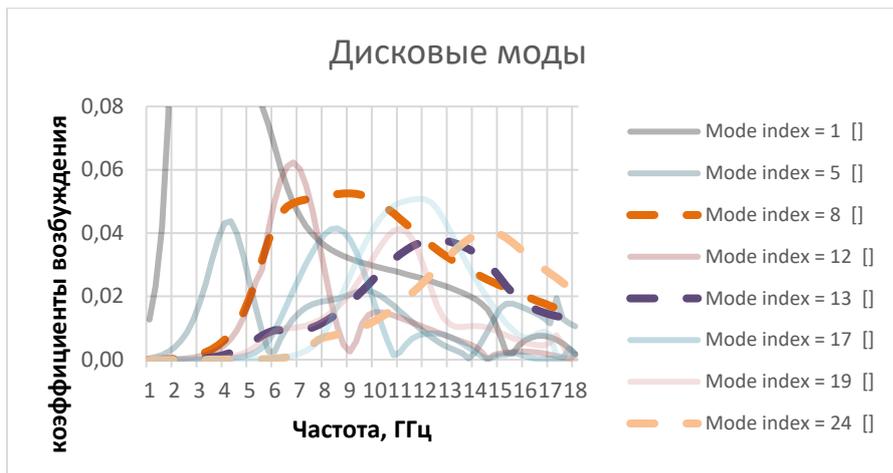


в) Моды прямоугольника: MI = 5, MI = 17, MI = 25

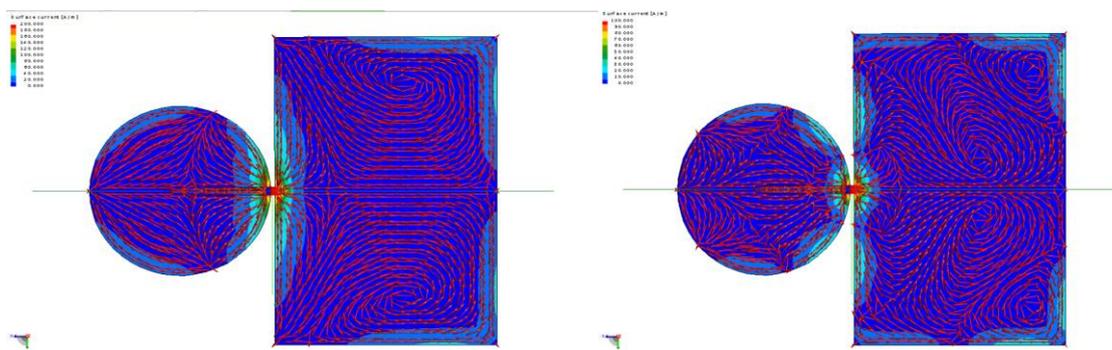


г) Моды диска: MI = 12, MI = 19

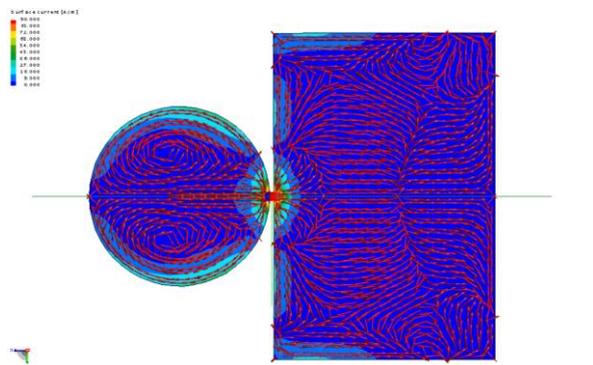
Рис. 6. В СШП печатной монополярной антенне возбуждаются емкостные моды различных типов: дипольная, серии мод диска и прямоугольной земли. На рис. а) представлена частотная зависимость коэффициентов возбуждения мод, а на рис. б, в, г – распределения токов на резонансных частотах для дипольной моды, мод прямоугольника и диска соответственно.



а)



б) Индуктивные моды прямоугольника: $MI = 8$, $MI = 24$



в) Индуктивные моды диска: $MI = 13$

Рис. 7. В СШП печатной монопольной антенне возбуждаются индуктивные моды двух различных типов: связанные с вихревыми токами в диске (в) и в прямоугольной земле (б). Частотная зависимость коэффициентов возбуждения мод представлена на рис. (а), а распределения токов на рис. (б) и (в).

В главе 4 представлены основные принципы проектирования интегральных печатных антенных структур на всех этапах разработки антенны. Печатные антенны, выполненные на одной подложке и в одном технологическом процессе вместе с СВЧ приемо-передающими цепями, стали популярны в последнее время благодаря технологичности, воспроизводимости характеристик, а также более высокой надежности работы устройства вследствие отсутствия соединительных элементов. Для устройств с антеннами, близкими к минимальному размеру, определяемому фундаментальным ограничением, дальнейшая миниатюризация возможна за счет более компактного расположения антенной и радиоэлектронной частей. Например, схема приемопередатчика может быть расположена на земляном плече печатной монополярной антенны (см. рис. 8).

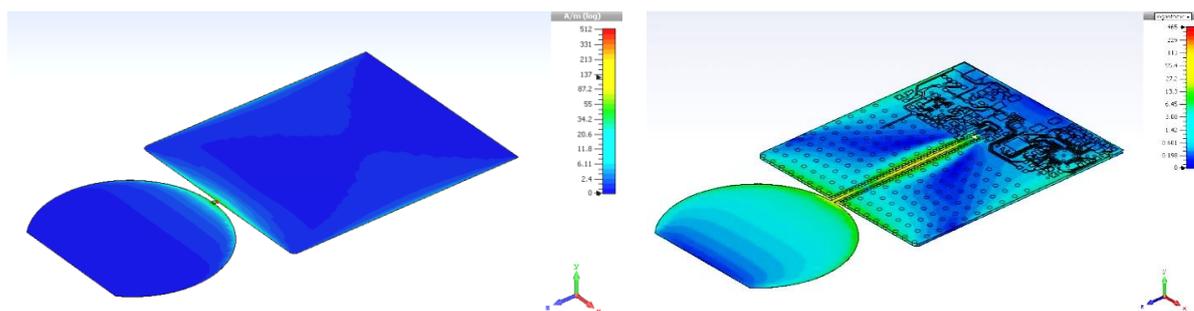


Рис. 8. Пример интегральной компоновки приемопередатчика на земляном плече печатной монополярной антенны

Сложность разработки подобных антенн связана с учетом эффектов взаимодействия (электромагнитной совместимости) цепей приемопередающей схемы, управления и питания с антенной структурой и, как следствие, отличием характеристик итоговой интегральной антенны от идеальной антенны без приемопередающих цепей. Сложность численного моделирования интегральных антенн связана с необходимостью применения мелкой сетки разбиения при электромагнитном моделировании, что, в свою очередь, требует серьезных вычислительных мощностей и значительного временного ресурса при многократном повторении расчета для каждого из

вариантов топологии в итерационном процессе разработки и последующей оптимизации интегральных антенн (о чем будет рассказано ниже).

Для анализа свойств и проектирования интегральных печатных СШП антенн может быть использована следующая методология, предложенная в главе 4. Концептуально методология представлена на рис. 9 и состоит из следующих этапов: (1) анализ требований, выбор конфигурации антенны и проверка на соответствие фундаментальному пределу; (2) анализ и проектирование идеальной изолированной антенны по заданным требованиям в отсутствие интегральных цепей приемо-передающего модуля; (3) измерение и анализ экспериментальных образцов изолированной антенны без интегральных цепей; (4) определение устойчивости характеристик по отношению к основным геометрическим параметрам структуры антенны и анализ собственных мод, возбуждаемых в структуре антенны для определения ограничений на трассировку интегральных цепей; (5) итеративное проектирование топологии приемопередатчика с последующим электромагнитным анализом и оптимизации структуры модуля в целом и повторный анализ и измерение экспериментальных образцов интегральных структур, см. пункт (3) выше.

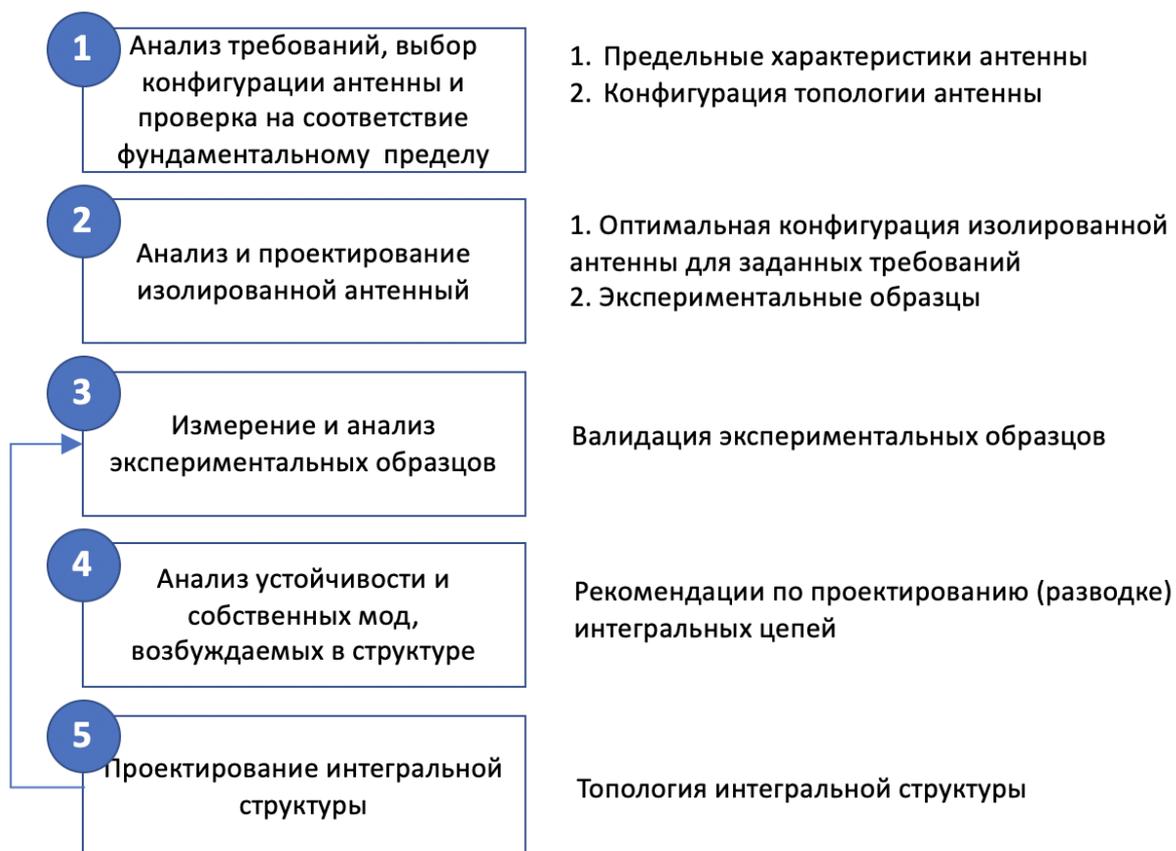


Рис. 9. Диаграмма, описывающая методологию анализа и проектирования интегральных печатных СШП антенн.

Описанный подход рассмотрен применительно к проектированию приемно-передающего модуля диапазона 3–5 ГГц. В качестве антенны для подобного модуля на основе прямохаотического приемопередатчика связи была выбрана печатная интегральная монополярная антенна. Область земляного электрода антенны была использована для размещения схемы приемопередатчика, что позволит значительно снизить эффективный размер устройства, но усложнила процесс разработки из-за необходимости учета требований электромагнитной совместимости устройства с антенной. Полученные результаты численного электродинамического моделирования антенны были подтверждены экспериментальными измерениями опытных образцов и хорошо подтвердили применимость предложенного подхода к проектированию и применимость интегральной компоновки печатной

монополярной антенны для целей миниатюризации беспроводных устройств радиосвязи.

В главе 5 собраны результаты проектирования ряда ШП и СШП печатных антенн различных конфигураций и топологий, разработанных для применения в устройствах беспроводной радиосвязи на основе прямохаотических приемопередатчиков, в персональном дозиметре микроволнового электромагнитного излучения, в ячейке приемника радиосвета и в других. Автором спроектированы более десятка различных ШП и СШП-антенн, в данной работе представлены выборочные примеры антенн различных типов и топологий, включая широкополосную дипольную («антенну-бабочку»), F-образную антенну, проволочную спиральную и ШП и СШП монополярные антенны в различных конфигурациях и компоновках, включая антенны с интегральной компоновкой, позволяющей сократить габариты устройства за счет расположения приемно-передающих цепей поверх топологии антенны (разделы 5.3, 5.4). Экспериментально измеренные характеристики разработанных антенн, совпадающие с расчетными, являются хорошим подтверждением применимости предложенного подхода к анализу свойств и проектированию интегральных антенн, описанному в главе 4.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Для СШП антенн получено ограничение на нижнюю частоту рабочего диапазона частот, которое определяется выражением, зависящим от геометрического размера, форм-фактора и требований к рабочей полосе частот.
2. Представлен подход к оценке электродинамических характеристик СШП-антенны при заданном геометрическом размере и, наоборот, предельного размера при заданных требованиях на электродинамические характеристики и геометрическую форму.

3. Объяснены СШП свойства печатной монополярной антенны через проведенный анализ собственных мод, возбуждаемых в структуре антенны. Выведено эмпирическое выражение для предельных характеристик (нижней частоты рабочего диапазона) печатной монополярной антенны, а также представлены рекомендации к проектированию антенн данного типа для различных требований на ширину рабочего диапазона частот.
4. Продемонстрирована возможность уменьшения размеров беспроводных устройств связи методом интегрального размещения цепей приемопередатчика внутри топологии печатной монополярной антенны.
5. На примере разработанных антенн для приемопередатчиков на основе СШП хаотических сигналов продемонстрирована применимость на практике предложенного способа анализа свойств и проектирования интегральных печатных антенн.

Публикации автора по теме диссертации

1. **Uvarov A.V., Chybinskiy N.P., Uvarov A.V.** 3-5GHz Ultra-Wideband Omnidirectional Printed Circuit Antenna // Proc. of Progress in Electromagnetics Research Symposium / Moscow, 2009, P. 1508–1512
2. **Уваров А.В.** Анализ электромагнитной совместимости печатной монополярной антенны со схемой приемо-передающего блока, выполненного на одной подложке с антенной // Сборник трудов 53-й научной конференции МФТИ, Секция Прикладные информационные технологии / Долгопрудный, 2010, С. 148–149
3. **Уваров А.В., Уваров А.В., Дмитриев А.С.** Сверхширокополосная ненаправленная печатная монополярная антенна диапазона 2,5 – 25 ГГц // Сборник трудов III Всероссийская научная конференция «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике», Секция Генерирование и излучение широкополосных и сверхширокополосных сигналов / Муром, 2010, С. 95–99
4. **Uvarov A.V.** Miniaturized conformal printed antennas for wireless communication based on chaotic transceiver: design and comparative analysis // Proc. of International Conference Foundations & Advances in Nonlinear Science / Minsk, 2012, P. 64–73
5. **Уваров А.В.** Комформные печатные антенны мобильных устройств беспроводной передачи данных: сравнительный анализ монополярной и перевернутой F-образной антенн // Сборник трудов 55-й научной конференции МФТИ, Секция Прикладные информационные технологии / Долгопрудный, 2012
6. **Уваров А.В.** Частотные характеристики печатной дисковой монополярной антенны // Успехи современной радиоэлектроники, 2013, № 3, С. 103–109
7. **Уваров А.В., Уваров А.В.** Современные тенденции миниатюризации СШП антенн мобильных устройств // Сборник трудов V Всероссийских

- открытых Армандовских чтений, Секция Широкополосные и сверхширокополосные системы / Муром, 2015, С. 220–224
8. Дмитриев А.С., Ицков В.В., Герасимов М.Ю., **Уваров А.В.** Экспериментальная ячейка приемника радиосвета // Сборник трудов 26ой Международной Крымской Конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КРЫМИКО'2016) / Севастополь, 2016, С. 2908–2912
 9. **Uvarov A.V.**, Gerasimov M.Yu., Uvarov A.V. Designing a printed miniature antenna for 3-5 GHz range integrated on PCB with UWB direct chaotic transceiver module // Proc. of Progress in Electromagnetics Research Symposium, Saint-Petersburg, 2017, PP. 2680–2687.
DOI: 10.1109/PIERS.2017.8262206
 10. **Уваров А.В.**, Уваров А.В. Особенности метода проектирования печатной интегральной антенны на примере прямохаотического приёмопередатчика диапазона 3-5 ГГц // Сборник трудов VII Всероссийских открытых Армандовских чтений, Секция Методические и аппаратурные вопросы радиолокации / Муром, 2017, С. 323–329
 11. **Уваров А.В.**, Уваров А.В. Анализ подходов построения электрически малой СШП печатной антенны диапазона 1-10 ГГц // Сборник трудов 60-ой Научной конференции МФТИ, Секция Радиофизики и радиоэлектронных информационных систем / Долгопрудный, 2017, С. 91–92
 12. Герасимов М.Ю., Дмитриев А.С., Рыжов А.И., **Уваров А.В.** Персональная дозиметрия электромагнитного излучения // Сборник трудов 10-й Международной научно-технической конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации». Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. / Суздаль 2017, С. 124–127

13. **Уваров А.В.**, Уваров А.В. Сравнительный анализ СШП печатных антенн и ограничений на их характеристики // Сборник трудов V Всероссийской микроволновой конференции / Москва, 2017, С. 5–8
14. Гуляев Ю.В., Дмитриев А.С., Ицков В.В., Петросян М.М., Рыжов А.И., **Уваров А.В.** Ячейка приемника радиосвета // Радиотехника и Электроника, 2018, Т. 63, № 9, С. 947–952
DOI: 10.1134/S1064226918090085
15. Гуляев Ю.В., Дмитриев А.С., Ицков В.В., Петросян М.М., Рыжов А.И., **Уваров А.В.** Экспериментальная ячейка приемника радиосвета // Письма в журнал технической физики, 2018, Т. 44, № 21, С. 81
DOI: 10.1134/S1063785018110081
16. Дмитриев А.С., Ицков В.В., Петросян М.М., Рыжов А.И., **Уваров А.В.** Приемник радиосвета с накоплением // Сборник трудов VIII Всероссийских открытых Армандовских чтений, Секция Современных проблем дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Муром, 2018, С. 602–608
17. Герасимов М.Ю., Дмитриев А.С., Рыжов А.И., **Уваров А.В.** Дозиметр электромагнитного излучения для персонального использования // Сборник трудов Международной молодежной научно-практической конференции «Путь в науку» / Ярославль, 2018, С. 186-192
18. **Уваров А.В.**, Герасимов М.Ю., Уваров А.В. О фундаментальных ограничениях сверхширокополосных антенн // Радиотехника и Электроника, 2019, Т. 64, № 3, С. 268–273
DOI: 10.1134/S1064226919030185
19. **Уваров А.В.**, Ицков В.В., Уваров А.В. Теория фундаментальных ограничений антенн. Подход разложения поля по сферическим модам. Обзор // Физические основы приборостроения, 2019. Т. 7. № 4 (30), С. 56–69, DOI: 10.25210/jfor-1804-056069
20. Андреев Ю.В., Гуляев Ю.В., Дмитриев А.С., Ефремова Е.В. и др. Процессы передачи и обработки информации в системах со сложной

динамикой, Глава 6. «Приемопередатчики на сверхширокополосных хаотических сигналах» // Техносфера, Москва, 2019

21. Дмитриев А.С., Ицков В.В., Рыжов А.И., **Уваров А.В.** Микроволновая электромагнитная дозиметрия персонального экологического пространства. // Физические основы приборостроения. 2020. Т. 9. №1 (35), С. 85–99, DOI: 10.25210/jfor-2001-085099
22. **Уваров А.В.** Физические ограничения сверхширокополосных антенн // Физические основы приборостроения. 2021. Т. 10. №2 (40), С. 66–75, DOI: 10.25210/jfor-2102-064073
23. **Уваров А.В.** Анализ характеристических мод, возбуждаемых в антенне типа «печатный монополь», 2021 (готова к публикации)

Уваров Антон Владимирович

Сверхширокополосные печатные ненаправленные интегральные антенны для устройств беспроводной радиосвязи

Подписано в печать 13.12.2021 г.

Печать трафаретная

Усл.п.л. – 1,5

Заказ №

Тираж: 100 экз.

Типография «МДМпринт»

ИНН 7704815108

115280, г. Москва,

ул. Автозаводская, 25

+7 (495) 256-10-00

www.mdmprint.ru