

**УТВЕРЖДАЮ**

Первый проректор федерального  
государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Ярославский  
государственный университет им.  
П.Г. Демидова»

Кащенко С. А.

«31» января 2022 г.

## **ОТЗЫВ**

**ведущей организации**

**Федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования «Ярославский государственный  
университет им. П.Г. Демидова»**

**на диссертационную работу Уварова Антона Владимировича  
«Сверхширокополосные печатные ненаправленные интегральные  
антенны для устройств беспроводной радиосвязи», представленную на  
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 2.2.14 «Антенны, СВЧ устройства и их технологии»**

Диссертационная работа Уварова А.В. посвящена разработке и исследованию технологий построения широкополосных и сверхширокополосных печатных антенн интегрально-реализуемых с цепями приёмопередатчика. Рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с физическими ограничениями на характеристики СШП печатных антенн, исследованы оптимальные свойства антенн, проведен анализ антенн с позиции физических свойств. К числу наиболее важных результатов работы следует отнести решение проблемы интегральной компоновки беспроводных устройств радиосвязи с печатными антеннами, подразумевающее расположение цепей приёмопередатчика внутри топологий антенн. Получены многочисленные расчёты проектирования СШП печатных интегральных

антенн различного диапазона частот, оптимизированные по размеру и близкие к полученному пределу.

### **Актуальность темы диссертационной работы**

В настоящее время активно развивается область сверхширокополосных и многодиапазонных многофункциональных систем, построенных с использованием печатных антенн. При этом в современных устройствах связи часто применяются компактные конфигурации проектируемых антенн, в том числе выполненных на одной подложке и в одном технологическом процессе вместе с приемо-передающими цепями.

Для решения задачи проектировки антенны заданных характеристик и минимальных массо-габаритных параметров важно понимать физические ограничения на характеристики антенн. Большинство исследований по данной теме сфокусированы на узкополосных антеннах, при анализе которых используется только одна (основная) мода возбуждения. В данной работе выведены физические ограничения для печатных СШП антенн, сформулированные в терминах нижней частоты рабочего диапазона и его ширины.

В работе исследуется новый подход к проектированию интегральной компоновки антенны и приемо-передающих цепей. Интеграция печатных антенн на одной подложке с приемопередающим модулем в рамках одного технологического процесса представляет значительный интерес в современных прикладных исследованиях и позволяет разработчику не использовать для установки антенны разъемы и дополнительные настроечные соединительные схемы, а также отказаться от процесса монтажа антенны в устройство, что снижает себестоимость печатной платы. Кроме того, предложенный способ дополнительной миниатюризации размера готового устройства, по сути, представляет собой новый метод конструирования данного класса антенн.

Таким образом, актуальность работы А. В. Уварова не вызывает сомнений.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

- Получено предельное соотношение для СШП антенн произвольной формы в терминах нижней частоты и отношения крайних частот рабочего диапазона, связывающее геометрию и размеры с характеристиками антенн.
- Получены предельные характеристики для прямоугольных печатных СШП антенн с линейной поляризацией. Используемая методика составляет основу для расчёта предельных характеристик СШП антенн с другой топологией и поляризацией.
- Для монопольной печатной антенны получена зависимость нижней частоты рабочего диапазона от характеристик основной дипольной моды, возбуждаемой в структуре антенны. Таким образом определено эмпирическое соотношение для оценки нижней частоты рабочего диапазона.
- Предложен метод исследования и оптимизации интегральной компоновки беспроводных устройств радиосвязи с печатными антеннами, получивший подтверждение в расчётах и на практике.

**Обоснованность результатов** следует из соответствия расчетов и оценок, полученных и используемых автором, известным из литературы теоретическим положениям, а также соответствием данных теоретических оценок и данных моделирования результатам полученным экспериментальным путем.

**Полнота публикации материалов и апробация работы.** Материалы диссертации отражены в двадцати двух печатных работах, семь статей опубликованы в журналах из списка ВАК, и семь опубликованы в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus. Также результаты работы автора нашли отражения в главах книги «Процессы передачи и обработки информации в системах со сложной динамикой».

**Теоретическая и практическая значимость результатов.**

Теоретическая значимость диссертации заключается в полученном фундаментальном физическом ограничении на характеристики антенн в терминах нижней частоты рабочего диапазона и его ширины, которое может быть использовано для оценки предельных свойств СШП антенн и взаимосвязи между ключевыми характеристиками антенн для любых типов антенн и их геометрий.

Результаты диссертационной работы имеют практическое значение. Так, в результате исследований было представлено численное выражение для нижней частоты рабочего диапазона печатных СШП антенн прямоугольной формы с линейной поляризацией, которое может быть использовано для оценки предельных характеристик проектируемых антенн различных типов и выбора наиболее оптимальной конфигурации. В дополнение – спроектирован ряд печатных антенн для устройств беспроводной радиосвязи на основе прямохаотических приемопередатчиков. Отдельно стоит отметить представленные в главе 4 универсальный метод проектирования интегральных печатных антенных структур.

**Значимость полученных автором диссертации результатов** для развития теории антенн, СВЧ устройств и их технологий заключается в комплексном исследовании свойств, подходов к анализу, проектированию и оптимизации сверхширокополосных печатных ненаправленных интегральных антенн для устройств беспроводной радиосвязи. Полученные результаты позволяют оценивать предельные характеристики антенн произвольной геометрической формы и проверять разработанные образцы на соответствие пределу. Ряд разработанных автором антенн использованы в экспериментальных устройствах беспроводной радиосвязи на основе хаотических сигналов, так и могут быть использованы в качестве прототипов антенн СШП или многодиапазонных приемопередающих систем.

Опубликованные по теме диссертации печатные работы достаточно полно освещают основные результаты диссертации. Автореферат

соответствует диссертации и в полном объеме отражает ее содержание. Работа написана научным языком.

### **Краткий обзор диссертации**

**Во введении** автором обоснована актуальность темы диссертационного исследования и формулируются положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** анализируется состояние вопроса взаимосвязи между характеристиками антенн и ограничения на эти соотношения, которые чаще называют фундаментальными физическими ограничениями. А также даётся обзор сперширокополосных ненаправленных антенн, наиболее распространенных конфигураций с фокусом на печатные антенны.

**Вторая глава** 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  $\Gamma$ , нижнюю частоту рабочего диапазона, габаритный размер антенны и учитывающее ее геометрическую форму. Так же выведено более общее выражение для антенн с конечным диапазоном рабочих частот, сформулированное в терминах нижней частоты и отношения граничных частот рабочего диапазона антенны. Показано, что выведенные соотношения, могут быть использованы как для СШП-, так и для узкополосных антенн.

**Третья глава** посвящена анализу свойств антенны типа «печатный монополь». Показано, что структура монопольной антенны поддерживает возбуждение достаточно большого количества серий мод различной природы, как емкостных, так и индуктивных. Емкостные моды, 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, 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.

Показано, что сверхширокополосные свойства монополярной 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.

**В четвертой главе** представлены основные принципы проектирования интегральных печатных антенных структур на всех этапах разработки антенны. Предложена методология для анализа свойств и проектирования устройств с антеннами, близкими к минимальному размеру, определяемому фундаментальным ограничением, для которых дальнейшая миниатюризация возможна за счет более компактного расположения антенной и радиоэлектронной частей. 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.

**В пятой главе** представлены 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.

**В заключении** сформулированы выводы и кратко перечислены основные результаты диссертационной работы.

#### **Личный вклад автора**

Все выносимые на защиту результаты и положения, составляющие основное содержание диссертации, в том числе опубликованные с соавторами, получены Уваровым А.В. лично или при его непосредственной участии.

**Рекомендации по использованию результатов.** Проведённые в диссертационной работе исследования открывают для инженеров перспективу оценки электродинамических характеристик СШП антенны при заданном геометрическом размере и, наоборот, предельного размера при заданных требованиях на электродинамические характеристики и геометрическую форму. Помимо этого, объясненные СШП свойства печатной монополярной антенны и выведенное эмпирическое выражение для предельных характеристик (нижней частоты рабочего диапазона) печатной монополярной антенны, позволяют проектировать антенны данного типа для различных требований на ширину рабочего диапазона частот. А также добиваться большего уменьшения размеров беспроводных устройств связи методом интегрального размещения цепей приемопередатчика внутри топологии печатной монополярной антенны.

**По диссертационной работе имеются замечания:**

1. Представленные в первой главе обзорные материалы как по вопросу фундаментальных физических ограничений, так и по обзору наиболее популярных конструкций СШП антенн выполнен излишне детально.
2. В главе 2 следовало бы явно раскрыть зависимость выведенных физических ограничений и, в частности, тензора поляризуемости от диэлектрических свойств подложки печатной платы.
3. Автор вывел эмпирическое соотношение для определения резонансной частоты только для основной моды антенны типа «печатный монополь», которое позволяет оценивать нижнюю частоту рабочего диапазона и может быть использовано в качестве начальной оценки при проектировании антенн данного типа. При этом в работе не затронуты вопросы вывода подобных соотношений для мод следующего порядка, что так же было бы полезно для оценки ширины рабочего диапазона проектируемой антенны.

4. Следует уточнить цель работы автора, добавив разработку метода создания компактных антенн при сохранении их электрических свойств. Такой метод фактически представлен в работе и является ценным результатом.
5. В результаты работы следовало бы вынести конкретные примеры улучшения характеристик радиоэлектронных устройств за счет использования в них разработанных автором антенн.

Отмеченные замечания носят ограниченный характер и, в целом, не снижают научной ценности и практической значимости работы Уварова А.В.

### **Заключение**

В диссертационной работе А.В. Уварова получены новые научно обоснованные и практически значимые результаты, связанные с фундаментальными физическими ограничениями печатных СШП антенн непосредственно применимые к проектированию такого класса антенн, их интегрального расположения вместе с цепями приемо-передатчика. Диссертационная работа написана ясно, экспериментальный и теоретический материал излагается достаточно подробно, на хорошем профессиональном уровне. Основные результаты работы опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных журналах и неоднократно докладывались на представительных международных конференциях. Диссертация соответствует специальности 2.2.14 «Антенны, СВЧ устройства и их технологии», автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация «Сверхширокополосные печатные ненаправленные интегральные антенны для устройств беспроводной радиосвязи» является законченной квалификационной работой, которая удовлетворяет п.9. «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ № 842 от 24.09.2013. Автор диссертации Уваров Антон Владимирович заслуживает присуждения степени кандидата



физико-математических наук по специальности 2.2.14 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

Отзыв ведущей организации на диссертацию Уварова А.В. подготовлен д.т.н., профессором Л.Н. Казаковым, на основании обсуждения на расширенном заседании кафедры Радиотехнических систем ЯрГУ им. Демидова с участием ряда приглашенных докторов наук по рассматриваемой тематике.

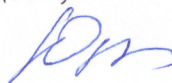
от «20» января 2022 года.

Заведующий кафедрой

радиотехнических систем

физического факультета ЯрГУ им. П.Г. Демидова,

доктор технических наук, профессор



Казаков Л.Н.