

Минобрнауки России
Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт радиотехники и электроники
им. В.А.Котельникова
Российской академии наук
ул. Моховая, д. 11, корп. 7, Москва, 125009
Тел. +7 (495) 679-35-74, факс +7 (495) 629-36-78
ire@cplire.ru, http://www.cplire.ru

Председателю совета по защите диссертаций
на соискание ученой степени кандидата наук,
на соискание ученой степени доктора наук,
24.2.327.01
на базе федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»
д.т.н., профессору Кузнецову Юрию Владимировичу

Волоколамское ш., д.4, г. Москва, 125993

19210-6295-687
04.12.2024

Уважаемый Юрий Владимирович!

В соответствии с Вашим запросом (исх. № 010/1937-1 от 05.09.2024) направляю отзыв ведущей организации на диссертацию Семененко Владимира Николаевича на тему: «Композитные материалы для антенной техники и СВЧ-устройств в сверхшироком диапазоне частот» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии (технические науки).

Приложение:

1. Отзыв ведущей организации, 2 экз. на 8 л. каждый.
2. Выписка из протокола заседания Научно-квалификационного семинара отдела 13 ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН №11 от 6.11.24, 2 экз. на 1 л.

Директор ИРЭ

им. В.А. Котельникова РАН
академик РАН



С.А. Никитов

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ
«10» 12 2024 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,
академик РАН, профессор



С.А. Никитов

«04» декабря 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации «Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук» на диссертацию **Семенов Владимир Николаевич** на тему: **«Композитные материалы для антенной техники и СВЧ-устройств в сверхшироком диапазоне частот»**, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии (технические науки)

Актуальность темы диссертационного исследования. В настоящее время радиопоглощающие покрытия широко применяются для снижения локационной заметности различных объектов воздушного, земного и морского базирования, а также при разработке СВЧ устройств и антенн, для улучшения их электромагнитной совместимости и формы диаграммы направленности.

Чаще всего радиопоглощающее покрытие выполняется в виде композитного диэлектрического или магнитного материала. Наиболее эффективными с минимальными массогабаритными параметрами являются магнитные композитные материалы, содержащие, как правило, наполнители из карбонильного железа. Несмотря на длительный срок использования карбонильного железа, сложная частотная дисперсия его магнитной проницаемости в широком диапазоне частот до сих пор не была исследована детально.

Одной из актуальных задач диссертационной работы В.Н. Семенов является разработка методик измерения электрофизических параметров композитных материалов в свободном пространстве в сверхшироком диапазоне частот для малогабаритных образцов композитных материалов с использованием современной цифровой обработки сигналов.

Для создания эффективных радиопоглощающих материалов (РПМ) актуальной задачей, которая решается в данной работе является улучшение технологии их изготовления, в первую очередь, стабилизация электродинамических параметров композитов, наполненных порошками карбонильного железа.

Созданные методики измерений и изготовления РПМ применяются для разработки широкого класса поглощающих покрытий различных видов: магнитных, диэлектрических, на основе метаматериалов. Исследование электродинамических параметров разработанных РПМ также является актуальной научно-технической задачей.

Решение перечисленных выше задач создает основу для достижений главной цели диссертационной работы В.Н. Семененко - создание сверхширокополосных РПМ и покрытий, их модификация, повышение эффективности радиотехнических характеристик таких материалов и покрытий в сверхшироком СВЧ диапазоне и их внедрение в антенную и СВЧ технику. Достижение данной цели определяет актуальность рецензируемой работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация Семененко В.Н. состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа включает 397 страниц текста и 397 рисунков. Список литературы состоит из 288 наименований. В приложениях к диссертации приводятся документы, подтверждающие внедрение результатов работы и документы, подтверждающие аттестацию разработанных в ней методик измерений.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, положения, выносимые на защиту, научная и практическая значимость полученных результатов, описаны структура, объём и содержание диссертационной работы.

Глава 1 посвящена экспериментальным методам измерений электрофизических материальных параметров композитных материалов на СВЧ, разработанным и использованным при проведении работы.

Глава 2 посвящена исследованию микроволновых свойств композитных материалов, наполненных порошками карбонильного железа, способам модификации карбонильного железа для повышения стабильности электрофизических свойств и увеличения магнитных потерь композитов на их основе. Для изготовления основных композитных материалов используется коммерчески доступное кремнийорганическое связующее.

Глава 3 посвящена разработке сверхширокополосных радиопоглощающих покрытий на основе градиентных многослойных магнитных композитных материалов, наполненных разработанными стабильными магнитными наполнителями КЖ-3А, КЖ-2 и КЖ-6.

Глава 4 посвящена разработке широкополосных диэлектрических радиопоглощающих материалов на основе полупроводящих пенополиуретанов и областям их практических приложений в антенной технике.

Глава 5 посвящена исследованию нового типа композитных материалов – искусственных магнитодиэлектриков, так называемых метаматериалов, содержащих в своем составе резонансные включения различной природы. Приводится краткий литературный обзор по необычным свойствам метаматериалов.

В заключении сформулированы **основные результаты диссертационной работы**, вынесенные на защиту.

Научная новизна работы определяется следующими полученными в ней новыми научными результатами:

1. Новыми методиками измерений электрофизических параметров композитных материалов в свободном пространстве в сверхшироком диапазоне частот от 0,2 до 110 ГГц.
2. Новыми результатами экспериментальных исследований структуры мод эффективной магнитной проницаемости композитных материалов на основе промышленно выпускаемых партий карбонильного железа в широкой полосе частот от 0,2 до 40 ГГц с оценкой особой роли магнитных мод Аарони в магнитных спектрах композитных материалов на высоких частотах.
3. Новыми результатами оптимизации режимов комплексной механической обработки порошков карбонильного железа, включающие методы сухого и мокрого помолов, позволяющие стабилизировать магнито-диэлектрические свойства модифицированных порошков карбонильного железа и значительно увеличить их магнитные потери в СВЧ диапазоне частот.
4. Новым методом мониторинга процесса мокрого помола порошка карбонильного железа, который позволяет получать стабильный продукт вне зависимости от степени износа элементов конструкции аттритора.
5. Новыми принципами построения и методами проектирования узкополосных и сверхширокополосных радиопоглощающих покрытий на основе магнитных композитных материалов с низким коэффициентом отражения в сверхшироком диапазоне частот от 0,1 до 110 ГГц.
6. Новыми результатами теоретических и экспериментальных исследований размерного эффекта, который наблюдается в диэлектрических РПМ и состоящий в зависимости коэффициента отражения образца диэлектрического РПМ от его размеров.
7. Впервые теоретически и экспериментально доказанным фундаментальным ограничением магнитной эффективности искусственных магнито-диэлектриков (метаматериалов).

8. Впервые установленной зависимостью уровня бокового и заднего излучения апертурных антенн от нулевых значений диэлектрической и магнитной проницаемости метаматериалов.

Достоверность результатов работы. Достоверность полученных в диссертации теоретических результатов, подтверждается их сопоставлением с экспериментальными измерениями, которые согласуются с высокой точностью, а также результатами электродинамического моделирования, полученными при помощи стандартных программных средств.

Достоверность методик измерения параметров РПМ подтверждается сопоставлением их результатов с результатами измерений эталонных образцов.

Практическая значимость диссертации определяется:

1. Разработанными установками для измерения параметров поглощающих материалов в сверхширокой полосе частот от 0,1 до 110 ГГц.
2. Разработанным комплексом магнитных наполнителей на основе модифицированного карбонильного железа со стабильными электрофизическими параметрами и увеличенными магнитными свойствами на СВЧ.
3. Разработанным на основе модифицированных магнитных наполнителей комплексом стабильных двухкомпонентных компаундов для создания магнитных радиопоглощающих покрытий, как узкополосных однослойных покрытий с широкой полосой перестройки от 0,1 до 46 ГГц, так и сверхширокополосных многослойных радиопоглощающих покрытий с рабочей много октавной полосой частот.
4. Разработанными широкополосными диэлектрическими РПМ на основе стабильных полупроводящих композитных материалов.
5. Разработанными с использованием новых композитных материалов и покрытий, в том числе на основе метаматериалов изделиях антенной техники с улучшенными радиотехническими характеристиками, в частности с улучшенной электромагнитной совместимостью.

Реализация и внедрение результатов работы. Разработанные в диссертации радиопоглощающие материалы и покрытия, а также стенды для измерения их радиофизических характеристик использованы в различных организациях как при выполнении опытно-конструкторских работ, так и в серийном производстве: АО «ВНИИ «Градиент», АО НПО «Квант», АО «ЦКБА», АО «ГРПЗ», АО «НИИП имени В.В. Тихомирова», филиал ПАО «Ил» -Авиастар, АО «ВНИИ «Вега», ПАО «Радиофизика», ПАО «ОАК» ОКБ Сухого, ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева», АО «Комполит», ФГУП

«КГНЦ», ООО «ИРЗ». Результаты внедрения результатов работы подтверждаются пятью актами внедрения.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы.

Результаты диссертационной работы Семененко В.Н. рекомендуются к применению в организациях, решающих широкий спектр задач в области создания широкополосных микроволновых антенных систем и устройств, а также связанных с решением проблем электромагнитной совместимости, таких как АО «ЦКБА», АО «ГРПЗ», АО «НИИП имени В.В. Тихомирова», АО «ВНИИ «Вега», ПАО «Радиофизика», АО «НПП «Исток» имени А.И. Шокина», АО «ВНИИ «Градиент», АО «КНИРТИ». Для использования в этих организациях можно рекомендовать следующие полученные в диссертации результаты и выводы:

1. Методики измерений радиофизических характеристик материалов и покрытий в свободном пространстве на основе диафрагмированных линзовых антенн в диапазоне частот от 1 до 110 ГГц, а также измерительные стенды на их основе.

2. Мобильный портативный измеритель коэффициента отражения покрытий в диапазоне частот от 1 до 14 ГГц.

3. Системы эффективных магнитных радиопоглощающих покрытий для диапазона частот от 0,1 до 46 ГГц, а также сверхширокополосных радиопоглощающих материалов и покрытий (как магнитных, так и магнитодиэлектрических, а также на основе метаматериалов) для диапазона частот от 1 до 40 ГГц с целью улучшения радиотехнических характеристик антенных систем различного назначения и решения проблем электромагнитной совместимости.

4. Согласованные волноводные нагрузки (компактные и на основе ферроэпоксида), как пассивные элементы радиотехнических трактов СВЧ-устройств.

5. Метаматериалы на основе смеси лево- и правозакрученных проволочных спиралей, как узкополосные поглощающие материалы для снижения бокового и заднего излучения апертурных антенн.

Апробация результатов работы. По теме диссертации изданы 143 печатные работы, включая 52 работы в рецензируемых журналах, 7 патентов РФ на изобретения и полезную модель, 1 монография.

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на многих отечественных и международных научных конференциях, совещаниях и семинарах с 1993 по 2023 гг.

Недостатки. Отличительной чертой данной работы является ее комплексный характер, охватывающий все этапы разработки РПМ от технологии их изготовления и

измерения параметров до применения в конкретных устройствах, в частности, в антеннах с улучшенными показателями качества. Работам такого типа практически всегда свойственны недостатки, являющиеся продолжением достоинств комплексного подхода.

Отметим следующие из них:

1. На рис. 3.15а приводится амплитудное распределение по апертуре зеркальной антенны на частоте 2 ГГц, которое практически не спадает к краям апертуры (стандартный уровень на краях минус 10 дБ от максимума), что говорит о существенных потерях мощности на "переоблучение" зеркала на данной частоте. Непонятно, чем обусловлен такой неоптимальный выбор ширины диаграммы направленности облучателя. Не приводятся результаты, касающиеся коэффициента использования поверхности антенны, что затрудняет оценку ее эффективности. Отсутствует информация о поляризации волн, на которых работает данная антенна.

2. В разд. 3.3.1, посвященном коррекции диаграммы направленности антенного блока из сверхширокополосных спиральных антенн отсутствует информация о влиянии введения в конструкцию поглощающих материалов на коэффициент полезного действия антенны, который должен неизбежно снижаться в силу потерь в РПМ.

3. Аналогичное замечание (см. п. 2) касается сверхширокополосной спиральной антенны (рис. 3.52).

4. Разработка широкополосных и малогабаритных волноводных согласованных нагрузок является типовой задачей техники СВЧ. Поэтому разделы 3.8, 3.9, посвященные данной проблеме следовало бы дополнить сравнением с известными техническими решениями, в первую очередь по показателям качества: габаритные размеры и максимальный коэффициент отражения в рабочей полосе частот.

5. На рис. 4.21 и 4.22 показано влияние экранов на основе РПП РАН-18М/РПМ РАН-29М на развязку двух сверхширокополосных антенн. Эффективность их использования оценивается исключительно по снижению коэффициента передачи из одной антенны в другую. При этом влияние на коэффициент усиления антенны не рассмотрено, что затрудняет объективную оценку эффективности данного способа улучшения электромагнитной совместимости антенн.

6. На рис. 5.36, 5.37 приводятся частотные зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической и магнитной проницаемостей метаматериала на основе алюминиевых "рулетов". При этом на некоторых частотах мнимая часть экспериментально измеренной диэлектрической проницаемости отрицательна, что говорит о наличии усиления в среде. Данный, противоречащий физическому смыслу результат, никак не комментируется в диссертации. Скорее всего он является результатом погрешности измерений. Однако,

столь значительная погрешность ставит под сомнение методику получения экспериментальных данных и их обработку.

7. Антенна базовой станции, рассматриваемая в разд. 5.5.1 работает в достаточно широком диапазоне частот 828-837 МГц и 873-882 МГц. В тоже время, используемый для подавления дальних боковых лепестков метаматериал является узкополосной резонансной структурой. Непонятно насколько полоса эффекта подавления боковых лепестков соотносится с полосой рабочих частот антенны.

8. В работе имеются отдельные стилистические и редакционные погрешности.

Как отмечалось вышеперечисленные замечания являются следствием комплексного характера работы В.Н. Семененко. Они не могут снизить общей положительной оценки диссертации.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.

Диссертация Семененко Владимира Николаевича «Композитные материалы для антенной техники и СВЧ-устройств в сверхшироком диапазоне частот», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук, является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные технические и технологические решения по созданию сверхширокополосных радиопоглощающих материалов и покрытий в СВЧ диапазоне, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие техники СВЧ и антенн – позволяет значительно улучшить радиотехнические характеристики антенн и СВЧ-устройств различного назначения.

Диссертация по области исследования соответствует паспорту специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии (технические науки), а именно п.п. 2, 3, 6 и 7 паспорта специальности.

Работа оформлена в соответствии с требованиями, установленными ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Автореферат и список публикаций полностью отражают содержание диссертации. Основные результаты работы отражены в 52 статьях в рецензируемых журналах, из них 23 статьи в журналах ВАК РФ, 22 статьи в международных базах (Scopus, Web of Science), 68 докладах на всероссийских и международных научно-технических конференциях. Предложенные конструктивно-технологические решения защищены шестью патентами РФ на изобретения и патентом РФ на полезную модель.

Диссертация соответствует критериям по п. 9-14, 25 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакции от 16.10.2024 г.), для диссертаций на соискание

ученой степени доктора наук. Автор работы Семенов В.Н. заслуживает присвоения
ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ
устройства и их технологии.

Отзыв подготовлен доктором технических наук С.Е. Банковым.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден и одобрен научно-
квалификационным семинаром отдела 13 ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, протокол №11
от 6 ноября 2024 г. Выписка из протокола заседания Научно-квалификационного
семинара отдела 13 ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН прилагается.

Д.т.н., главный научный

сотрудник ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

С.Е. Банков

Сведения об организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии
наук, 125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корп.7, ire@cplire.ru, официальный сайт:
www.cplire.ru, тел.: 8 (495) 629-33-87.

Я, **Банков Сергей Евгеньевич**, даю согласие на включение своих персональных данных
в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Отзыв ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН заверяю:

Ученый секретарь

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН



И.И. Чусов

С отзывом ознакомлен 10.12.2024г. *Рези-*