

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук доцента РАЗИНЬКОВА Сергея Николаевича на диссертацию НЕСКОРОДОВА Станислава Евгеньевича на тему: «Особенности распространения сверхкоротких импульсов и методики измерений характеристик излучателей в условиях отражений» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. Радиофизика

Диссертация НЕСКОРОДОВА Станислава Евгеньевича «Особенности распространения сверхкоротких импульсов и методики измерений характеристик излучателей в условиях отражений» выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет». Научный руководитель – доктор физико-математических наук, доцент Усков Григорий Константинович.

На отзыв официальному оппоненту представлены:

- диссертация – 1 том объемом 100 листов;
- автореферат диссертации – 1 брошюра объемом 1 печатный лист.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы из 98 наименований.

Актуальность темы диссертационного исследования. Приоритетные направления развития радиофизических устройств передачи-приема сигналов, определенные Международной концепцией построения информационно-телеком-муникационных систем, связаны с использованием сверхширокополосных сверхкоротких импульсов (СКИ).

Сверхширокополосные сигналы характеризуются протяженностью эквивалентных размеров спектров, превышающей 50% значения центральной частоты. К классу СКИ относятся процессы, пространственная длительность которых значительно меньше характерных размеров передающей (приемной) антенны.

За счет их применения может осуществляться оперативное опознавание радиолокационных целей на основе комплексного анализа отражающих свойств в различных участках диапазона частот и некоординатной информации о доминирующих центрах вторичного электромагнитного излучения, недоступной для узкополосных радаров. В линиях радиосвязи достигаются значительный (до $10^{11} \dots 10^{12}$ бит/с·ГГц) объем и высокая (более 500 Мбит/с) скорость передачи сообщений при одновременном использовании нескольких частот спектра. Вследствие малой спектральной плотности мощности СКИ, обусловленной распределением энергии на значительном интервале частот, обеспечивается электромагнитная совместимость, помехозащищенность и скрытность функционирования радиоэлектронных средств. С помощью сети опорных радиостанций возможно высокоточное позиционирование абонентов на пересеченной местности, в условиях городской застройки и внутри зданий, где в виду многолучевого распространения радиоволн затруднено функционирование терминалов глобальных спутниковых навигационных систем.

Особенность СКИ заключается в том, что их распространение по радиоканалам сопровождается трансформацией пространственно-временной струк-

туры, а рассеяние на препятствии приводит к появлению сигналов различной полярности со временем запаздывания, определяемым числом и взаимным расположением центров вторичного электромагнитного излучения. Энергетические характеристики передачи-приема зависят не только от парциальных направленных свойств излучателей, но и вида и частотно-временных параметров СКИ. Закономерности пространственно-частотной избирательности передачи-приема сигналов определяются по результатам пространственно-временной обработки; при этом измерения параметров излучателей целесообразно выполнять на основе преобразования Фурье, позволяющего представлять импульсы в виде текущих комплексных амплитуд и спектральных плотностей (спектров).

В настоящее время экспериментальные оценки характеристик излучателей СКИ находятся с применением двух альтернативных подходов.

Первый подход базируется на предварительной калибровке рабочей зоны с использованием монохроматических сигналов. Однако его реализация возможна только при существенных ограничениях на размеры объектов, которые должны быть сопоставимы с габаритами калибровочных антенн.

Другой подход, реализуемый с применением сканеров ближнего поля, характеризуется достаточно низкой точностью измерений для широкой номенклатуры излучателей. Ее повышение сопряжено с поиском методов и технических решений по компенсации сигналов, рассеянных элементами вспомогательного оборудования, применяемого в составе радиоизмерительного комплекса, и местными предметами, доминирующие центры вторичного излучения которых не могут быть устранены за счет покрытия радиопоглощающими материалами. При этом совместный анализ непосредственного и вторичного излучения сверхширокополосных сигналов позволяет получить расширенный перечень признаков излучателя по сравнению с исследованиями по функциональному назначению с применением узкополосных процессов.

Таким образом, тема диссертационного исследования НЕСКОРОДОВА С.Е. «Особенности распространения СКИ и методики измерений характеристик излучателей в условиях отражений», цель которого заключается в совершенствовании методов измерения характеристик излучения во временной области при размещении на непоглощающей подстилающей поверхности и в окружении сторонних рассеивателей, является актуальной.

Степень разработанности темы диссертационного исследования. Основное содержание исследований охватывает два основных направления:

- выявление и анализ особенностей распространения СКИ;
- разработка методики измерений характеристик излучателей СКИ в условиях отражений.

В работах д.т.н. Авдеева В.Б., Воскресенского Д.И., Зернова Н.В., Иммореева И.Я. построены математические модели и исследованы закономерности направленных свойств линейных и апертурных антенн при синхронном и асинхронном возбуждении сверхширокополосными радио- и видеоимпульсами.

Однако в рамках спектрального подхода исключается исследование переходных процессов возбуждения излучателей, существенные для нахождения показателей направленности передачи-приема СКИ. Для высокой точности оценки характеристик объектов больших электрических размеров требуются

значительные вычислительные затраты, обусловленные необходимостью многократного обращения операторов краевых задач на множестве частот спектра сигнала.

Аналитическое описание полей во временной области, позволяющее определять текущие и мгновенные характеристики излучателей, выполнено в работах д.ф.-м.н. Потапова А.А., д.т.н. Абраменкова В.В., Васильченко О.В., Гутмана А.Л., Савинова Ю.И., Ярыгина А.П.

Вместе с тем, ввиду математической сложности аппроксимации искомым токам и полям произведениями последовательностей пространственных и временных базисных функций, а также обеспечения устойчивости разностных схем вычисления их производных оценки направленных свойств получены только для линейных антенн и решеток изотропных диапазонных элементов.

Исследования характеристик передачи-приема апертурными антеннами во временной области ограничиваются вычислительными экспериментами с использованием программ электродинамического моделирования CST MWS – Computer Simulation Technology Microwave Studio, Microwave Office, HP HFSS. В программах реализован конечно-разностный метод FDTD – Finite Integration Technique in Time Domain или метод конечных интегралов FITTD – Finite Integration Technique in Time Domain. Для нахождения характеристик излучателей применяются методы импульсной электродинамики, основанные на сингулярном разложении электромагнитного поля (SEM – Singular Expansion Method, SST – Slant Stack Transform) или его представлении в виде матричных пучков (PFM – Pencil-of-Function Method, TDME – Time Domain Multi-pole Expansion).

При этом вследствие закрытого внутреннего содержания программ и использования в них общих, не оптимизированных к конкретной антенной системе, вычислительных алгоритмов крайне затруднены оценки расчетных погрешностей и выявление причин их появления.

Экспериментальные оценки характеристик излучателей СКИ в дальней зоне по измерениям полей в ближней зоне с использованием зондовых антенн, представленные в работах д.т.н. Митрохина В.Н., Понькина В.А., Трошина Г.И., Тучкова Л.Т., Шатракова Ю.Г., получены для монохроматических волновых процессов. Эти результаты не могут применяться для анализа антенн с высокими коэффициентами перекрытия диапазона рабочих частот, где требуется учитывать изменение парциальных характеристик излучения и приема сигналов.

Отмеченные обстоятельства определяют противоречие в области диссертационного исследования НЕСКОРОДОВА С.Е. между практическими потребностями разработки излучателей СКИ и уровнем развития методических основ их проектирования и технологий изготовления.

Степень обоснованности научных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. В диссертации решена научная задача разработки методик анализа параметров СКИ и синтеза импульсов для формирования отклика радиоканала с требуемой импульсной характеристикой, а также метода измерения характеристик излучателей с фильтрацией отражений от непоглощающих подстилающих поверхностей и окружающих рассеивателей.

Содержание полученных соискателем результатов, сформулированных выводов и рекомендаций, изложено в четырех главах.

В первой главе диссертации определены условия соответствия отклика приемно-передающей системы ее импульсной характеристике; обоснованы требования к длительности возбуждающего воздействия и выявлены закономерности ее изменения при различных формах СКИ. По результатам экспериментальных исследований установлено, что при возбуждении системы импульсами сверхкороткой длительности в приемнике с точностью до постоянного множителя регистрируется ее импульсная характеристика. Выявлено, что при соответствии импульса критерию по длительности, максимальная энергия отклика системы достигается при максимальной длительности возбуждающего процесса.

Во второй главе диссертации предложен способ описания излучения СКИ с заменой индуцированного тока эквивалентным сосредоточенным зарядом. На основе метода сосредоточенного заряда построена методика синтеза проволочного излучателя по заданному импульсу. Проведены макетирование и экспериментальные исследования синтезированного излучателя, выполненного из медной проволоки с экраном в виде панели из металлизированного с двух сторон стеклотекстолита. Разработана методика экспресс оценки длительности импульсной характеристики излучателя при представлении тока сосредоточенным зарядом.

В третьей главе диссертации разработана методика и получены результаты анализа излучения сверхширокополосных импульсов в ближней зоне, в соответствии с которым установлено совпадение границ дальней зоны для наибольшей частоты и при возбуждении антенны СКИ. Проведены экспериментальные исследования распространения СКИ над земной поверхностью. Показано, что зона временного разделения отраженного и неотраженного от земной поверхности импульсов соответствует зоне интерференции для наибольшей частоты излучателя. Разработана методика измерения диаграмм направленности антенн для передачи-приема СКИ методом поднятого полигона. Показано, что с помощью использования временного окна можно добиться безэхового приближения, исключив отраженный от подстилающей поверхности сигнал.

В четвертой главе диссертации выполнено обоснование критерия и сформированы предложения по взаимному расположению излучателя и приемной антенны СКИ в комплексе для измерений. Показано, что наилучший отклик измерительной системы на воздействие, возбуждающее излучатель, достигается при его удалении от приемной антенны на расстояние, удовлетворяющее условию дальней зоны, при разности хода прямого и отраженных лучей, превышающей длительность импульсной характеристики излучателя. Разработана методика и получены результаты измерений и последующей автоматизированной обработкой экспериментальных данных, позволяющей выполнять фильтрацию отраженных от местных предметов и поверхностей сигналы в целях получения безэхового приближения. Проведено сравнение полученных результатов с результатами измерений при использовании гармонических сигналов на частоте 2 ГГц. Показано, что ошибка в определении среднего уровня боковых лепестков диаграммы направленности приемно-передающей антенны в случае использования СКИ снижается на 4 дБ.

Тематика диссертации НЕСКОРОДОВА С.Е. соответствует направлениям исследований, определенных паспортом специальности 1.3.4. Радиофизика (от-

расль – физико-математические науки):

- по пункту 1 (в части разработки физических основ генерации, усиления и преобразования электромагнитных колебаний и волн различной природы);
- по пункту 2 (в части изучение линейных процессов излучения, распространения, дифракции, рассеяния и трансформации волн в естественных средах);
- по пункту 3 (в части разработки и исследования новых электродинамических систем и устройств формирования и передачи радиосигналов: антенных систем в радиодиапазоне).

К числу наиболее значимых научных результатов работы, на наш взгляд, относятся следующие.

1. Обоснование критериев формирования импульсов, при которых отклик радиоканала имеет вид, аналогичный импульсной характеристике.

2. Разработка методики оценки импульсной характеристики приемно-передающей системы.

3. Разработка методики измерения характеристик излучателей с фильтрацией отражений от непоглощающих подстилающих поверхностей и окружающих объектов.

Высокая степень обоснованности научных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных автором, определяется тем, что они получены с использованием современных методов теории волновых процессов, электродинамики, математического моделирования сложных технических систем и статистической обработки результатов радиофизических измерений. Характеристики объекта и параметры предмета диссертационного исследования, а также закономерности их изменения в различных условиях подтверждены экспериментальными данными, полученными с использованием сертифицированных программно-вычислительных средств и аттестованной измерительной аппаратуры.

Достоверность и новизна научных результатов, выводов и рекомендаций. Достоверность научных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обусловлена:

- использованием теоретически обоснованных и прошедших практическую апробацию методов исследования;
- строгим подходом к разработке методов и определению показателей эффективности передачи-приема СКИ выполнению измерений характеристик излучателей в условиях отражений;
- корректным использованием ограничений, допущений и исходных данных, полученных из практики разработки приемно-передающих устройств и проведения радиофизических измерений.

Она подтверждается соответствием полученных результатов общим физическим закономерностям, совпадением рассчитанных параметров, характеристик и показателей эффективности функционирования устройств для передачи-приема и измерения параметров СКИ с экспериментальными данными, а также отдельных результатов, используемых для проведения контрольных расчетов по разработанным методикам, с результатами, содержащимися в работах других авторов. Технические решения и предложения по построению блоков и узлов приемно-передающей аппаратуры, реализованные в макетах, верифицированы в ходе экспериментальных исследований.

Новизна научных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в работе, связана с исследованием закономерностей и выявлением новых эффектов распространения и трансформации СКИ в радиоканале, а также разработкой новых электродинамических устройств формирования и передачи импульсных радиосигналов.

Теоретическая значимость работы определяется развитием методических основ исследования радиофизических устройств передачи-приема и средств измерений характеристик излучателей СКИ, открывающих пути совершенствования методов разработки и исследования новых электродинамических систем и устройств формирования и передачи радиосигналов, технологии построения антенных систем для аппаратуры информационного обмена по радиоканалам. Реализация полученных соискателем результатов позволяет расширить область применения строгих методов анализа и синтеза устройств формирования и излучения СКИ, измерения характеристик излучателей в условиях вторичного электромагнитного излучения подстилающей поверхности и окружающих предметов.

Основные результаты диссертации апробированы на международных и всероссийских научно-технических конференциях по тематике исследований, опубликованы в 18 работах, включая 2 статьи в изданиях, индексируемых в международной базе цитирования Scopus, 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 патент Российской Федерации на полезную модель.

Ценность работы для практики заключается в том, что приведенные в ней результаты, выводы и рекомендации могут быть использованы для совершенствования компоновочных и проектных решений по конструированию и разработке технологий построения радиофизических систем, разработки методов и средств измерения характеристик излучателей СКИ. Она подтверждена внедрением результатов в макетах для проведения исследований излучения и рассеяния импульсных радиосигналов. В свою очередь, результаты экспериментальных исследований указывают на возможность корректного измерения коэффициента направленного действия и построения диаграмм направленности антенн излучателей в условиях наличия отражений от подстилающей поверхности и предметов в зоне измерений.

Предложенные соискателем решения строго аргументированы и оценены в сравнении с известными аналогами.

Замечания и недостатки диссертационной работы. К наиболее важным замечаниям и недостаткам диссертации, с нашей точки зрения, относятся следующие.

1. При обосновании актуальности темы исследования необходимо представить численные оценки несоответствия характеристик систем передачи-приема и излучателей СКИ предъявляемым к ним требованиям. Для подтверждения факта достижения цели работы в обязательном порядке должны быть определены численные значения характеристик объекта исследования, улучшение которых позволило удовлетворить предъявляемым требованиям.

2. Для доказательства повышения эффективности передачи-приема СКИ в радиоканале в диссертации приведены численные значения частотно-временных параметров возбуждающих сигналов и характеристик конструкций излучателей.

Вместе с тем, целесообразно было бы сравнить полученные значения с предъявляемыми тактико-техническими требованиями или оценить соответствие показателей эффективности передачи-приема сигналов значениям, установленным для конкретного класса радиофизических систем.

3. Требуется определить более четкое соответствие между формулировками частных задач исследования, полученных научных результатов и их научной новизны. Авторские оценки новизны полученных результатов желательно конкретизировать, более детально раскрыв оригинальные методические приемы, использованные при разработке методик оценки характеристик передачи-приема и измерения показателей пространственно-частотной избирательности и усиления излучателей СКИ.

4. Эмпирическое представление радиоканала в виде структуры «излучатель – среда распространения – приемная антенна», традиционно используемое при моделировании и анализе узкополосных процессов, является не вполне корректным при исследовании передачи-приема СКИ. Обработка СКИ, в отличие от обработки узкополосных сигналов, не подразделяется на независимые процедуры пространственной и временной обработки, реализуемые в антеннах и приемниках соответственно. Поэтому приемную антенну и приемник необходимо рассматривать в виде единого технического устройства при пространственно-временном представлении сигналов. Также следует указать, что при описании передачи-приема СКИ автор использует термины «диаграмма направленности» и «коэффициент направленного действия антенны», которые, по определению, могут применяться только для характеристики узкополосных систем. При передаче и приеме СКИ следует использовать парциальные или энергетические диаграммы направленности и коэффициенты направленного действия антенн.

5. Согласование передающей и приемной антенн по полосам рабочих частот возможно только для условий передачи-приема СКИ по главным лучам энергетической диаграммы направленности их антенн. Наличие вторичного электромагнитного излучения в радиоканале от подстилающей поверхности и окружающих предметов приводит к появлению пространственно-коррелированных помех с трансформированной пространственно-временной структурой, которые могут поступать на приемное устройство по боковым лепесткам энергетической диаграммы направленности антенны. В результате условия согласования в радиоканале с диапазонными антеннами могут нарушаться, и для их сохранения требуется применять частотно-независимые антенны.

Вместе с тем, отмеченные недостатки, непосредственно не охватывающие основные научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, не снижают общего позитивного впечатления от работы и не ставят под сомнение ее положительную оценку.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации. В нем в лаконичной форме ясно изложены основные идеи и выводы по работе, отражены новизна, научная и практическая значимость результатов.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней. По результатам анализа диссертации НЕСКОРОДОВА С.Е. «Особенности распространения СКИ и методики измерений характеристик излучателей в условиях отражений» сделаны выводы.

1. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная задача, имеющая значение для разработки физических основ генерации, излучения, распространения трансформации СКИ в радиоканалах, разработки и исследования новых электродинамических систем и устройств формирования и передачи радиосигналов. Тема исследования соответствует пунктам 1, 2 и 3 раздела «Направления исследований» паспорта специальности 1.3.4. Радиофизика (отрасль – физико-математические науки).

2. Диссертация является завершенной научной работой, обладающей внутренним единством, содержит новые научные результаты, нашедшие практическое использование при обосновании перспективных направлений развития и создании новых электродинамических систем и устройств формирования и передачи радиосигналов, экспериментального исследования характеристик излучателей СКИ в условиях отражений от подстилающей поверхности и предметов в зоне измерений. Полученные научные результаты свидетельствуют о вкладе автора в науку. Предложенные соискателем решения строго аргументированы и оценены в сравнении с известными аналогами.

3. Работа удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, НЕСКОРОДОВ С.Е., достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. Радиофизика.

Официальный оппонент выражает согласие на обработку и включение в аттестационное дело соискателя ученой степени своих персональных данных.

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук, доцент
профессор кафедры электрооборудования
(и оптико-электронных систем)
ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж)



Разиньков Сергей Николаевич

«29» мая 2023 года

Подпись Разинькова С.Н. заверяю

Старший помощник начальника строевого отдела
ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж)



Ю.Фокин

«29» мая 2023 года

ВОЕННЫЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ВОЕННО-ВОЗДУШНЫХ СИЛ
«ВОЕННО-ВОЗДУШНАЯ АКАДЕМИЯ ИМЕНИ ПРОФЕССОРА
Н.Е.ЖУКОВСКОГО И Ю.А.ГАГАРИНА» (Г. ВОРОНЕЖ)

394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а,

тлф. 8-(473)-244-78-25, E-mail: vaiu@mil.ru