

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. В.Н. КАРАЗИНА

На правах рукописи

Думин Александр Николаевич

УДК 537.87

**Нестационарные электромагнитные поля
осесимметричных излучателей**

01.04.03 РАДИОФИЗИКА

Диссертация на соискание научной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук,
доцент
Катрич Виктор Александрович

Харьков-2000 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	
.5	
1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	
12	
1.1. Обзор литературы.....	12
1.1.1. Нестационарные сигналы.....	12
1.1.2. Области применения сверхширокополосных электромагнитных сигналов.....	13
1.1.3. Излучатели сверхширокополосных сигналов и их характеристики.....	16
1.1.4. Солитоноподобные электромагнитные волны.....	19
1.1.5. Выводы.....	21
1.2. Выбор направления исследования.....	21
1.2.1. Методы решения нестационарных задач.....	21
1.2.2. Метод модового базиса.....	24
1.2.3. Направление исследования.....	26
2. ЭВОЛЮЦИОННЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОЛЕЙ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ.....	28
2.1. Метод эволюционных уравнений.....	28
2.2. Постановка задачи.....	29
2.3. Уравнения Максвелла в нормально-тангенциальной форме.....	31
2.4. Четырехмерные векторы электромагнитного поля.....	33
2.5. Базис в пространстве решений.....	35
2.6. Проектирование уравнений Максвелла на базис.....	41

2.7. Эволюционные уравнения для электромагнитного поля в свободном пространстве.....	4
3	
2.8. Основные выводы	
раздела.....	45
3. ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДИСКОМ С РАВНОМЕРНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТОКА.....	4
7	
3.1. Метод функции Римана решения уравнения Клейна-Гордона.....	47
3.2. Излучение источника нестационарного тока или заряда с произвольным амплитудным распределением.....	49
3.3. Нестационарное излучение плоского диска с равномерным амплитудным распределением тока.....	50
3.3.1. Постановка и решение задачи.....	50
3.3.2. Анализ полученных результатов.....	55
3.4. Основные выводы раздела.....	59
4. ИЗЛУЧЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ИЗ ОТКРЫТОГО КОНЦА КОАКСИАЛЬНОГО ВОЛНОВОДА (ПРИБЛИЖЕНИЕ КИРХГОФА).....	61
4.1. Решение уравнения Клейна-Гордона методом разделения переменных.....	61
4.2. Излучение плоского источника с произвольным пространственным распределением нестационарного поля.....	63
4.3. Постановка и решение задачи распространения в коаксиальном волноводе ТЕМ-волны с произвольной зависимостью от времени.....	65
4.4. Постановка задачи излучения.....	68
4.5. Решение задачи излучения из открытого конца коаксиального волновода, возбужденного ТЕМ-волной со ступенчатой зависимостью от	

времени.....	72
4.6. Анализ выражений для амплитуд компонент излученного поля при ступенчатой временной зависимости источника.....	78
4.7. Решение задачи излучения полей из раскрыва коаксиального волновода, возбужденного ТЕМ-волной с произвольной зависимостью от времени.....	88
4.8. Сравнение теоретических и экспериментальных характеристик излучения нестационарных полей из раскрыва коаксиального волновода.....	97
4.9. Основные выводы раздела.....	100
5. ДИФРАКЦИЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕМ-ВОЛНЫ НА ОТКРЫТОМ КОНЦЕ КОАКСИАЛЬНОГО ВОЛНОВОДА.....	102
5.1. Постановка задачи дифракции нестационарных электромагнитных волн на открытом конце волновода.....	102
5.2. Дифракция ТЕМ-волны со ступенчатой временной зависимостью на открытом конце коаксиального волновода.....	106
5.2.1. Постановка задачи.....	106
5.2.2. Общие решения эволюционных уравнений.....	111
5.2.3. Нахождение переходной диаграммы открытого конца коаксиального волновода.....	113
5.2.4. Анализ переходной диаграммы открытого конца коаксиального волновода.....	118
5.3. Теоретические и экспериментальные характеристики поля, излученного в свободное пространство.....	122
5.4. Основные выводы раздела.....	134
ВЫВОДЫ.....	1
36	
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	140

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа посвящена исследованию осесимметричных излучателей нестационарных электромагнитных полей на основе эволюционного подхода.

Интерес к нестационарным электромагнитным процессам вызван возросшими требованиями к радиолокационным устройствам и системам связи, возможности которых не могут быть расширены при использовании традиционных узкополосных сигналов. Например, увеличение точности измерений при подповерхностной радиолокации с целью исследования ледового и снежного покровов, поиска воды, зондирования морской и земной поверхностей усложняется ограничением на верхнюю границу используемых частот, из-за сильного затухания в проводящих средах и в атмосфере. К тому же переход к более высоким частотам приводит к значительному усложнению антенно-фидерных трактов и повышению требований к точности их изготовления. В то же время при использовании видеоимпульсов (т.е. сигналов без несущей) значительно увеличивается точность измерения координат объектов, и в некоторых случаях даже становится возможным восстановление их формы.

Использование сверхширокополосных сигналов также имеет преимущества при организации радиосвязи через поглощающие среды, такие как морская вода, почва и т.п., за счет увеличения скорости передачи информации.

Для создания видеоимпульсных радиолокационных устройств необходимо эффективно излучать нестационарные электромагнитные поля. Существующие излучатели таких полей по целому ряду важнейших параметров уступают узкополосным. Их улучшение тесно связано с созданием новых теоретических подходов к рассмотрению явлений, происходящих в излучателях сверхширокополосных сигналов.

На протяжении последних пятнадцати лет в отечественной и зарубежной литературе появился цикл работ, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию нестационарных волновых пакетов. Были получены волновые образования, переносящие электромагнитную энергию на большие расстояния без дисперсии; причем направленность такого излучения превышает все ранее известные теоретические оценки. Поэтому, несмотря на большие сложности в экспериментальной реализации полученных результатов, интерес к этой теме не ослабевает. Использование новых методов для решения нестационарных задач излучения может не только объяснить природу указанных явлений, но, возможно, и указать пути для их экспериментальной проверки и практического использования.

Актуальность темы. В классической электродинамике все многообразие электромагнитных явлений описывается системой уравнений Максвелла. Для ее решения используют методы, имеющие некоторые ограничения, и, поэтому, предназначенные для ограниченного числа задач. Так при решении задач, в которых электромагнитные поля имеют гармоническую или близкую к ней зависимость от времени, повсеместно используется метод преобразования Фурье, позволяющий избавиться от временной переменной и, тем самым, значительно упростить решение. В случае нестационарных задач, когда временные зависимости амплитуд полей произвольные, применение преобразования Фурье по времени не является естественным. Такой подход имеет свои недостатки, связанные с тем, что гармонические сигналы не переносят информации и обладают бесконечной энергией. Кроме того, что полученное решение не удовлетворяет принципу причинности, использование разложения на гармонические составляющие сигнала, ширина спектра которого равна бесконечности, может не только затруднить, но и сделать невозможным применение обратного преобразования Фурье.

Выходом из этого положения является сведение нестационарной электродинамической задачи к уравнениям, содержащим время в явном виде,

то есть к решению задачи во временной области. В последнее время интерес к методам, позволяющим это сделать, значительно возрос. Но все они накладывают определенные ограничения на условия задачи и, к тому же, приводят к достаточно сложным уравнениям, которые зачастую решаются только численно. Одним из наиболее перспективных в настоящее время считается эволюционный подход, суть которого состоит во введении ограничения на геометрию задачи и в сведении уравнений Максвелла к более простым, содержащим в неизменном виде зависимости амплитуд полей от времени и имеющим, по возможности, целый ряд аналитических решений, получаемых без использования преобразования Фурье по времени. Такие методы тем лучше, чем незначительней эти ограничения, шире круг решаемых задач и их практических приложений.

Всеми этими преимуществами обладает метод модового базиса, примененный в данной работе для решения нестационарных задач излучения. Построение в поперечном сечении цилиндрической системы координат базиса для разложения электромагнитного поля позволяет свести исходную трехмерную задачу к решению системы одномерных эволюционных уравнений, которую можно решить во временной области. Развитие данного подхода на задачи в свободном пространстве открывает широкие возможности для расчетов видеоимпульсных излучающих элементов и систем и исследования протекающих в них физических процессов во временной области. А это крайне необходимо для создания новых устройств, использующих высокую информационную емкость нестационарных сигналов для дистанционного исследования объектов, расположенных в поглощающих средах, и передачи больших объемов информации.

Постоянно растущее количество публикаций, посвященных методам решения электродинамических задач во временной области и практическому использованию видеоимпульсных сигналов, также свидетельствует об актуальности темы диссертации.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Выбранная тематика тесно связана с приоритетными направлениями развития науки и техники в рамках координационных планов научно-исследовательских работ Министерства образования и науки Украины (п.7 – “Перспективные информационные технологии, приборы комплексной автоматизации, системы связи”). Данная работа выполнена на кафедрах теоретической радиофизики и прикладной электродинамики радиофизического факультета Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина и неразрывно связана с научными направлениями кафедры теоретической радиофизики “Перспективные информационные технологии, приборы комплексной автоматизации систем связи” и кафедры прикладной электродинамики “Фундаментальные исследования по излучению электромагнитных волн. Разработка методов расчета и исследования физических явлений в антеннах с круговой и произвольной эллиптической поляризацией”. Она также является составной частью выполненной на кафедре прикладной электродинамики госбюджетной НИР, в которой автор принимал участие в качестве ведущего исполнителя по направлению (номер госрегистрации 0197U001220).

Цели и задачи исследования. *Объектом исследования* в данной работе является электромагнитное поле. *Предмет исследования* есть нестационарные электромагнитные поля осесимметричных излучателей. *Целью* данной диссертационной работы является выявление физических закономерностей излучения и распространения нестационарных электромагнитных полей, излученных осесимметричными излучателями.

Для достижения этой цели использован такой строгий теоретический метод как метод модового базиса, сводящий классические уравнения Максвелла к системе одномерных уравнений, не затрагивая при этом временные зависимости амплитуд полей. В свою очередь, аналитические решения одномерных дифференциальных уравнений в частных производных найдены либо при помощи метода разделения переменных, если уравнения

однородные, либо при помощи метода функции Римана, если уравнения неоднородные. Решения задач для случая произвольной временной зависимости источника получены с использованием принципа суперпозиции.

Для достижения цели данной диссертационной работы необходимо решить следующие *задачи*:

- ✓ преобразования метода модового базиса для исследования нестационарных полей в свободном пространстве;
- ✓ излучения диска с равномерным распределением нестационарного тока;
- ✓ излучения раскрыва коаксиального волновода, возбужденного нестационарной ТЕМ-волной, в приближении Кирхгофа;
- ✓ дифракции нестационарной ТЕМ-волны на открытом конце коаксиального волновода.

Научная новизна полученных результатов. В ходе выполнения работы получены следующие новые результаты:

1. Впервые применен метод модового базиса к решению задач распространения в свободном пространстве нестационарных полей, излученных осесимметричными излучателями. В результате получена система эволюционных уравнений, описывающих распространение электромагнитных полей с произвольной временной зависимостью в безграничной слоисто неоднородной нестационарной среде. Эта система была преобразована к двум независимым уравнениям второго порядка в частных производных, одно из которых описывает распространение Н-волн, другое – Е-волн. В случае свободного пространства эти уравнения сведены к двум одномерным уравнениям типа Клейна-Гордона.
2. Впервые при помощи метода модового базиса получены амплитуды всех компонент нестационарного поля, излученного диском с равномерным распределением тока, в явном виде, то есть в виде квадратур, для любых удалений от источника и в аналитическом виде для больших расстояний от источника.

3. Впервые в приближении Кирхгофа методом модового базиса получены амплитуды всех компонент поля, излученного открытым концом коаксиального волновода при его возбуждении нестационарной ТЕМ-волной, в явном виде для любых удалений от источника и в аналитическом виде для больших удалений.
4. Впервые методом модового базиса решена во временной области задача дифракции нестационарной ТЕМ-волны на открытом конце коаксиального волновода. Получены в явном виде амплитуды всех компонент излученного поля и поля отраженной в волновод ТЕМ-волны.

Практическое значение полученных результатов. Предложенный в данной диссертационной работе подход позволяет рассчитывать излучение любого осесимметричного излучателя с заданным пространственным распределением поля, тока и заряда. Он позволяет оптимизировать существующие и проектировать новые излучатели нестационарных электромагнитных волн. Используемый подход может быть применен для расчета объемных излучателей с заданным пространственно-временным распределением стороннего поля, тока и заряда, а также для расчета этого распределения с учетом дифракционных явлений. Результаты проведенных теоретических и экспериментальных работ могут быть использованы в учебных курсах для студентов факультетов физического профиля и для научных исследований в области создания сверхширокополосных систем связи, видеоимпульсных радаров для зондирования подстилающей поверхности и биологических объектов, обнаружения летательных аппаратов и т.д.

Личный вклад соискателя. В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежит доказательство самосопряженности операторов W_E и W_H и нормировка их собственных векторов (раздел 2), решение задач, разработка алгоритмов вычислений и программного обеспечения, проведение численных расчетов и анализ полученных результатов (разделы 3-5).

Апробация результатов диссертации. Изложенные в диссертации результаты были доложены и обсуждены на международных конференциях: International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory ММЕТ-96 (Львов, 10-13 сентября 1996 г.), ММЕТ-98 (Харьков, 2-5 июня 1998 г.), International Conference on Antenna Theory and Techniques ICATT-99 (Севастополь, 8-11 сентября 1999 г.), ММЕТ-2000 (Харьков, 12-15 сентября 2000 г.). Кроме того, результаты диссертации докладывались на научных конференциях молодых ученых радиофизического факультета Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 5 статьях в украинских и зарубежных научных журналах и дополнительно освещены в 1 статье и 4 докладах на международных конференциях.

РАЗДЕЛ 1

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Обзор литературы

В данном подразделе изложены основные понятия нестационарной электродинамики, физические свойства и связанные с ними области применения сверхширокополосных электромагнитных сигналов, основные характеристики излучателей нестационарных полей, а также новые нерешенные задачи излучения таких полей.

1.1.1. Нестационарные сигналы. Изменяющийся во времени сигнал является носителем информации. Объем передаваемой информации зависит от ширины полосы частот и не зависит от несущей частоты. Тем не менее, одной из наиболее важных характеристик сигнала является относительная полоса частот η , определяемая как отношение ширины полосы частот к частоте несущей сигнала [1]. Причина этого состоит в том, что, в отличие от несущей частоты, относительная полоса частот практически всех функциональных радиофизических устройств не меняется при пропорциональных изменениях их размеров. К тому же, решить задачу увеличения относительной полосы того или иного устройства, как правило, намного труднее, чем решить отдельно задачу расширения полосы его рабочих частот либо изменения его несущей частоты, так как относительная полоса частот напрямую связана с происходящими в устройстве физическими процессами.

Для случая, когда сигнал не имеет несущей частоты, в [1] предложено более общее определение относительной полосы:

$$\eta = (f_{\text{в}} - f_{\text{н}}) / (f_{\text{в}} + f_{\text{н}}),$$

где $f_{\text{в}}$ – верхняя граница частоты сигнала, $f_{\text{н}}$ – нижняя граница частоты сигнала. Данное определение удобно применять для таких сигналов как радиоимпульсы, которые состоят из нескольких периодов гармонических

колебаний, и видеоимпульсы, содержащие один или полпериода колебания. Для обычных узкополосных сигналов $\eta \leq 0,01$, тогда как относительная полоса сверхширокополосных видео- и радиоимпульсов достигает $\eta = 0,5 \div 1$. Сигналы с такой большой относительной полосой нельзя рассматривать как почти синусоидальные, поэтому, подчеркивая этот факт, их принято называть несинусоидальными или нестационарными. Они обладают целым рядом полезных свойств, определяющих их области применения.

1.1.2. Области применения сверхширокополосных электромагнитных сигналов. Повышенный интерес к нестационарным электромагнитным полям объясняется появлением ряда актуальных практических задач, которые нельзя решить, используя обычные узкополосные сигналы. Прежде всего, это задачи, связанные с дистанционным зондированием сред, исследованием биологических объектов, повышением скорости передачи информации через среды с потерями и улучшением разрешающей способности радиолокаторов [1, 2].

На протяжении длительного времени генерация, передача и прием сигналов со сверхширокой полосой рабочих частот было связано с большими трудностями, поэтому в основном применялись узкополосные сигналы. В 60-х годах интерес к сверхширокополосным сигналам резко возрос, что в первую очередь связано с изобретением простых импульсных генераторов, стробоскопического осциллографа, позволяющего визуально наблюдать видеоимпульсные сигналы, появлением целого ряда широкополосных устройств СВЧ и совершенствованием ЭВМ, необходимых для цифровой обработки данных.

Первым практическим применением видеоимпульсных сигналов стало мгновенное определение электрической и магнитной проницаемости и времени релаксации вещества, помещенного внутрь коаксиального волновода [3–5]. При этом частотные характеристики параметров среды вычислялись при помощи ЭВМ. Исследуемое вещество можно не только помещать в

волноведущий тракт, анализируя при этом прошедший через нее сигнал, но и располагать на некотором расстоянии от облучателя, изучая отраженный импульс, что особенно важно для дистанционного зондирования сред. В работах [6, 7] теоретически исследовалась возможность определения параметров диэлектрика по отраженному импульсу с последующим использованием специальной обработки принятого сигнала. Показано, что в случае слоистого диэлектрика можно определить толщину слоя вещества, даже если она меньше, чем пространственная длительность зондирующего импульса [8].

В отличие от монохроматического сигнала, видеоимпульс локализован во времени, что позволяет осуществлять временную селекцию импульсов, отраженных от объектов, находящихся на различных расстояниях. Это используется для быстрого определения частотных параметров различных неоднородностей в волноводном тракте без его механического разделения [9, 10], для получения временных зависимостей поля и диаграмм направленности антенн в диапазоне частот в дальней зоне (ДЗ) без применения дорогостоящей безэховой камеры при прямых измерениях, а также по измерениям импульсного поля в ближней зоне [11].

Большое народнохозяйственное, научное и экологическое значение имеет измерение характеристик ледяных покровов при помощи как наземных радиолокационных установок, так и размещенных на борту летательных аппаратов [12-14]. При этом очень важно знать не только толщину льда, но и его структуру, солевой состав и возраст. Так как каждый из этих параметров характеризуется своим масштабом неоднородностей и проявляет себя в своем диапазоне длин волн, то возникает необходимость в использовании зондирующих сигналов, содержащих самые разные частоты. Несмотря на то, что радиолокационные методы, основанные на использовании синусоидальных сигналов, совершенствуются на протяжении полувека, одновременное

определение всех характеристик ледяного покрова возможно только при использовании видеоимпульсных радаров.

Важным свойством сигналов без несущей частоты является повышенная проникающая способность в среды с дисперсией и потерями, каковыми являются, например, биологические среды [15], грунты и горные породы [16]. Для построения дорог, трубопроводов, домов в зонах вечной мерзлоты необходимо знать структуру подстилающей поверхности до глубин 5-15 м. Для этого на практике используется видеоимпульсный радар, как наиболее удобный и универсальный [17]. Аналогичные области применения сверхширокополосных сигналов – археология, проверка состояния трубопроводов, дорог и аэродромов [18], обнаружение объектов с противорадарным покрытием [19], зондирование космических объектов и организация ионосферно-магнитосферной радиосвязи [20]. В сельском хозяйстве электромагнитные видеоимпульсные сигналы предлагается использовать для определения влажности зерна, для повышения всхожести семян и борьбы с их вредителями [21].

Хорошо известно, что электромагнитные волны способны проникнуть в среды с очень большими потерями на глубину скин-слоя, толщина которого сравнима с рабочей длиной волны. К таким средам относится морская вода, поэтому связь с погруженными в нее объектами осуществляют в диапазоне сверхдлинных волн. Только в этом случае электромагнитное поле проникает на практически необходимую глубину. Если при этом передаваемый сигнал будет узкополосным, то и скорость передачи информации будет весьма малой. Так как сигналы с более высокой несущей частотой будут проникать на меньшую глубину, то единственный способ увеличить скорость передачи информации состоит в использовании сверхширокополосных сигналов [1, 22].

Высокую помехозащищенность видеоимпульсных каналов передачи информации обеспечивает стробирование при приеме. Поэтому сверхширокополосные сигналы находят применение в устройствах

предотвращения столкновений, управления движением в аэропортах, стыковки космических кораблей и швартовки танкеров [23]. Разработано и внедрено на коксохимическом заводе устройство по предупреждению наезда двересъемных машин на человека [24]. Видеоимпульсные измерители уровня жидкости не только надежно работают в вязкой и агрессивной среде, но и позволяют определять тип налитой в резервуар жидкости [23].

Круг практических приложений нестационарных электромагнитных сигналов постоянно расширяется. Этот процесс, по-видимому, и в будущем не будет замедляться, что в первую очередь связано с бурным развитием и широким распространением цифровой вычислительной техники и цифровых средств связи. Однако нельзя сказать, что в вышеупомянутых областях применения сверхширокополосных сигналов их свойства использованы полностью. Это связано с наличием целого ряда нерешенных задач как теоретического, так и практического плана. Пожалуй, главной среди них является задача излучения нестационарных сигналов.

1.1.3. Излучатели сверхширокополосных сигналов и их характеристики. Расширение круга практических приложений сверхширокополосных электромагнитных волн в свою очередь стимулировало изменение существующих и создание новых излучателей таких полей. Основным требованием, которое к ним предъявляют, является излучение сигнала с минимальными искажениями. Далеко не все антенны с широкой относительной полосой рабочих частот могут излучать импульсы, несущественно искажая их форму. К таким излучателям относятся широкополосный диполь [25, 26], коническая антенна [27], рупорная антенна [28, 29], зеркальная антенна и их всевозможные разновидности. Несмотря на то, что спиральная антенна хорошо работает в очень широком диапазоне частот, для использования ее в качестве излучателя импульсов с синусоидальным заполнением требуется дополнительная линеаризация фазочастотной характеристики [30]. Одним из условий неискажающего приема

и передачи сверхширокополосных сигналов является наличие у антенны фазового центра [31]. Необходимо также учитывать еще одну важную особенность излучателей несинусоидальных волн: форма принятого сигнала зависит от угла наблюдения [32].

При возбуждении излучателя сверхширокополосным сигналом существенно изменяются его направленные характеристики по сравнению с синусоидальным возбуждением. Так, например, в случае периодического импульсного сигнала и гауссова импульса возрастает направленность излучения [33, 34]. При большой ширине спектра возбуждающего сигнала исчезает лепестковая структура диаграммы направленности (ДН) излучателя [31].

Коэффициент направленного действия (КНД) определяется как отношение энергии, излученной антенной в единицу телесного угла в данном направлении, к той же энергии изотропного излучателя при условии равенства излученной энергии в полном телесном угле для антенны и изотропного излучателя. В случае несинусоидальных сигналов КНД зависит от формы и длительности возбуждающего сигнала и возрастает не только при смещении его спектра в высокочастотную область, но, иногда, и при расширении спектра [35, 36]. Все это позволяет оптимизировать излучение сверхширокополосных антенн [37-43].

Еще одной важной характеристикой излучателя является ближняя граница ДЗ, так как в ДЗ направленные характеристики практически не зависят от расстояния наблюдения. В случае синусоидальных полей она определяется следующим образом

$$r_{\text{д.з.}} = \frac{\omega R^2}{c},$$

где ω – круговая частота, R – размер апертуры, c – скорость света.

Данная формула теряет смысл для полей с медленно убывающим при $\omega \rightarrow \infty$ спектром. Седин в работе [44] предложил новую формулу для расчета ближней границы ДЗ

$$r_{\text{д.з.}} = \frac{R^2}{c\tau},$$

где τ – некоторая эффективная длительность импульса.

Как справедливо заметил Крымский [45], рассмотрение данной формулы в качестве критерия ДЗ требует математического обоснования, к тому же нет строгого определения эффективной длительности импульса τ .

Таким образом, в отличие от классических излучателей синусоидальных сигналов излучатели нестационарных полей обладают целым рядом таких необычных свойств как зависимость формы принятого сигнала от угла наблюдения, исчезновение лепестковой структуры ДН, зависимость КНД от формы возбуждающего сигнала. Необходимость учета не только полосы рабочих частот антенны, но и ее фазочастотной характеристики, отсутствие устоявшегося критерия ДЗ свидетельствуют о том, насколько сложна задача создания излучателей несинусоидальных волн с заданными характеристиками, столь необходимых для практических целей. Поэтому необходимо дальнейшее изучение физических процессов, происходящих как в излучающих системах, так и в окружающем их пространстве. Последнее особенно актуально в связи с открытием солитоноподобных волновых пакетов, практическое использование которых позволит передавать сигналы на сверхдальние расстояния с минимальными потерями энергии.

1.1.4. Солитоноподобные электромагнитные волны. Помимо прикладных направлений нестационарной электродинамики, связанных с использованием хорошо известных свойств электромагнитных полей, развиваются новые перспективные направления, в рамках которых исследуются явления ранее неизвестные. Одним из таких направлений

является изучение солитоноподобных решений волнового уравнения, описывающих передачу электромагнитной энергии на большие расстояния с более медленным убыванием, чем квадрат обратного расстояния. Из-за своего необычного поведения эти решения получили экзотические названия, такие как “фокусные волновые моды” (“focus wave modes”), “последовательность импульсов направленной электромагнитной энергии” (“electromagnetic directed energy pulse train”, EDEPT), “брызговые моды” (“splash modes”), “электромагнитные снаряды” (“EM missiles”), “бесселевы лучи” (“Bessel beams”), “электромагнитные пули” (“EM bullets”) и “нестационарные лучи” (“transient beams”).

Первое солитоноподобное решение, названное “фокусными волновыми модами” (“focus wave modes”), было приведено в работе Бриттингема [46]. Оно, подобно решению для плоской волны, описывало электромагнитное поле с бесконечной энергией и, что особенно важно, медленно убывающей с расстоянием амплитудой. Из-за этого данная работа стала предметом широкого обсуждения в научной литературе. В дальнейшем были получены другие солитоноподобные решения, в том числе описывающие электромагнитные волны с конечной энергией [44, 47-66]. Наиболее полный обзор и анализ этих решений дан в [67-69]. Как правило, они описывают электромагнитное поле источника, движущегося в пространстве с комплексными координатами и временем. Обоснование корректности постановки такой задачи приводится в [53,70].

Некоторые теоретические решения были проверены экспериментально путем измерения ультразвуковых волн, излученных решеткой [68, 71-73]. Показано, что, подобрав для каждого излучателя в решетке необходимую амплитуду и спектральную характеристику возбуждающего сигнала, можно получить более направленное излучение, чем излучение решетки на наивысшей частоте выбранного рабочего диапазона. Утверждается также, что для выбранных решений аномально высокая концентрация энергии в

направлении максимума наблюдается не только в ближней зоне излучателя, но и в его ДЗ. Но в процессе экспериментальных проверок солитоноподобных решений при помощи излучателей электромагнитных волн удалось получить аномально высокую концентрацию энергии только в ближней зоне излучателя [55].

Решения, описывающие бездисперсионные волновые пакеты, были получены также для уравнений Клейна-Гордона и Дирака [75]. Они, по мнению авторов, могут описывать поведение элементарных частиц в свободном движении. Предполагается, что полученные линейные решения являются приближениями к точным нелинейным решениям этих уравнений.

Среди перечисленных выше разновидностей солитоноподобных решений подавляющее большинство содержат неразделяющиеся пространственные и временную переменные. Одним из исключений является “электромагнитный снаряд” [44, 50, 55, 63-66], наблюдающийся при излучении источника, возбужденного нестационарным сигналом. При определенном выборе формы излучателя и временной зависимости возбуждающего сигнала энергия излученной волны убывает медленнее, чем обратный квадрат расстояния. Решение такой задачи может быть получено в некоторых случаях при помощи классического метода разделения переменных и преобразования Фурье по времени, что является принципиальным отличием “электромагнитного снаряда” от “фокусных волновых мод” и других подобных решений. Так как предметом исследования являются не просто функции, удовлетворяющие волновому уравнению, а решения нестационарных задач для конкретных излучателей, то такие электромагнитные волновые пакеты имеют конечную энергию. Медленное убывание энергии не противоречит классическим законам электродинамики, так как оно наблюдается только в ближней зоне, размер которой при возбуждении излучателя коротким видеоимпульсом может быть достаточно большим. Теоретически он может равняться бесконечности. Возможность практического использования “электромагнитного снаряда” для

передачи электромагнитных сигналов на значительные расстояния без существенного затухания поддерживает на неизменно высоком уровне интерес к теоретическим и экспериментальным исследованиям солитоноподобных волн.

1.1.5. Выводы. Нестационарные электромагнитные поля, обладая высокой информационной емкостью и проникающей способностью, находят применение в самых различных областях человеческой деятельности. Одним из главных факторов, сдерживающих этот процесс, является сложность расчета излучающих систем для таких полей. Это связано с недостаточным уровнем понимания сути физических процессов, происходящих в излучателе и окружающем его пространстве. Использование классического подхода к данной проблеме, основанного на представлении нестационарного поля в виде суперпозиции гармонических составляющих, крайне затруднительно, а подчас и невозможно. Поэтому проведение дальнейших исследований в данном направлении требует развития новых методов решения задач излучения несинусоидальных полей.

1.2. Выбор направления исследования

1.2.1. Методы решения нестационарных задач. Существующие теоретические методы анализа нестационарных электромагнитных полей можно условно разделить на частотные, когда используется представление сигналов в виде их спектральных плотностей, и временные, когда имеется явная зависимость сигнала от времени. Долгое время для теоретического анализа процессов в линейных стационарных системах использовались и развивались методы в частотной области, что существенно затрудняло исследование нелинейных и нестационарных объектов [21, 76]. При применении частотного метода к решению нестационарных задач, как это сделано в [77, 78], необходимо обязательно учитывать его ограничения [79]. На

примере возбуждающего сигнала в виде синусоидального импульса в [80] показано, что квазимонохроматический подход, при котором спектр возбуждающего импульса раскладывается в ряд Тейлора, приводит к ошибочному результату даже для сигналов, близких к гармоническим.

Усреднение огибающей сигнала конечной длительности по бесконечному интервалу времени при преобразовании Фурье может порождать ошибки в окончательном решении [81]. Это происходит из-за скрывания участков с быстрым изменением огибающей, которые важны для регистрации сигнала. При обратном преобразовании Фурье количество учитываемых высших гармоник влияет на точность определения фронта импульса.

Использование спектрального подхода приводит к решению в виде расходящихся рядов, если в спектре импульса имеется частота, равная частоте отсечки диспергирующей прозрачной среды ω_0 . Это происходит потому, что разложение фазы волны по степеням $\Delta\omega/\omega$ содержит в знаменателе показатель преломления среды $n(\omega)$, но $n(\omega_0)=0$. Поэтому в описании распространения сверхширокополосных импульсов в средах часто приходится отказываться от традиционных понятий гармонического подхода, таких как диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, декремент затухания, фаза, фазовая скорость, частота отсечки [82].

Среди методов во временной области выделяют численные и аналитические. К первой группе можно отнести методы конечных разностей, расщепления волн и инвариантного погружения [83-85]. Сущность метода конечных разностей состоит в построении на основе исходной электродинамической задачи разностных уравнений относительно неизвестной сеточной функции и в последующем её численном расчёте. Данный прямой метод характеризуется универсальностью и простотой реализации, но требует больших затрат машинного времени и наличия значительных объёмов оперативной памяти [86]. К существенным недостаткам метода также относят

сложность физического анализа результатов и отсутствие общепринятых стандартов описания процессов во временной области.

Уравнения Максвелла порождают решения не только в виде запаздывающих, но и в виде опережающих потенциалов, следовательно, численное решение может привести к результатам, не удовлетворяющим принципу причинности. Поэтому, для получения физически приемлемых решений используются уравнения Максвелла в интегральной форме, при этом запаздывание вводится в подынтегральные функции [87, 88].

Для численного решения обратных задач в случае произвольных трёхмерных неоднородностей, поглощающих и гиротропных неоднородных сред используют технику расщепления волн и инвариантного погружения. При помощи расщепляющего оператора произвольного вида волна расщепляется на “первичную” и “отражённую”. Используя метод функции Грина, искомое поле определяют по “падающему”, причём сами функции Грина находят путём численного решения начально-краевой задачи. Основное предназначение метода расщепления волн – численное решение сложных обратных задач. Для решения прямых задач целесообразно использовать другие методы, не требующие такой сложной подготовительной аналитической работы [83].

К аналитическим методам во временной области относятся метод функции Грина, интегральных уравнений и неполного разделения переменных. Метод функции Грина является наиболее простым и физически наглядным, однако он позволяет получать аналитические решения для ограниченного круга задач и при использовании различных упрощающих предположений [89, 90].

В последнее время активно развивается метод интегральных уравнений во временной области, применяющийся для решения задач распространения электромагнитных импульсов через нестационарную среду с потерями [91-97]. В некоторых случаях, используя метод резольвенты, удастся получить аналитические решения. В остальных случаях интегральные уравнения решаются численно.

Методы неполного разделения переменных основаны на уменьшении размерности исходной задачи за счет избавления зависимости от нескольких координатных переменных. Это приводит к существенному облегчению поиска аналитических решений. Так для решения задач излучения можно применить к неоднородному трехмерному волновому уравнению в цилиндрической системе координат преобразование Фурье-Бесселя, в результате чего задача сводится к решению одномерного неоднородного уравнения Клейна-Гордона [98-100]. Следует сразу заметить, что применение преобразования Фурье-Бесселя возможно только при существовании интеграла от модуля раскладываемой функции [101], что напрямую ограничивает круг возможных пространственных распределений тока и поля источника, для которых задача может быть решена. Однако рассмотрение таких интегралов и функций в обобщенном смысле снимает это ограничение. В случае периодических структур размерность задачи можно уменьшить при помощи теоремы Флоке [102]. Но, пожалуй, наиболее обоснованным и понятным с точки зрения физики является метод модового базиса.

1.2.2. Метод модового базиса. Из всех разновидностей методов неполного разделения переменных метод модового базиса или метод эволюционных уравнений выделяется своей строгостью и общностью. Первоначально он предназначался для анализа негармонических колебаний в закрытых резонаторах, заполненных нестационарной нелинейной средой [103]. Разложение нестационарных полей по модовому базису в случае регулярных волноводов привело к получению системы эволюционных волноводных уравнений первого порядка [104, 105]. Преобразование уравнений Максвелла позволило выразить амплитуды продольных компонент поля через поперечные, а представление последних в виде четырёхмерных векторов электромагнитного поля, сводит исходную задачу к системе из трёх операторных уравнений относительно этих четырехмерных векторов, дополненной начальными и граничными условиями. Благодаря условиям на идеально проводящих стенках

волноводов доказана самосопряжённость и ортогональность полученных операторов, каждый из которых имеет собственные векторы и собственные числа. Для доказательства полноты базиса, построенного в поперечной плоскости волновода, использовалась теорема Вейля об ортогональных разбиениях [106]. Коэффициенты разложения находятся путем решения системы из шести связанных дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка, которые в случае заполнения волновода линейной средой преобразуются к трём независимым дифференциальным уравнениям в частных производных второго порядка, описывающим независимое распространение Н-, Е- и Т- волн в волноводе. Поперечным волнам, существующим только в волноводе с многосвязным контуром поперечного сечения, соответствует волновое уравнение, продольным – обобщенное волновое уравнение, а именно: уравнение Клейна-Гордона. Для последнего уравнения все решения с разделёнными переменными найдены в работе [107] путем изучения алгебры Ли симметрии уравнений, причем для него имеется десять различных вариантов, исчерпывающих все возможные ситуации.

Эволюционные уравнения можно решать несколькими способами, в том числе и путём перехода в частотную область, правда, в последнем случае решение задачи ничем не будет отличаться от общепринятого. Метод разделения переменных позволяет получать широкий спектр решений, описывающих разнообразные переходные процессы в волноводах [108]. Например, в работе [109] описана методика решения задачи возбуждения пустого волновода полем с произвольной зависимостью амплитуды от времени.

Одной из особенностей линейных нестационарных электродинамических задач является возможность получения решения в случае произвольной временной зависимости источника, если имеется решение для временной зависимости в виде функции Хевисайда (переходная диаграмма). Подобно тому, как это сделано в работе [110] для нахождения волны, отраженной от

проводящего полупространства, либо для вычисления импульсного поля, излученного зеркальной антенной [111], на основе принципа суперпозиции новое решение ищется в виде свертки переходной диаграммы и временной зависимости источника. В работе [64] утверждается, что использование интегральной свертки для численного расчета эффективнее других численных методов, не требующих предварительной аналитической работы.

На основе вышеизложенного определимся с выбором направления исследования.

1.2.3. Направление исследования. Для дальнейшего изучения, оптимизации характеристик существующих и построения новых типов излучателей сверхширокополосных сигналов необходимо развивать новые методы, позволяющие получать аналитические решения задач во временной области. Временной подход позволяет по иному анализировать физические закономерности процесса излучения и распространения электромагнитных волн, что открывает дополнительные возможности для изучения явлений формирования нестационарных волновых пакетов и локализации энергии поля. С этой точки зрения эволюционный подход, предложенный в методе модового базиса, достаточно перспективен, однако в постановке [103-105] он не приспособлен к решению задач излучения и распространения волн в свободном пространстве.

Главным направлением исследования будет построение модового базиса в свободном пространстве и получение системы эволюционных уравнений, что позволит найти аналитические решения для амплитуд нестационарных полей осесимметричных излучателей. Для этого нужно доказать полноту модового базиса и свести исходную трехмерную задачу к решению эволюционных уравнений, для которых известны общие решения, полученные при помощи метода разделения переменных без использования преобразования Фурье. Это позволит решить в общем виде любую трехмерную задачу излучения нестационарных полей осесимметричным источником.

Будут рассмотрены две разновидности таких задач: излучение источника с заданным распределением нестационарного тока, для чего потребуется решить неоднородное эволюционное уравнение, и излучение источника с заданным распределением нестационарного поля, для чего необходимо решить однородное эволюционное уравнение. Для того чтобы полученные решения можно было в дальнейшем сравнить с уже известными в научной литературе, будем рассматривать задачу излучения диска с равномерным распределением нестационарного тока и задачу излучения из открытого конца коаксиального волновода. Достоверность решения последней задачи можно проверить при помощи экспериментальных исследований во временной области.