

УДК 621. 396.67.018.756

СОВРЕМЕННЫЙ ОБЗОР МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ (ШИРОКОПОЛОСНЫХ) ЗАДАЧ В ЧАСТОТНОЙ И ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

**Т.В. Гаврилова, доцент, к.ф.-м.н., ХНАДУ,
Т.И. Прохорова, студент, ХНАДУ**

***Аннотация.** Представлен обзор подходов, применяемых для анализа свойств широкополосных и нестационарных электромагнитных откликов. Рассмотрены методы решения данной задачи численными и аналитическими методами. Проведено сравнение преимуществ использования численных решений в частотной и временной области.*

***Ключевые слова:** широкополосные и нестационарные отклики, уравнения Максвелла, граничные условия, численные и аналитические методы, частотная и временная область.*

СУЧАСНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ РІШЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ (ШИРОКОСМУГОВИХ) ЗАДАЧ В ЧАСТОТНІЙ І ЧАСОВІЙ ОБЛАСТІ

**Т.В. Гаврилова, доцент, к.ф.-м.н., ХНАДУ,
Т.І. Прохорова, студент, ХНАДУ**

***Анотація.** Представлено огляд підходів, що застосовуються для аналізу властивостей ширококосмугових і нестационарних електромагнітних відгуків. Розглянуто методи вирішення даного завдання чисельними та аналітичними методами. Проведено порівняння переваг використання численних рішень в частотній і часовій області.*

***Ключові слова:** ширококосмугові і нестационарні відгуки, рівняння Максвелла, граничні умови, чисельні та аналітичні методи, частотна і часова область.*

MODERN SURVEYS METHODS FOR THE UNSTEADY (BROADBAND) TASKS IN FREQUENCY AND TIME DOMAIN

**T. Gavrilova, associate professor, cand. ph.-m. sc., KhNAHU,
T. Prokhorova, student, KhNAHU**

***Abstract.** Provides an overview of the approaches used to analyze the properties of broadband and transient electromagnetic responses. The methods for solving this problem by numerical and analytical methods are considered. A comparison of the advantages of using numerical solutions of the frequency and time domain is presented.*

***Keywords:** broadband and transient responses, Maxwell's equations, boundary conditions, numerical and analitic metods, frequency and time domains.*

Введение

Одной из основных проблем современной радиолокации является расширение возможностей обнаружения наземных и воздушных объектов, обладающих особой формой и ма-

лыми величинами эффективной поверхности рассеяния радиоволн. Такие объекты могут оказаться практически незаметными для существующих радиолокационных станций. В монографии [1] рассмотрены направления развития радиолокационных систем, среди

которых такие, как: развитие теории и техники короткоимпульсной радиолокации; экспериментальные исследования возможностей обнаружения реальных целей на основе многопозиционной (бистатической) радиолокации; разработка теории и методов фоновой локации т.е. обнаружения малоразмерных, слабодифрагирующих подвижных объектов по когерентному изучению окружающего их фона промодулированного движущимся объектом и другие.

Принимая во внимание, что в последнее время экспериментально получены сверхкороткие (единицы наносекунд) импульсы микроволнового диапазона значительной мощности (до нескольких гигаватт), авторами [1] указано, что применение таких импульсов для локации может быть чрезвычайно перспективным. В частности, открываются новые возможности восстановления формы лоцируемого объекта, широкий спектр частот зондирующего сигнала позволяет определять наиболее выгодный частотный диапазон локации конкретной цели, разрешающая способность системы по дальности может быть порядка десятка сантиметров и т. п.

Для технической реализации сверхширокополосного лолятора необходимо обеспечить требуемую полосу частот для приемно-передающего тракта, а также возможность «быстрой» обработки отраженного сигнала. Одновременно с этим существенная пиковая мощность зондирующего импульса требует использования более совершенных устройств для защиты приемного лолятора от действия прямого излучения.

Авторы работы [1] проводят сравнение возможностей традиционной импульсной локации системами с длинными импульсами и радиолокационных систем с короткими микроволновыми импульсами применительно к задаче, возникающей при локации небольших объектов на земной и морской поверхности, а также при обнаружении низколетающих объектов.

Постановка задачи

Таким образом, большое внимание, уделяемое в последние десятилетия разработке общих и прикладных вопросов той части электромагнитной теории, которую часто называют общим термином "нестационарная теория", привело к необходимости систематизации подходов, применяемых для анализа свойств широкополосных и нестационарных откликов [2,3].

Характеристика классических численных и аналитических методов решения нестационарных задач

Характеристика классических численных и аналитических методов решения нестационарных задач

Остановимся вначале на методах решения нестационарных (широкополосных) задач, предложенных в работе [2], в которой автор употребляет термины "нестационарный" и "широкополосный" как синонимы ввиду тесной связи временного и частотного (широкополосного) представлений, а также в связи с использованием понятий, дающих информацию одновременно о временной и частотной областях.

В работе рассматриваются наиболее общие подходы к вопросу решения задач электромагнетизма, исходя из уравнений Максвелла в дифференциальной или интегральной форме вместе с граничными условиями и общими теоремами, подобными теореме взаимности и теореме о сохранении энергии, и предложены многочисленные математические методы, пригодные для решения такого рода задач. Все методы разбиты на два больших класса: численные с самого начала и аналитические с самого начала.

Подходы первого класса являются численными в том смысле, что моделирование дифференциальных и (или) интегральных уравнений осуществляется в них посредством прямой численной аппроксимации этих уравнений. Данный класс содержит в себе: численное решение дифференциальных уравнений в частотной области, численное решение дифференциальных уравнений во временной области, численное решение интегральных уравнений в частотной области, численное решение интегральных уравнений во временной области.

Ко второму классу относятся: аналитический подход в s-плоскости, интегральный операторный подход, аналитический пространственно-временной подход, геометрическая симметрия, топологические свойства, синтез на основе дифференциальной геометрии. В этих подходах делаются попытки расщепить задачу в соответствии с различными математическими свойствами рассеяния; в конеч-

ном итоге различные части "факторизованного" решения должны рассчитываться численно. В процессе "факторизации" решения проясняется смысл задачи, и зависимость решения от различных физических параметров сводится в этом случае к зависимостям различных частичных решений от этих параметров. Кроме того, в некоторых случаях "факторизация" может использоваться для определения поддающихся измерениям величин; такой подход может стать основой как экспериментальных, так и теоретических методов.

Реализуются также подходы, которые могут быть использованы при попытке расширить решение задач электромагнетизма в соответствии с фундаментальными математическими свойствами решения. Некоторые из математических свойств (например, свойства решения в плоскости комплексной частоты и свойства оператора диагонализации) достаточно важны и для анализа, и для синтеза электромагнитных устройств. Эти подходы допускают дальнейшее подразбиение по методам.

Аналитический подход в s -плоскости применяется для высокой частоты или базируется на асимптотике малых времен (ВЧ-метод), промежуточных и низких частот или промежуточных и более поздних моментов времени (МСР), низких частот или больших времен (НЧ-метод). Интегральный операторный подход рассматривает собственные моды (МРСМ), характеристические моды.

Дальнейшее развитие нестационарной (широкополосной) теории электромагнетизма может идти как по пути исследования новых подходов и вытекающих из них методов, так и по пути детализации методик расчета для каждого метода.

Методы решения задачи в частотной и временной области

Наиболее употребительным методом решения нестационарных задач является метод, основанный на численном обратном преобразовании Фурье от решения в частотной области. В работе [2] указывается, что вначале этот метод использовался для нахождения некоторых численных оценок нестационарных откликов. Отмечено, что анализ получающейся в результате такого расчета формы

сигнала, равно как и анализ формы сигнала, наблюдаемого в эксперименте, играет некоторую роль при разработке методов, которые лучше отражают физическую сущность процессов рассеяния. Численный Фурье-анализ (или быстрое преобразование Фурье – БПФ) применяется во многих областях науки и техники. Для широкополосных нестационарных сигналов трудности при использовании данного метода возникают, когда частотный спектр восстанавливаемой нестационарной волны имеет участки различной важности или содержит точки излома. Хотя, как указывает автор работы [2], эти трудности не являются непреодолимыми, они требуют особого внимания.

Принципиально иным методом, применяемым для решения задач о распространении широкополосных (ШП) и сверхширокополосных (СШП) сигналов, является метод, основанный на конечно-разностных решениях по временной области [2]. Возможность рассмотреть задачу во временной области, не обращаясь к частотной, обусловлена самими уравнениями Максвелла, которые сформулированы в виде дифференциальных уравнений во временном представлении. Применение мощной современной вычислительной техники позволяет численно решить задачу путем сведения исходных дифференциальных уравнений к соответствующим разностным уравнениям. Такой метод особенно пригоден, если имеется возможность соответствующим образом задать свойства среды (диэлектрическую и магнитную проницаемости и проводимость), граничные и начальные условия и источники. В частности, метод допускает наличие нелинейностей среды, границ и даже их произвольное относительное движение.

Современные методы исследования СШП сигналов

В последнее время широко используются методы обработки данных основанные на вейвлет-преобразованиях [3-4]. Вейвлеты - это математические функции, позволяющие анализировать различные частотные компоненты данных.

Вейвлеты обладают существенными преимуществами по сравнению с преобразованиями Фурье, потому что Вейвлет-преобразование позволяет судить не только о

частотном спектре сигнала, но также о том, в какой момент времени появилась та или иная гармоника. С их помощью можно легко анализировать прерывистые сигналы, либо сигналы с острыми всплесками. Кроме того вейвлеты позволяют анализировать данные согласно масштабу, на одном из заданных уровней (мелком или крупном).

Уникальные свойства вейвлетов позволяют сконструировать базис, в котором представление данных будет выражаться всего несколькими ненулевыми коэффициентами. Это свойство делает вейвлеты очень привлекательными для упаковки данных, в том числе видео- и аудио-информации. Мелкие коэффициенты разложения могут быть отброшены в соответствии с выбранным алгоритмом без значительного влияния на качество упакованных данных. Вейвлеты нашли широкое применение в цифровой обработке изображения, обработке сигналов и анализе данных.

Представляет интерес также тот факт, что, как показано авторами работы [4], большая часть существующих сегодня вейвлетобразующих функций, является СШП сигналами.

Отметим также методы, которые получили распространение в последние годы для описания СШП сигналов и процессов [5]. Так, к ним относятся метод решения нестационарного волнового уравнения, метод А.Б.Шварцбурга, позволяющие получить точные непериодические и нестационарные решения уравнений Максвелла; метод модового базиса (метод О.А. Третьякова); метод обобщенной фазовой плоскости; метод функций Уолша и другие.

Выводы

Применение СШП сигналов для задач радиолокации, телекоммуникаций, дистанционного зондирования и других с использованием современных технологий требует развития и совершенствования методов их описания.

Рассмотренные классы аналитических и численных методов и современных подходов к решению задач о распространении СШП сигналов позволяют сделать вывод о достаточно полной возможности описания такого рода сигналов, которые генерируются в широчайшем диапазоне электромагнитных волн – от единиц герц до тысяч петагерц.

Литература

1. Вопросы перспективной радиолокации. Коллективная монография./ Под. ред. А.В. Соколова. – М.: Радиотехника, 2003 – 512с.
2. Баум К.Э. Новые методы нестационарного (широкополосного) анализа и синтеза антенн и рассеивателей / ТИИЭР, т.64, ноябрь 1976 – С. 53-74.
3. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов: Пер.с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
4. Кравченко В. Ф., Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Новый класс аналитических вейвлетов Кравченко–Рвачева в задачах анализа сверхширокополосных сигналов и процессов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 5. – С. 29-47.
5. Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы / Радиофизика и электроника, т. 13, №2, 2008 – С. 166-194.