

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТЕРЖНЕВОЙ АНТЕННЫ

Магомедкеримов Руслан Гераклиевич

курсант, Военная академия воздушно-космической обороны им. Г.К. Жукова, РФ, г. Тверь

DIELECTRIC ROD ANTENNA DESIGN

Ruslan Magomedkerimov

Cadet, Military Academy G.K. Zhukov Aerospace Defense, Russia, Tver

Аннотация. В данной проблемно-теоретической статье представлено исследование оптимизации параметров диэлектрических стержневых антенн для достижения максимальной эффективности излучения и управления формой диаграммы направленности. В отличие от традиционных подходов, рассматривающих диэлектрический стержень как волновод, предлагается модовый анализ, основанный на раздельном учете возбуждения, распространения и излучения поверхностных и объемных мод. Показано, что оптимизация параметров антенны, направленная на максимизацию энергии поверхностных мод и минимизацию объемных, не только повышает эффективность, но и позволяет формировать желаемую диаграмму направленности. Актуальность исследования обусловлена растущим спросом на высокоэффективные и конфигурируемые антенны для современных беспроводных систем связи, включая перспективные приложения в миллиметровом диапазоне. Методология включает в себя теоретический анализ на основе аппроксимации поля цилиндрическими функциями и численное моделирование. Результаты демонстрируют, что согласованная оптимизация длины, диаметра стержня и диэлектрической проницаемости на основе предложенного модового анализа приводит к увеличению коэффициента усиления, снижению уровня боковых лепестков и обеспечению хорошего согласования с входным импедансом. Подтверждено, что управление модовым составом является эффективным инструментом для проектирования диэлектрических стержневых антенн с заданными характеристиками излучения.

Abstract. This problem-theoretical article presents a study of optimizing the parameters of dielectric rod antennas to achieve maximum radiation efficiency and control the shape of the radiation pattern. In contrast to traditional approaches that consider a dielectric rod as a waveguide, a mode analysis is proposed based on separate consideration of the excitation, propagation, and radiation of surface and bulk modes. It is shown that optimization of antenna parameters aimed at maximizing the energy of surface modes and minimizing volumetric ones not only increases efficiency, but also allows the formation of the desired radiation pattern. The relevance of the research is due to the growing demand for highly efficient and configurable antennas for modern wireless communication systems, including promising applications in the millimeter range. The methodology includes theoretical analysis based on the approximation of the field by cylindrical functions and numerical modeling. The results demonstrate that consistent optimization of the rod length, diameter, and dielectric constant based on the proposed mode analysis leads to an increase in gain, a decrease in the side lobe level, and a good match with the input impedance. It is confirmed that mode composition control is an effective tool for designing dielectric rod antennas with specified radiation characteristics.

Ключевые слова: диэлектрическая стержневая антенна, эффективность излучения, диаграмма направленности, коэффициент усиления, модовый анализ, поверхностные моды, объемные моды, управление диаграммой направленности.

Keywords: dielectric rod antenna, radiation efficiency, radiation pattern, gain, mode analysis, surface modes, volumetric modes, radiation pattern control.

Диэлектрические стержневые антенны привлекают внимание разработчиков благодаря их компактности, простоте, отсутствию металлических элементов и потенциалу для работы в широком диапазоне частот, что делает их перспективными для использования в беспроводных системах связи, радиолокации и сенсорных сетях. Однако, проектирование диэлектрических стержневых антенн с высокими характеристиками, такими как: высокая эффективность излучения, желаемая форма диаграммы направленности и хорошее согласование с передающим трактом, остается достаточно сложной задачей для разработчиков.

Существующие подходы к проектированию диэлектрических стержневых антенн часто основаны на эмпирических формулах, упрощенных аналитических моделях или прямом численном моделировании. Эмпирические формулы и аналитические модели не учитывают комплексное взаимодействие параметров антенны и не позволяют точно прогнозировать характеристики излучения. Прямое численное моделирование требует значительных вычислительных ресурсов и не всегда позволяет выявить оптимальные параметры и понять физические механизмы формирования диаграммы направленности. В связи с этим, в данной работе решается задача разработки эффективного подхода к проектированию диэлектрических стержневых антенн, основанного на анализе мод, возбуждаемых в диэлектрическом стержне, с целью оптимизации параметров антенны для достижения максимальной эффективности излучения, управления формой диаграммы направленности и обеспечения хорошего согласования с питающей линией.

Целью данной статьи является разработка, верификация и применение подхода к проектированию диэлектрических стержневых антенн, основанного на анализе мод, возбуждаемых в диэлектрическом стержне. Предлагается новая интерпретация влияния параметров антенны на формирование диаграммы направленности и коэффициента усиления, основанная на раздельном учете поверхностных и объемных мод. Показано, что управление модовым составом позволяет не только повысить эффективность излучения, но и формировать желаемую диаграмму направленности. Разработанный подход верифицируется с помощью численного моделирования.

Принцип работы диэлектрических стержневых антенн основан на возбуждении электромагнитных волн в диэлектрическом стержне, которые распространяются вдоль него и излучаются в свободное пространство. Форма диаграммы направленности, коэффициент усиления и входной импеданс зависят от распределения поля вдоль стержня, которое определяется длиной, диаметром и диэлектрической проницаемостью материала.

Традиционные подходы к анализу диэлектрических стержневых антенн часто рассматривают стержень как волновод, в котором распространяется основная мода HE_{11} . Однако, такой подход не учитывает возможность возбуждения высших мод, которые могут существенно влиять на характеристики излучения, особенно при увеличении диаметра стержня и диэлектрической проницаемости. Численные методы позволяют более точно моделировать поведение диэлектрических стержневых антенн, однако требуют значительных вычислительных ресурсов и не всегда позволяют выделить вклад отдельных мод в формирование диаграммы направленности.

В отличие от существующих подходов, в данной работе предлагается способ, основанный на раздельном анализе поверхностных и объемных мод, с целью управления их возбуждением и распространением для оптимизации характеристик излучения. Поверхностные моды, характеризующиеся концентрацией электромагнитной энергии вблизи поверхности стержня,

определяют основную долю излучаемой энергии ведущего направления и формируют главный лепесток диаграммы направленности. Объемные моды, характеризующиеся распределением энергии внутри стержня, могут приводить к появлению боковых лепестков, увеличению уровня заднего излучения, снижению эффективности и ухудшению согласования с питающей линией.

Предлагаемая интерпретация заключается в том, что диаграмма направленности диэлектрической стержневой антенны формируется в результате интерференции поверхностных и объемных мод, возбуждаемых в диэлектрическом стержне. Управление модовым составом, путем оптимизации параметров антенны, позволяет формировать желаемую диаграмму направленности и достигать максимальной эффективности излучения.

Для анализа мод, возбуждаемых в диэлектрической стержневой антенне, используется аппроксимация цилиндрическими функциями Бесселя первого и второго рода. Распределение электрического поля в стержне можно представить в виде суперпозиции мод, где каждый член описывает вклад определенной моды в общее поле.

Параметры антенны, а именно длина, диаметр и диэлектрическая проницаемость материала, оказывают влияние на возбуждение и распространение мод. Длина влияет на фазовые соотношения между модами в дальней зоне, что определяет форму диаграммы направленности. Оптимальная длина обеспечивает баланс между усилением и формой диаграммы направленности. Диаметр определяет спектр возбуждаемых мод. Оптимальный диаметр обеспечивает баланс между возбуждением достаточного количества поверхностных мод и подавлением объемных мод. Диэлектрическая проницаемость влияет на величину поперечного волнового числа и скорость распространения мод. Оптимальное значение диэлектрической проницаемости обеспечивает эффективную концентрацию энергии в поверхностных модах и снижает потери на отражение на границе диэлектрик-воздух.

Таким образом, управление модовым составом и формирование желаемой диаграммы направленности достигается путем оптимизации параметров антенны, направленной на возбуждение преимущественно поверхностных мод и подавление объемных мод. В данной работе предлагается использовать численный анализ для определения оптимальных значений этих параметров.

Для анализа и оптимизации параметров диэлектрической стержневой антенны была разработана следующая методика:

1. Теоретический анализ: определение распределения поля в диэлектрическом стержне на основе аппроксимации цилиндрическими функциями и анализа возбуждаемых мод. Идентификация ключевых параметров, влияющих на возбуждение и распространение поверхностных и объемных мод.
2. Численное моделирование: моделирование диэлектрической стержневой антенны с различными значениями параметров. Антенна возбуждалась коаксиальным кабелем. Для обеспечения сходимости результатов использовалась адаптивная сетка. Расчет проводился на определенной частоте.
3. Оптимизация параметров: использование алгоритмов оптимизации для поиска оптимальных значений параметров, обеспечивающих максимальный коэффициент усиления, минимальный уровень боковых лепестков и минимальный коэффициент стоячей волны. Целевая функция оптимизации была определена как взвешенная сумма этих характеристик.
4. Анализ мод: визуализация распределения электромагнитного поля в диэлектрической стержневой антенне для идентификации возбуждаемых мод и оценки их вклада в формирование диаграммы направленности.

Исследование проводилось в заданном диапазоне параметров, включая длину, диаметр и диэлектрическую проницаемость материала.

Результаты численного моделирования подтвердили эффективность предложенного подхода к оптимизации параметров диэлектрической стержневой антенны на основе модового анализа. Было установлено, что оптимальное соотношение между длиной, диаметром стержня и

диэлектрической проницаемостью обеспечивает максимальный коэффициент усиления, минимальный уровень боковых лепестков и хорошее согласование с питающей линией.

Анализ характеристик антенны при различных значениях параметров продемонстрировал, что небольшие отклонения от оптимальных значений приводят к ухудшению характеристик. Это подтверждает чувствительность характеристик диэлектрической стержневой антенны к параметрам и необходимость точной оптимизации.

Предложенный модовый анализ позволяет объяснить полученные результаты. Оптимизация параметров направлена на максимизацию амплитуды поверхностной моды HE₁₁ и минимизацию амплитуд других мод, особенно объемных. Это приводит к увеличению эффективности излучения в главном направлении и снижению уровня боковых лепестков.

В данной статье предложен эффективный подход к проектированию диэлектрических стержневых антенн, основанный на модовом анализе и управлении модовым составом. Предложена новая интерпретация влияния параметров антенны на формирование диаграммы направленности и коэффициент усиления, основанный на раздельном учете поверхностных и объемных мод. Результаты численного моделирования подтвердили эффективность предложенного подхода и позволили выявить оптимальные значения параметров, обеспечивающие максимальную эффективность излучения, хорошее согласование с питающей линией и управление формой диаграммы направленности. Предложенный подход может быть использован для проектирования компактных и высокоэффективных антенн для современных беспроводных систем связи.

В дальнейшем планируется исследовать влияние формы диэлектрического стержня и использование метаматериалов для дальнейшего повышения эффективности излучения и расширения полосы пропускания диэлектрической стержневой антенны. Также планируется разработка аналитической модели, связывающей параметры антенны с коэффициентами возбуждения мод, для более эффективной оптимизации параметров диэлектрической стержневой антенны.

Список литературы:

1. Алаэй А., и др. Проектирование и оптимизация диэлектрических резонаторных антенн для приложений 5G // IEEE Access. – 2020. – Т. 8. – С. 145672-145682.
2. Баланис К.А. Теория антенн: анализ и проектирование. – Хобокен, Нью-Джерси: John Wiley & Sons, 2015.
3. Деб А., и др. Всесторонний обзор диэлектрических резонаторных антенн // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. –2017. – Т. 9. – № 2. – С. 271-287.
4. Джексон Дж. Д. Классическая электродинамика. – Нью-Йорк: John Wiley & Sons, 1999.
5. Коллин Р.Е. Антенны и распространение радиоволн. – Нью-Йорк: McGraw-Hill, 1991.
6. Кумар Г., Рэй К.П. Широкополосные микрополосковые антенны. –Норвуд, МА: Artech House, 2003.
7. Ли Й., и др. Компактная диэлектрическая резонаторная антенна для приложений миллиметрового диапазона // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2021. – Т. 20. – № 5. – С. 844-848.
8. Садику М. Н. О. Численные методы в электромагнетизме с MATLAB. –Бока-Ратон, Флорида: CRC press, 2018.
9. Сингх Р.К., и др. Диэлектрическая резонаторная антенна для носимых приложений: обзор // Microwave and Optical Technology Letters. – 2022. – Т. 64. – № 3. – С. 523-534.

