

УДК 537.86

СУПЕРНАПРАВЛЕННАЯ СФЕРИЧЕСКАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АНТЕННА

Гапоненко Р.В. (Физико-технический мегафакультет, Университет ИТМО),

Сидоренко М.С. (Физико-технический мегафакультет, Университет ИТМО)

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент Щербаков А.А.

(Физико-технический мегафакультет, Университет ИТМО)

В данной работе выполнен теоретический анализ максимального коэффициента направленного действия (КНД) антенны, состоящей из сферического диэлектрического резонатора, возбуждаемого электрическим диполем. Также описаны методы, использованные для экспериментальной реализации предлагаемой конструкции антенны, и проанализированы полученные в эксперименте результаты.

Введение. О том что диэлектрические антенны имеют резонансное поведение известно уже более ста лет, однако, по-настоящему востребованными они стали в период бурного развития информационных технологий. В настоящее время они является одним из наиболее привлекательных типов антенн для использования на сверхвысоких частотах волн благодаря простоте конструкции, своим малым габаритам и отсутствию омических потерь. Задача рассеяния плоской электромагнитной волны на однородной сфере произвольного размера была решена Гюставом Ми в 1908 году. Физически увеличения КНД антенны на разных частотах соответствуют возбуждению определенных электрических и/или магнитных мод открытого резонатора. Математически же они соответствуют полюсам коэффициентов рассеяния в теории Ми и зависят от параметров сферы, таких как показатель преломления и отношение радиуса сферы к длине волны. Позднее были предприняты попытки вычислить и описать математически простой формулой максимальный КНД антенн. Наиболее известными пределами являются теоретические пределы Р. Харрингтона (1958 г.) и П.-С. Килдала (2011 г.), в которых они исходят из предположения что возможное число эффективно возбуждаемых мод пропорционально размеру антенны относительно длины волны. Антенны, не вписывающиеся в данные пределы, принято называть ‘супернаправленными’.

В данной работе мы теоретически и экспериментально исследуем верхний предел КНД сферической диэлектрической антенны, возбуждаемой электрическим диполем, и показываем, что данные лимиты Р. Харрингтона и П.-С. Килдала не применимы для электрически малых антенн. Наша работа выполнена с применением аналитического решения, описанного в работе А. Мороза (2005 г.), в которой теория Ми была доработана для задачи рассеяния электромагнитного излучения от дипольного источника многослойной сферой.

Основная часть. В данной работе изучался верхний предел КНД многослойной сферической диэлектрической антенны, возбуждаемой электрическим диполем и расположенным вдоль интерфейса сферического резонатора. Для анализа применялся процесс стохастической оптимизации JADE, основанный на точном аналитическом решении поставленной задачи с помощью разложения падающего и рассеянного электромагнитных полей в ряд по набору векторных сферических гармоник. Оптимизируемыми параметрами являлись геометрические и материальные параметры слоев, положение диполя. В результате анализа, проведенного для разного количество слоев и для разных размеров сферического резонатора, была изучена верхняя граница КНД и сформированы рекомендации для получения супернаправленных антенн. Было выявлено что максимальный КНД такой конструкции достигается за счет эффективного возбуждения определенных магнитных и электрических мод открытого сферического резонатора и их конструктивной интерференции в заданном направлении. Полученные аналитические результаты были численно проверены в пакете CST Studio Suite и с высокой точностью совпали с аналитическим решением. Некоторые из полученных супернаправленных дизайнов были проверены экспериментально в безэховой камере

Университета ИТМО. Эксперимент проводился со сферическими резонаторами разных видов: в виде однородной керамической сферы и в виде тонкой пластиковой оболочки, заполненной диэлектрическим порошком с низкими потерями. В ходе эксперимента измерялись характеристики прохождения сигнала и характеристики отражения сигнала от его портов (S-параметры) для каждого плеча излучающего электрического диполя и приемной рупорной антенны, подключенных отдельно к разным портам четырехпортового векторного анализатора цепей R&S ZVB20 с помощью коаксиальных кабелей. Затем путем математических преобразований были получены коэффициенты усиления и КНД изучаемых антенн. Полученные экспериментальные результаты показали хорошую сходимость с исходными теоретическими данными.

Выводы. Полученные теоретические результаты проверены экспериментально и могут применяться для реализации направленных электрически малых диэлектрических антенн, которые представляют большой интерес в различных приложениях, включая беспроводную связь, передачу энергии и дистанционное зондирование. Применение диэлектрических материалов с высоким показателем преломления позволяет значительно уменьшить потери на сверхвысоких частотах по сравнению с металлическими антеннами, снизить уровень электромагнитного воздействия путем создания направленного излучения, а также уменьшить физические размеры применяемых электронных устройств для сетей 5G и 6G. Особое внимание можно остановить на разработке полностью диэлектрических антенн для космоса, которые не чувствительны к воздействию ультрафиолета и рентгеновского излучения.