

Моделирование ОУМ-волн от кольцевой антенной решетки*

М.А. Бурнин¹, О.В. Богданов^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

² *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Представлено моделирование кольцевой антенной решетки из десяти спиральных антенн в среде COMSOL Multiphysics, генерирующей электромагнитные волны с орбитальным угловым моментом (ОУМ) в миллиметровом диапазоне. Исследованы диаграммы направленности и фазовые распределения излучения для различных топологических зарядов ($l = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$). Продемонстрировано формирование стабильного спирального волнового фронта на расстоянии $\sim 1.5\lambda$ от излучателя. Моделирование дифракции на двух щелях и треугольной апертуре выявило характерную зависимость смещения интерференционной картины от знака и величины ОУМ, а также сохранение поляризации. Разработанная модель открывает перспективы для применения в системах пространственного мультиплексирования и фундаментальных исследований взаимодействия закрученного излучения с веществом.

Ключевые слова: орбитальный угловой момент, круговая поляризация, кольцевая антенная решетка, спиральная антенна, диаграммы направленности, математическое моделирование.

Введение

Методы генерации, детектирование и применение закрученных волн с орбитальным угловым моментом (ОУМ) – активно развивающееся направление в физике. Экспериментальная работа В.Ю. Баженова, М.В. Васнецова и М.С. Соскина [1] одной из первых продемонстрировала возможность преобразования лазерного пучка с плоским волновым фронтом в лазерный пучок с дислокациями различных порядков при прохождении через многомодовый волновод и при дифракции на синтезированных голограммах. В дальнейшем ставшая знаковой работа Аллена и его коллег [2] продемонстрировала, что пучки света с модами Лагерра – Гаусса несут ОУМ, связанный со спиральной структурой волнового фронта. Особый интерес к ОУМ-волнам обусловлен их уникальными свойствами: ортогональность мод с различными топологическими зарядами, позволяющая реализовать мультиплексирование в пространстве углового момента; самовосстановление структуры пучка после прохождения через препятствия; спин-орбитальное взаимодействие, открывающее возможности для управления поляризационными характеристиками и др. Перенос такими волнами ОУМ – дополнительной степени свободы, имеет ряд практических приложений, среди которых решение проблемы спектральной перегрузки и существенного увеличения пропускной способности систем связи. Это стимулировало как развитие теоретических исследований, так и разработки прикладных технологий, включая создание специализированных антенных систем. Например, в недавних исследованиях [3–5] предложен метод мультиплексирования сигналов с помощью вихревых фотонов, создаваемых круговой антенной решеткой, и их демultipлексирования. Этот подход демонстрирует возможность создания независимых каналов передачи информации за счет ортогональности мод с различными проекциями углового момента. В работах [6–11] представлен обзор современных методов мультиплексирования с использованием орбитального углового момента в системах беспроводной связи. Эти исследования демонстрируют значительный потенциал данного подхода для существенного увеличения пропускной способности каналов передачи данных.

Работы [12–15] отражают динамичное развитие этой междисциплинарной области. Исследования охватывают широкий спектр направлений, включая электродинамику, антенную технику, ускорительную физику и теорию информации. Например, недавно проведены эксперименты по исследованию переходного излучения релятивистских электронов на пучках SAGA LS [16]. Специфическая дифракционная картина от когерентного переходного излучения на двойной щели и треугольной апертуре выявила, что такой, ставший классическим, вид излучения переносит ОУМ.

Технологические аспекты практической реализации систем с ОУМ детально рассмотрены в монографиях [17, 18]. Особое внимание уделено проектированию антенных решеток, способных

* Исследования выполнены при поддержке гранта Правительства Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2025-009 от 28.02.2025 г.).