УДК 004.942:535.94

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕВИДИМОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Салмин А.А. – студент ИИТМА,
Мельников Н.А. – студент ИИТМА,
Елкин И.С. – научный руководитель, к.т.н., доцент
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
Россия, г. Кемерово

Идея создания невидимости физического объекта долгое время оставалась предметом фантастики и мифологии, однако современные достижения в области оптики и материаловедения позволяют рассмотреть эту тему как перспективное направление научных исследований. Развитие метаматериалов и нанофотоники открывает возможности для управления световыми волнами, что может привести к созданию технологий скрытия объектов от человеческих глаз и от мировых технологий обнаружения объектов. Критически важным элементом в разработке таких структур становятся современные информационные технологии, позволяющие проводить их точное моделирование и оптимизацию до дорогостоящего физического воплощения [3], [6].

Метаматериал – композиционный материал, свойства которого обусловлены резонансными свойствами составляющих его элементов (метаатомов). Это однородные среды, обладающие электромагнитными или акустическими свойствами, сложнодостижимыми технологически, либо не встречающимися в природе [3].

Актуальность метаматериалов для информационных технологий обусловлена стремительной цифровизацией, ростом объемов данных и необходимостью новых решений.

Современные исследования в области создания эффекта невидимости базируются на фундаментальных оптических явлениях, таких как преломление и отражение электромагнитных волн. Ключевым аспектом является возможность управления распространением света с помощью искусственных метаматериалов, обладающих уникальными свойствами, не встречающимися в природе.

Теория преобразующей оптики связывает геометрию материала с распределением показателя преломления, позволяя проектировать структуры, которые «обтекают» свет вокруг скрываемого объекта.

Ключевым инструментом в исследовании и проектировании метаматериалов является численное моделирование. В данной работе активно использовался метод конечных разностей во временной области (FDTD). Этот алгоритм позволяет шаг за шагом рассчитать распространение электромагнитной волны через сложную среду, что идеально подходит для анализа нестандартного взаимодействия света с метаатомами.

Для начала было решено провести расчет условий, при которых возможно формирование отрицательного показателя преломления n, используя классическую модель эффективной среды:

$$n = \sqrt{\mu\varepsilon}, \quad (1)$$

где: ε – эффективная диэлектрическая проницаемость; μ – магнитная проницаемость.

Исходя из расчетов, при использовании спиралевидных медных резонаторов (SRR) с параметрами:

1. частота: f = 10 ГГц,
2. размер ячейки: α = 1 мм,
3. толщина проводника: t = 0,1 мм,

нами были получены следующие значения из моделирования с использованием метода конечных разностей во временной области (FDTD) [2]: $\varepsilon_{eff} \approx -2.1$, $\mu_{eff} \approx -1.7$.

Отсюда: $n = \sqrt{-2.1 \cdot (-1.7)} \approx \sqrt{3.57} \approx 1.89$.

Однако фазовая скорость при этом отрицательная, что подтверждает наличие эффекта обратного направления распространения.

1. Источник: плоская волна (TEM) с частотным диапазоном от 5 до 15 ГГц;
2. Граничные условия: PML (поглощающие слои), периодические по X и Y;
3. Запуск моделирования во времени до выхода на стационарное состояние.

Используется стандартная методика через обратный метод Николсона-Росса-Уейра (NRW) [1]**.** Измеряются:

1. Коэффициент отражения S_{11};
2. Коэффициент прохождения S_{21}.

Далее по формулам последовательно вычисляются волновое сопротивление Z и показатель преломления n:

$$Z = \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}{}^2}{(1-S_{11})^2 - S_{21}{}^2}}, \; n = \frac{1}{k_0 d}\cos^{-1}\left(\frac{1 - S_{11}{}^2 + S_{21}{}^2}{2S_{21}}\right) \quad (2)$$

А уже оттуда:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{n}{Z}, \; \mu_{eff} = n \cdot Z. \quad (3)$$

Нами были получены значения:

$\varepsilon_{eff} \approx -2.1 + 0.3i$;

$$\mu_{eff} \approx -1.7 + 0.2i$$

и пересчитали $n = \sqrt{\varepsilon\mu} \approx 1.89$, с отрицательной фазовой скоростью.

Далее смоделировав структуру с SRR и проводящими полосками, была предпринята попытка аппроксимировать её поведение с помощью эффективной среды. В рамках данной работы нам не удалось изготовить реальную структуру, но были использованы специальные программные обеспечения CST Studio и COMSOL Multiphysics для оценки поведения ячейки [4].

SRR (Split-Ring Resonator) – это ключевой элемент метаматериалов, представляющий собой металлическое кольцо с разрывом, создающее эквивалент LC-контура. При взаимодействии перпендикулярного магнитного поля, в кольце индуцируется резонансный ток, в следствии чего, структура может эффективно управлять магнитной компонентой электромагнитной волны на фиксированной частоте. Данное свойство используется для создания сред с отрицательной магнитной проницаемостью [5].

По формулам был посчитан коэффициент отражения R через волновое сопротивление:

$$R = \left|\frac{Z-Z_0}{Z+Z_0}\right|^2, \text{ где } Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}, \; Z_0 = 377\Omega. \qquad (4)$$

Для одного из пиков в 1.1 ТГц получили:

$\mu \approx -0.9 + 0.2i$,

$\varepsilon \approx -1.3 + 0.1i$.

Тогда:

$$Z \approx \sqrt{\frac{-0.9+0.2i}{-1.3+0.1i}} \approx 0.82 - 0.05i;$$

$$R = \left|\frac{0{,}82-0.05i-1}{0.82-0.05i+1}\right|^2 \approx 0.013.$$

Т.е. отражение составляет всего $\sim 1.3\%$, что указывает на почти полное прохождение волны – потенциально полезно для эффектов «оптического обтекания».

Ключевым аспектом исследования стало изучение угловых характеристик рассеяния электромагнитных волн. Моделирование диаграммы направленности показало принципиальную возможность управления распределением энергии с помощью метаповерхностей.

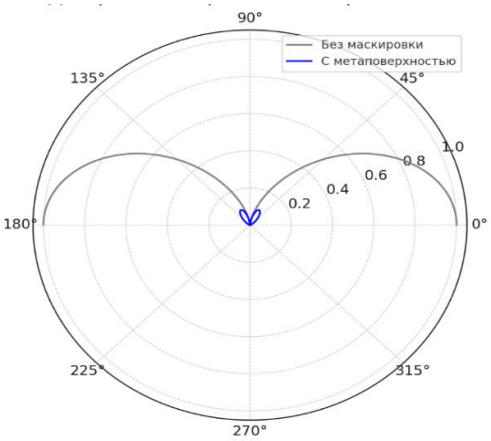

Рисунок 1 - Диаграмма направленности рассеяния в полярных координатах

1. Серая линия – поведение без маскировки: рассеяние симметрично, максимум в направлении нормали. Максимум рассеяния наблюдается строго вдоль направления падения и отражения волны. Это типично для большинства

объектов, которые просто отражают падающий свет в соответствии с законом отражения.

2. Синяя линия – с метаповерхностью: подавление рассеяния в центральной области (вперед и назад), что имитирует эффект «оптического обтекания». Интенсивность рассеяния резко снижается в центральной области (от 60° до 120°) и распределяется вбок, формируя своего рода «теневое обтекание». Это указывает на то, что волны действительно обходят объект и уходят вбок, скрывая его от наблюдателя, стоящего, напротив.

Анализ полярного графика позволяет сделать однозначный вывод: метаповерхность эффективно изменяет угловое распределение рассеянной энергии, минимизируя её в направлениях прямого (0°) и обратного (180°) рассеяния. Метаповерхность не устраняет рассеяние полностью, но перераспределяет его – и это ключ к оптической маскировке. Полученные результаты открывают перспективы для развития информационных технологий. Достигнутое снижение обратного рассеяния до 1.3% создает основу для разработки малозаметных коммуникационных каналов, устойчивых к перехвату и внешнему обнаружению. Возможность управления диаграммой направленности рассеяния позволяет принципиально по-новому подойти к организации беспроводных сенсорных сетей, оптимизируя распределение сигнала и минимизируя взаимные помехи между устройствами.

Задача ИТ – проводить многопараметрическую оптимизацию и использовать машинное обучение для проектирования широкополосных и углонезависимых структур.

В заключении хотелось бы добавить, что вычислительные методы позволяют точно оценивать энергетические потери и виртуально тестировать альтернативные материалы (например, диэлектрические метаповерхности) с меньшим поглощением.

Переход от модели одной ячейки к макроскопическому объекту требует суперкомпьютерных мощностей и эффективных алгоритмов, что является вызовом для современных вычислительных систем.

Проведенное исследование показало, что создание эффекта невидимости с использованием метаматериалов является сложной, но потенциально решаемой междисциплинарной задачей, где информационные технологии играют важную роль. Численное моделирование (FDTD) и специализированное программное обеспечение является основным инструментом для проектирования, верификации и оптимизации метаструктур.

Список литературы:

1. Caloz, C. Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications [Текст] / C. Caloz, T. Itoh. – John Wiley & Sons, 2006. – 376 p.

2. Kong, J. A. Electromagnetic Wave Theory [Текст] / J. A. Kong. – EMW Publishing, 2008. – 588 p.

3. Козлов, А. А. Метаматериалы и метаповерхности [Текст] / А. А. Козлов, И. В. Петров // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т. 52, № 3. – С. 45–52.

4. Ojaroudi Parchin, N. Metamaterials and Metasurfaces [Текст] / N. Ojaroudi Parchin, R. A. Abd-Alhameed. – Springer, 2023. – 215 p.

5. Pendry, J. B. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [Текст] / J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, W. J. Stewart // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1999. – Vol. 47, No. 11. – P. 2075–2084.

6. Сидоров, Б. Н. Структура метаматериалов [Текст] / Б. Н. Сидоров, Е. М. Иванова // Нанотехнологии и наноматериалы. – 2019. – Т. 7, № 2. – С. 33–40.