Метаматериалы и метаповерхности

Лекторы:
Станислав Глыбовский
Александр Сочава

Язык:
Русский

Трудоемкость:
6 з.е.

Образовательная программа:
Беспроводные технологии (магистратура)
2 семестр

Пререквизиты:
Техническая электродинамика
Радиотехнические цепи и сигналы

Лекции (ак.час)*	Практические занятия (ак.час)	Лабораторные занятия (ак.час)
32	32	
*1 академический час = 45 минутам		

Целью курса является изучение электромагнитных свойств метаматериалов и метаповерхностей. Для этого при изучении курса решаются следующие задачи: ознакомление с основными свойствами электромагнитных волн в периодических структурах. Изучаются понятия макроскопических (усредненных) материальных параметров изотропных и бианизотропных сред. Приводятся примеры физической реализации подобных сред и описывается связь усредненных параметров с микроструктурой элементарных ячеек (мета-атомов). Вводится физическая классификация мета-атомов. Рассматриваются методы аналитического решения задачи о падении плоской электромагнитной волны на слой метаматериала. Также изучаются двумерные периодические структуры с субволновой периодичностью (метаповерхности) и вводится их физическая и функциональная классификации. Описываются основные типы метаповерхностей и приводятся примеры их применения в радиочастотном диапазоне, в частности, в антенной технике.

Содержание курса

2 семестр

Метаматериалы и метаповерхности

Структура курса

Разделы	Лекции (ак.ч.)	Практика (ак.ч.)
Часть 1. Метаматериалы	16	16
1. Анизотропные среды. Уравнения Максвелла и материальные соотношения для сложных сред. Диадная алгебра. Основные операции с диадами. Базисы и координаты. Единичная диада.		
2. Симметричные и антисимметричные диады. Инварианты диад. Обратная диада. Классификация диад: полные диады, планарные диады, линейные диады. Сложные функциональные преобразования планарных диад. Волновые уравнения для бианизотропных сред.		
3. Макроскопические материальные параметры в уравнениях Максвелла. Электромагнитные свойства природных материалов. Высокочастотная проницаемость намагниченного феррит. Диэлектрическая проницаемость холодной плазмы.		
4. Метаматериалы: примеры и принципы синтеза. Механизмы магнитоэлектрической связи.		
5. Лемма Лоренца и теорема взаимности для бианизотропных сред.		
6. Классификация бианизотропных сред. Диады связи, учет параметров киральности и невзаимности. Примеры псевдокиральных омега-сред.		
7. Теорема Пойнтинга (Poynting) для сложных сред. Среды без потерь и с потерями. Ограничения, накладываемые на вещественные и мнимые части материальных параметров, импеданс плоской границы раздела.		
8. Соотношения Крамерса – Кронига (Krönig – Cramers). Правила сумм.		
9. Поля в однородных биизотропных и бианизотропных средах. Разложение полей в изотропной среде на волновые составляющие. Преобразование полей в биизотропной сред.		
10. Уравнения для полей в биизотропных средах. Плоские волны в биизотропных средах. Плоские волны в одноосной омега сред. Волновые импедансы и адмитансы (сопротивления и проводимости).		
11. Волны в слоистых средах. Отражение и прохождение через плоские слои омега композитов.		
12. Теория векторных линий передачи. Коэффициенты отражения и прохождения для слоистых бианизотропных сред общего вида.		
13. Пространственная дисперсия. Понятие слабой пространственной дисперсии.		
14. Теория электродинамических параметров сплошных сред. Искусственные диэлектрики. Диэлектрические смеси.		
15. Моделирование параметров бианизотропных композитов. Модель Максвелла Гарнетта. Смеси с эллипсоидальными включениями.		
16. Приближенные формулы для параметров смесей: введение«кажущейся» (apparent) проницаемости, формула Брюггемана (Bruggeman). Теория протекания (percolation)		
17. Макроскопические модели пространственной дисперсии. Мультипольное разложение.		
18. Электромагнитные свойства среды из проводов (wire medium).		
Часть 2. Метаповерхности	16	16
1. Принцип Гюйгенса. Источник Гюйгенса и его свойства. Эквивалентные поверхностные токи. Физический смысл поверхностного магнитного тока. Принцип управление распределением поля при помощи поверхностных\ токов. Понятие метаповерхности и принцип управления распределением поля при помощи метаповерхностей.		
2. Физическая и функциональная классификация метаповерхностей. Пассивные и активные метаповерхности. Электрический, магнитный и магнито-электрический отклик метаповерхности. Основные функции метаповерхностей.		

3. Метод эквивалентной линии передачи для описания взаимодействия плоской волны с метаповерхностью. Модель Т-образной цепи, физический смысл ее элементов для метаповерхностей с различным типом отклика.		
4. Метаповерхности с электрическим откликом. Основные ограничения и функции. Частотно-селективные метаповерхности, их виды и эквивалентные схемы. Примеры практической реализации частотно-селективных поверхностей в СВЧ и оптическом диапазонах.		
5. Метод разложения поля по модам Флоке в анализе свойств метаповерхности. Решение задачи рассеяния плоской волны на решетке из тонких параллельных проводников методом разложения по модам Флоке. Распространяющиеся и эванесцентные моды Флоке и их свойства. Понятие ближней и дальней зоны периодической структуры. Условие отсутствия интерференционных волн высших порядков.		
6. Вывод усредненного граничного условия для решетки из тонких параллельных проводников с малым по сравнению с длиной волны периодом. Параметр сетки и индуктивный сеточный импеданс решетки из проводов. Эквивалентная цепь решетки из проводов, ее физический смысл. Рассеяние плоской волны решеткой из проводов с малым по сравнению с длиной волны периодом.		
7. Принцип Бабине. Взаимно- и самокомплиментарные частотно-селективные метаповерхности. Связь коэффициентов отражения и прохождения и сеточных импедансов для взаимно-ортогональных поляризаций. Сеточный импеданс емкостной решетки из параллельных щелей в металлическом экране.		
8. Применения частотно-селективных метаповерхностей: сетчатые экраны, частотно-селективные рефлекторы, частные квазиоптические фильтры, преобразователи поляризации, сверхнаправленные антенны.		
9. Метаповерхности с магнитным откликом. Основные ограничения и функции. Разомкнутый петлевой резонатор и его свойства. Паразитный электрический отклик. Магнито-электрическая связь. Бианизотропные метаповерхности и их функции.		
10. Метаповерхности с высоким импедансом. Электрический и магнитный экраны и их воздействие на излучение дипольной антенны. Практические реализации магнитного экрана в виде четвертьволнового заземленного слоя, гофрированной поверхности, а также структуры типа “Bed of nails”.		
11. Структуры типа «грибная полянка», ее эквивалентная цепь электромагнитные свойства и принцип работы. Искусственный магнитный экран и свойство запрещенной зоны для распространяющихся поверхностных волн. Практические реализации метаповерхностей с высоким импедансом. Управляемые метаповерхности с высоким импедансом и их практическая реализация в СВЧ диапазоне.		
12. Применения метаповерхностей с высоким импедансом. Однонаправленные плоские антенны над магнитным экраном. Прямоугольный волновод ТЕМ-волны с магнитными стенками. Развязка антенн при помощи структур с запрещенной зоной. Подавление эффекта многолучевого распространения и дифракции на краях рефлектора.		
13. Отражательные решетки на основе импедансных метаповерхностей. Управление распределением поля отраженной волны при помощи пространственно-неоднородного поверхностного импеданса. Основные подходы к выбору параметров элементарных ячеек отражательных решеток. Голографические и многолучевые отражательные решетки. Влияние дискретности на рабочую полосу частот отражательной решетки.		
14. Применения отражательных решеток на основе импедансных поверхностей: поворот луча, фокусировка, построение фазовой голограммы, преобразование плоской волны в поверхностную волну. Применение бианизотропии в отражательных решетках: функциональное мета-зеркало.		
15. Метаповерхности с электрическим и магнитным откликом. Поляризация элементарных ячеек как элементов Гюйгенса. Сбалансированный электрический и магнитный отклики. Метаповерхность Гюйгенса и ее свойства. Сходства и различия метаповерхностей Гюйгенса и проходных антенных решеток. Основные подходы к практической реализации метаповерхностей Гюйгенса в СВЧ и оптическом диапазонах. Управление распределением поля без отражения.		
16. Принципы работы резонансных тонких поглотителей на основе метаповерхностей. Поглотители Далленбаха, Солсбери и Яуманна. Снижение толщины поглотителя при помощи структуры типа «грибная полянка». Эквивалентность тонкого резонансного поглотителя массиву омега-частиц.		
17. Антенны на основе метаматериалов. Направленная апертура на основе среды из проводов. Металлические замедляющие системы в микрополосоквых антеннах. Линзы Люнеберга на основе искусственного диэлектрика и волновода с сетчатыми стенками. Антенна бегущей волны на основе волновода со щелью, заполненного средой из проводов.		

Рекомендуемые ресурсы

1. Tretyakov S. Analytical modeling in applied electromagnetics. – Artech House, 2003.
2. Osipov A. V., Tretyakov S. A. Modern electromagnetic scattering theory with applications. – John Wiley & Sons, 2017.
3. Simovski C. Composite Media with Weak Spatial Dispersion. – CRC Press, 2018.
4. Glybovski S. B. et al. Metasurfaces: From microwaves to visible //Physics reports. – 2016. – Т. 634. – С. 1-72.

Политика оценивания

Форма контроля	Тип задания	Вес%	Минимальный порог	Сроки выполнения
Промежуточная аттестация (Mid-Term)	Диф. зачет	50	Оценка 3	Конец второго месяца обучения
Аттестация (экзамен/зачет)		50	Оценка 3	Конец семестра
Итого		100		