

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Радиофизический факультет

Кафедра электродинамики

«УТВЕРЖДАЮ»
Декан радиофизического факультета
профессор _____ А.В. Якимов
« ____ » _____ 2006г.

Учебная программа

дисциплины ЕН.Р.02 «Асимптотические методы теории волн»

по специальности 013900 «Фундаментальная радиофизика и
физическая электроника»

Нижний Новгород – 2006 г.

1. Область применения

«Асимптотические методы теории волн» принадлежит к дисциплинам естественно научного раздела федерального компонента подготовки по радиофизической специальности 013900 "Фундаментальная радиофизика и физическая электроника" специалистов, получающих после окончания обучения квалификацию "Физик". Дисциплина «Асимптотические методы теории волн», являющаяся одним из важнейших разделов теоретической физики, преподаётся в 6 семестре. Знание этой дисциплины необходимо для успешной работы в таких областях науки и техники, как распространение волн в неоднородных средах (в частности, в ионосфере и океане), транспортировка коротковолнового электромагнитного излучения в открытых линиях передачи (например, в лазерных системах и приборах нелинейной оптики, голографических устройствах и элементах интегральной оптики, электронных приборах большой мощности), электродинамика открытых (сверхразмерных) резонансных систем, теория дифракции силовых полей на крупномасштабных неоднородностях и коротковолновая диагностика (в частности, диагностика ионосферы, лабораторной плазмы, земной коры и мутных сред).

2. Цели и задачи дисциплины

Содержание дисциплины направлено на усвоение студентами основных физических принципов и закономерностей, а также современных методов исследования распространения и локализации электромагнитных, акустических и других силовых полей в случаях, когда размеры занимаемой полем области существенно превышают длину волны. Практическая работа студентов по изучению дисциплины базируется на знаниях, приобретенных в курсах общей физики, классической электродинамики, математического анализа, дифференциальных уравнений, аналитической геометрии и высшей алгебры, векторного и тензорного анализа.

3. Требования к уровню освоения содержания дисциплины

В результате изучения дисциплины студенты должны овладеть:

- знанием основных физических законов и современных методов исследования распространения и локализации силовых (электромагнитных, акустических и пр.) полей в коротковолновом приближении, когда длина волны существенно меньше неоднородностей среды и размеров занимаемой полем области;
- умением применять эти законы и методы для решения конкретных физи-

ческих задач.

4. Объем дисциплины и виды учебной работы

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры
Общая трудоемкость дисциплины	68	6
Аудиторные занятия	34	34
Лекции	34	34
Самостоятельная работа	34	34
Вид итогового контроля	зачёт	зачёт

5. Содержание дисциплины.

5.1. Разделы дисциплины и виды занятий.

№п/п	Раздел дисциплины	Лекции (часы)	Самостоятельная работа (часы)
1.	Введение.	2	2
Часть 1. Геометрическая оптика (ГО).			
2.	Уравнения геометрической оптики.	2	2
3.	Свойства уравнения эйконала и методы его решения.	2	2
4.	Уравнение переноса и закономерности изменения интенсивности в ГО.	2	3
5.	Изменение поляризации электромагнитного поля вдоль лучей.	1	1
6.	Отражение и преломление лучей на границе раздела сред.	1	1
7.	Геометрическая оптика слоистой-неоднородной среды.	3	3
8.	Матричный метод описания лучей в центрированных линиях передачи силовых полей.	3	3
9.	Цилиндрические линии передачи коротковолновых полей (периодические центрированные системы).	1	1
10.	Матричный метод описания лучей в разъюстированных (нецентрированных) линиях передачи.	1	1

Часть 2. Квазиоптика.			
11.	Элементы теории дифракции скалярных и векторных полей.	3	3
12.	Основные закономерности распространения дифрагированного коротковолнового поля.	2	2
13.	Дифференциальный подход к квазиоптическому описанию распространения коротковолновых полей.	1	1
14.	Спектральный метод описания параксиальных волновых пучков.	1	1
15.	Продольная и поперечные компоненты поля параксиального электромагнитного пучка.	1	1
16.	Обоснование применимости квазиоптического описания распространения параксиальных волновых пучков.	1	1
17.	Аналогия лучевого и волнового описаний полей в приближении параксиальной оптики.	1	1
18.	Распространение параксиальных волновых пучков гауссовой формы в однородном свободном пространстве.	2	2
19.	Волновые пучки в недифрагмированных открытых цилиндрических линиях передачи силовых полей.	1	1
20.	Сопоставление свойств TEM_{mn} -мод и собственных лучей в открытых цилиндрических линиях передачи.	1	1
21.	Обобщения и приложения квазиоптической теории TEM_{mn} -мод открытых линий передачи.	2	2

5.2. Содержание разделов дисциплины.

1. Введение.

Однородные и неоднородные линейные среды. Описание волновых процессов в неоднородных линейных средах. Волновое уравнение и уравнение Гельмгольца. Внутренний и внешний пространственные масштабы решений уравнения Гельмгольца. Области коротковолновой асимптотики. Уравнение

Гельмгольца в задачах распространения электромагнитного поля, звука и упругих волн.

2. Уравнения геометрической оптики.

Приближение ГО для монохроматических полей в неоднородных средах. Переход от уравнения Гельмгольца к уравнениям ГО. Понятие асимптотического разложения. Уравнение эйконала. Уравнение переноса для лучевой амплитуды. Переход от уравнений Максвелла к уравнениям ГО.

3. Свойства уравнения эйконала и методы его решения.

Решение уравнения эйконала с помощью характеристик системы уравнений в характеристической форме. Аналогия эйконала и действия в механике. Волновые фронты и лучи. Лучевой вектор. Физический смысл и свойства эйконала, лучевого вектора и траектории луча. Оптическая длина пути. Принцип Ферма. Аналогия уравнений, определяющих траекторию луча в ГО и описывающих движение материальной точки в классической механике.

4. Уравнение переноса и закономерности изменения интенсивности в ГО.

Интенсивность света и интенсивность волн иной физической природы. Закон сохранения интенсивности в ГО. Лучевые трубки. Изменение интенсивности вдоль лучевых трубок. Кривые волновые фронты и фокусирующиеся поля в лучевых трубках в однородной среде. Каустические поверхности. Изменение интенсивности вдоль луча в неоднородной среде. Использование решений лучевых уравнений для определения изменения интенсивности вдоль лучей. Лемма Соболева и ее применение к лучевым уравнениям.

5. Изменение поляризации электромагнитного поля вдоль лучей.

Уравнение для вектора поляризации поля. Геометрическая интерпретация изменения поляризации поля. Кручение траектории луча и кривизна луча.

6. Отражение и преломление лучей на границе раздела сред.

Принцип локальности и условия его применимости. Закон Снеллиуса и закон отражения для силовых полей в ГО.

7. Геометрическая оптика слоисто-неоднородной среды.

Лучи в сферически-слоистой среде. Плоский характер траектории луча. Закон Бугера. Аналогия уравнений распространения лучей в сферически-слоистой среде и движения материальной точки в центральном поле. Финитные и инфинитные траектории.

Лучи в плоскостройной среде. Распространение радиоволн в неоднородной земной атмосфере. Приведённый показатель преломления. Точки поворота лучей и каустические поверхности. Интенсивность поля и площадь поперечного сечения лучевой трубки в точке поворота луча.

Лучевое уравнение в аксиально-симметричной среде. Траектории лучей в

плоскостях, содержащих ось симметрии и перпендикулярных оси. Лучи в линзоподобных (фокусирующих) средах. Траектории лучей в плоскости, содержащей ось симметрии.

Приближение параксиальности лучей. Параксиальные лучи в аксиально-симметричных средах с медленно меняющимися коэффициентами преломления. Параксиальные лучи в плоскости, проходящей через ось симметрии.

8. Матричный метод описания лучей в центрированных линиях передачи силовых полей.

Математические основы матричного метода описания распространения параксиальных лучей: координаты луча, лучевая матрица для параксиальных лучей. Матрица преобразования координат луча на участке однородного пространства (перемещения лучей). Матрицы преломления лучей на плоской и сферической границах раздела сред. Матрица преобразования координат луча тонкой линзой и сферическим зеркалом.

Свойства матриц преобразования координат луча: норма, обратные матрицы. Матрицы Фурье-преобразования и изменения масштаба. Простейшие матричные тождества как элементы алгебры матричных преобразований. Сопоставление матриц и оптических систем.

9. Цилиндрические линии передачи коротковолновых полей (периодические центрированные системы).

Сопоставление резонаторов и цилиндрических линий передачи. Классификация цилиндрических линий передачи (и резонаторов) по свойствам траекторий распространяющихся лучей. Собственные лучи в периодических центрированных системах. Условия финитной траектории луча в периодической цилиндрической линии передачи. Условие устойчивости движения лучей в периодических центрированных системах.

10. Матричный метод описания лучей в разъюстированных (нецентрированных) линиях передачи.

Линии передачи с элементами, смещенными относительно центральной оси. Оператор смещения координат луча и его свойства. Эквивалентность центрированных и нецентрированных систем. Условие устойчивости движения лучей в разъюстированных периодических системах с нецентрированными элементами.

ЧАСТЬ II. КВАЗИОПТИКА.

11. Элементы теории дифракции скалярных и векторных полей.

Дифракция и рассеяние. Принцип Гюйгенса. Принцип Гюйгенса-Френеля. Принцип Гюйгенса-Кирхгофа. Электродинамический принцип Гюйгенса и его модификации для задач дифракции на плоских объектах. Прибли-

жённые методы решения дифракционных задач: приближение Кирхгофа; метод физической оптики.

12. Основные закономерности распространения дифрагированного коротковолнового поля.

Диаграмма направленности простейшего излучателя коротковолнового диапазона. Параксиальные волновые пучки гауссовой формы. Угол дифракционной расходимости и дифракционная длина. Соотношение между поперечным и продольным пространственными масштабами изменения лучевой амплитуды поля параксиального волнового пучка. Параксиальное приближение теории дифракции скалярного поля на отверстии в плоском экране. Дифракционная формула Френеля.

13. Дифференциальный подход к квазиоптическому описанию распространения коротковолновых полей.

Параболическое уравнение для лучевой амплитуды поля параксиального волнового пучка в однородной среде. Диффузия комплексной лучевой амплитуды поля. Функция Грина и решение параболического уравнения.

14. Спектральный метод описания параксиальных волновых пучков.

Спектральное представление монохроматического поля параксиального волнового пучка в виде суперпозиции плоских волн. Определение комплексной лучевой амплитуды поля пучка в произвольной точке пространства по известному спектру пространственных частот его поля.

15. Продольная и поперечные компоненты поля параксиального электромагнитного пучка.

Зависимость векторной комплексной амплитуды поля от цилиндрических координат. Уравнение для векторной амплитуды поля. Связь продольной и поперечных компонент поля в сечении пучка.

16. Обоснование применимости квазиоптического описания распространения параксиальных волновых пучков.

Сравнительная характеристика свойств параболического уравнения и уравнения Гельмгольца: сопоставление изочастотных поверхностей дисперсионных уравнений; поверхностей равных амплитуд и равных фаз функций Грина. Параксиальность волнового пучка – условие применимости квазиоптического описания.

17. Аналогия лучевого и волнового описаний полей в приближении параксиальной оптики.

Преобразование поля параксиального волнового пучка на участке однородной среды – *преобразование Френеля*. Преобразование поля параксиального волнового пучка *тонкой линзой*. Свойства преобразований Френеля и тонкой

линзой. Операторы обратного преобразования поля параксиального пучка в свободном пространстве и тонкой линзой. Оператор *Фурье-преобразования поля.*

18. Распространение параксиальных волновых пучков гауссовой формы в однородном свободном пространстве.

Основные характеристики структуры поля параксиального пучка гауссовой формы: ширина, интенсивность поля на оси, угловая дифракционная расходимость, кривизна поверхности фазового фронта. Сохранение формы распространяющегося пучка. Преобразование характеристик поля при распространении пучка, имеющего первоначально плоский фазовый фронт. Распространение фокусированного и дефокусированного пучков.

19. Волновые пучки в недифрагмированных открытых цилиндрических линиях передачи силовых полей.

Моды (собственные типы волн) линзовых и иных периодических центрированных линий передачи силовых полей. Уравнение для лучевой амплитуды поля моды открытой недифрагмированной линии передачи. Интегральное уравнение Фредгольма второго рода с симметричным ядром и его решения. Параметр фокусировки пучка. Функции Эрмита.

Поперечные структуры полей мод открытой недифрагмированной цилиндрической линии передачи. Каустические поверхности мод. Условие существования энергетически реализуемых мод. Поляризации полей мод в линиях передачи оптического излучения. Изменение структуры поля моды в пространстве между корректорами фазы. Угловая расходимость поля, излучаемого из открытой линии передачи в свободное пространство, и угловая расходимость излучения, выходящего из двухзеркального резонатора.

20. Сопоставление свойств TEM_{mn} -мод и собственных лучей в открытых цилиндрических линиях передачи.

Основные свойства геометрооптических матриц преобразования координат лучей и квазиоптических операторов преобразования характеристик поля распространяющихся параксиальных волновых пучков. Аддитивность матриц и квазиоптических операторов. Матрицы и квазиоптические операторы обратного действия. Консервативный характер преобразований поля с помощью квазиоптических операторов и матричных преобразований координат лучей. Единство матричных тождеств преобразований координат лучей и операторных тождеств преобразований полей параксиальных волновых пучков. Однозначное соответствие свойств квазиоптического оператора симметричного ядра интегрального уравнения Фредгольма и элементов симметричной матрицы преобразования координат луча на периоде линзовой линии передачи.

Единство условий существования энергетически реализуемых TEM_{mn} -мод и финитных траекторий лучей в открытых цилиндрических линиях передачи как условие устойчивости периодической центрированной системы.

Сопоставление характеристик квазиоптических TEM_{mn} -мод и геометрооптических собственных лучей как сравнение свойств *собственных волн открытых цилиндрических линий передачи* на разных уровнях описания распространения поля в среде.

21. Обобщения и приложения квазиоптической теории TEM_{mn} -мод открытых линий передачи.

Открытая линия передачи из эквидистантно расположенных двухфокусных корректоров фазы. Условие устойчивости системы.

Открытая линия передачи из эквидистантно расположенных двух типов разнофокусных линз или резонатор Фабри-Перо из двух различных сферических зеркал. Условие устойчивости системы. Зависимости размеров пучка главной моды на поверхностях линз от параметров линии передачи.

Открытый резонатор Фабри-Перо из двух плоских зеркал с размещённой внутри него линзой или открытая линия передачи в виде двойной периодической последовательности одинаковых линз. Условие устойчивости системы в зависимости от параметров резонатора.

Открытые линии передачи с потерями. Затухание TEM_{mn} -мод.

Диафрагмированные открытые линии передачи. Структуры полей. Постоянные затухания TEM_{mn} -мод.

Моды открытых резонаторов – собственные TEM_{mnq} -типы колебаний. Основные характеристики TEM_{mnq} - мод (собственные частоты, коэффициенты затухания, добротности, пространственная структура поля) и их свойства. Вырождение мод по частоте.

6. Лабораторный практикум.

Не предусмотрен.

7. Учебно-методическое обеспечение дисциплины.

7.1. Рекомендуемая литература.

а) основная литература:

1. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П., *Теория волн*. М.: Наука, 1990, 432 с.
2. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики*. М.: Наука, 1973, 719 с.
3. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. *Геометрическая оптика неоднородных сред*. М.: Наука, 1980, 304 с.
4. Вайнштейн Л.А. *Электромагнитные волны*. М.: Радио и связь, 1988, 440 с.
5. Ананьев Ю.А. *Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения*, М.: Наука, 1979, 328 с.
6. Власов С.Н., Таланов В.И. *Самофокусировка волн*. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1997, 220 с.
7. Бабич В.М., Булдырев В.С. *Асимптотические методы в задачах дифракции*

коротких волн. М.: Наука, 1972, 456 с.

8. Ваганов Р.Б., Каценеленбаум Б.З. *Основы теории дифракции.* М.: Наука, 1982, 272 с.
9. Маркузе Д. *Оптические волноводы.* М.: Мир, 1974, 576 с.
10. Джеррард А., Бёрч Дж.М. *Введение в матричную оптику.* М.: Мир, 1978, 341 с.

б) дополнительная литература:

1. Власов С.Н., Таланов В.И. *Метод параболического уравнения в теории распространения волн.* Изв. вузов. Радиофизика, 1995, в. 6.
2. Таланов В.И. *Учебная программа и лекции курса «Асимптотические методы в электродинамике и их приложения», прочитанные в цикле специальных дисциплин для студентов кафедры электродинамики (для направления подготовки 511500 – Радиофизика и для специальности 071500 - Радиофизика и электроники) в 1970 – 2002 годах.*

8. Вопросы для контроля.

Написать необходимые выражения и объяснить содержание следующих **понятий**:

1. **Волновое** уравнение и уравнение **Гельмгольца** в неоднородных линейных средах.
2. Внутренний и внешний пространственные масштабы решений уравнения Гельмгольца (приближение **геометрической оптики**).
4. Волновые фронты и **лучи** (физический смысл эйконала и свойства лучевого вектора).
4. **Уравнение эйконала.**
5. Физический смысл и свойства траектории луча. **Принцип Ферма.**
6. **Уравнение переноса** для лучевой амплитуды.
7. Дифференциальные уравнения второго порядка для лучей.
8. Изменение интенсивности вдоль **лучевых трубок.**
9. Закон сохранения интенсивности в **геометрической оптике (ГО).**
10. Фокусирующиеся поля в лучевых трубках и **каустические поверхности** в однородной среде.
11. Изменение поляризации электромагнитного поля вдоль луча: **кривизна луча и кручение луча.**
12. Законы отражения и преломления волн на границе раздела сред в **ГО.**
13. Лучи в сферически-слоистой среде: **закон Бугера.**
14. Лучи в плоскостой среде: точки поворота лучей и **каустические поверхности.**
15. Траектории лучей в аксиально-симметричной среде в плоскостях, перпендикулярных и содержащих ось симметрии.
16. Траектории лучей в линзоподобных (фокусирующих) средах в плоскости, проходящей через ось симметрии.
17. **Приближение параксиальности и параксиальные лучи** в аксиально-

симметричных средах.

18. Математические основы *матричного метода описания* распространения параксиальных лучей.

19. Матрицы *перемещения* и *преломления лучей* на плоской и сферической границах раздела сред.

20. Матрица преобразования координат луча тонкой линзой (сферическим зеркалом).

21. Свойства матриц преобразования координат луча: норма, обратные матрицы.

22. Условие *устойчивости движения лучей* в периодических центрированных системах.

23. *Собственные лучи* в периодических центрированных системах.

24. *Принципы Гюйгенса* и *Гюйгенса-Френеля* в задачах *дифракции* волн.

25. *Принцип Гюйгенса-Кирхгофа* в задачах *дифракции* волн.

26. *Электродинамический принцип Гюйгенса* в задачах дифракции электромагнитных волн на плоских объектах.

27. Приближённые методы решения дифракционных задач: *приближение Кирхгофа* и *метод физической оптики*.

28. *Угол дифракционной расходимости* и *дифракционная длина параксиального волнового пучка гауссовой формы*.

29. *Параксиальное приближение* теории дифракции скалярного поля на отверстии в плоском экране и *дифракционная формула Френеля*.

30. *Параболическое уравнение* для лучевой амплитуды поля параксиального волнового пучка в однородной среде.

31. Решение параболического уравнения для комплексной лучевой *амплитуды* поля параксиального волнового пучка в однородной среде (функция Грина и диффузия *амплитуды*).

32. *Спектральный метод* описания распространения *параксиальных волновых пучков*.

33. Связь продольной и поперечными компонентами комплексной лучевой амплитуды векторного поля параксиального электромагнитного пучка.

34. *Квазиоптические операторы преобразования поля* параксиального пучка *в свободном пространстве* и *тонкой линзой*.

35. Моды линзовых линий передачи силовых полей: *параметр фокусировки пучка* и *функции Эрмита*.

36. *Условие существования* энергетически реализуемых мод в недифрагмированных открытых цилиндрических линиях передачи силовых полей.

37. Угловая расходимость поля, излучаемого из открытой линии передачи (или из резонатора) в свободное пространство.

38. Основные характеристики TE_{mnq} -мод открытых резонаторов (собственные частоты, коэффициенты затухания, добротности, пространственная структура поля).

9. Средства обеспечения освоения дисциплины.

Не предусмотрены.

10. Материально-техническое обеспечение дисциплины.

Не предусмотрено.

Программа составлена в соответствии с Государственным образовательным стандартом по специальности 013900 «Фундаментальная радиофизика и физическая электроника».

Автор программы доцент _____ Миловский Н.Д.

Программа рассмотрена на заседании кафедры _____ протокол № _____

Заведующий кафедрой профессор _____ Гильденбург В.Б.

Программа одобрена методической комиссией факультета _____ протокол № _____

Председатель методической комиссии профессор _____ Мануилов В.Н.