

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ
протокол от "27" апреля 2022 г. №6

Рабочая программа дисциплины
«Волны в случайных средах»

Уровень высшего образования
Подготовка научных и научно-педагогических кадров

Научные специальности

1.1.2. Дифференциальные уравнения и математическая физика, 1.1.4. Теория вероятностей и математическая статистика, 1.1.5. Математическая логика, алгебра, теория чисел и дискретная математика, 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела, 1.2.1. Искусственный интеллект и машинное обучение, 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, 1.3.11. Физика полупроводников, 1.3.19. Лазерная физика, 1.3.4. Радиофизика, 1.3.7. Акустика, 1.3.8. Физика конденсированного состояния, 1.4.1. Неорганическая химия, 1.4.2. Аналитическая химия, 1.4.3. Органическая химия, 1.4.4. Физическая химия, 1.4.7. Высокомолекулярные соединения, 1.4.8. Химия элементоорганических соединений, 1.5.11. Микробиология, 1.5.15. Экология, 1.5.2. Биофизика, 1.5.21. Физиология и биохимия растений, 1.5.5. Физиология человека и животных, 2.2.2. Электронная компонентная база микро и наноэлектроники, квантовых устройств, 3.2.7. Аллергология и иммунология, 5.1.1. Теоретико-исторические правовые науки, 5.1.2. Публично-правовые (государственно-правовые) науки, 5.1.3. Частно-правовые (цивилистические) науки, 5.1.4. Уголовно-правовые науки, 5.1.5. Международно-правовые науки, 5.12.1. Междисциплинарные исследования когнитивных процессов, 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика, 5.2.4. Финансы, 5.2.6. Менеджмент, 5.3.7. Возрастная психология, 5.4.2. Экономическая социология, 5.4.4. Социальная структура, социальные институты и процессы, 5.4.6. Социология культуры, 5.4.7. Социология управления, 5.5.2. Политические институты, процессы, технологии, 5.5.4. Международные отношения, глобальные и региональные исследования, 5.6.1. Отечественная история, 5.6.2. Всеобщая история, 5.6.7. История международных отношений и внешней политики, 5.7.1. Онтология и теория познания, 5.8.2. Теория и методика обучения и воспитания, 5.8.7. Методология и технология профессионального образования, 5.9.2. Литературы народов мира, 5.9.5. Русский язык. Языки народов России, 5.9.6. Языки народов зарубежных стран (с указанием конкретного языка или группы языков), 5.9.9. Медиакоммуникации и журналистика

Нижний Новгород
2022 год

1. Место и цель дисциплины в структуре ПА

Дисциплина «Волны в случайных средах» относится к числу *факультативных* дисциплин образовательного компонента программы аспирантуры и изучается на 3-м году обучения в 5-м семестре.

Цель дисциплины – ознакомление аспирантов с волновыми процессами в случайно-неоднородных средах различной природы, а также с методами описания волновых полей в таких средах. Основной задачей лекционного курса является демонстрация возможностей каждого из методов для получения статистических характеристик полей.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Выпускник, освоивший программу, должен

Знать:

- современное состояние теории распространения волн в случайно-неоднородных средах;
- классические и современные методы исследования и анализа свойств волн, распространяющихся в различных случайных средах;
- современные подходы к описанию и моделированию различных явлений для волн, распространяющихся в случайных средах, и оценке полученных результатов.

Уметь:

- выбирать и применять аналитические, аналитико-численные, экспериментальные методы исследования в соответствии с типом поставленной задачи;
- оценивать границы применимости полученных результатов.

Владеть:

- различными аналитическими методами получения статистических характеристик волновых полей в случайных средах;
- навыками моделирования (в т.ч. компьютерного) различных явлений в области теории распространения волн в случайных средах и оценки полученных результатов.

3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., всего - 72 часа, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (32 часа занятия лекционного типа и 4 часа занятия семинарского типа), 36 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Таблица 1

Структура дисциплины

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе					
		Контактная работа, часов					Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Консультации	Всего	
1. Обзор типов задач, решаемых	4	2	-	-	-	2	2

теорией распространения волн в случайных средах							
2. Основные понятия теории случайных полей	4	2	-	-	-	2	2
3. Микроструктура турбулентности атмосферы	4	2	-	-	-	2	2
4. Обзор классических методов анализа распространения волн в случайно-неоднородных средах	18	5	4	-	-	9	9
5. Понятие о марковском приближении. Уравнения для статистических моментов поля	4	2	-	-	-	2	2
6. Методы численного моделирования распространения волн в случайно-неоднородных средах	6	4	-	-	-	2	2
7. Методы анализа свойств когерентного излучения в турбулентной атмосфере	6	3	-	-	-	3	3
8. Экспериментальные методы получения параметров турбулентной атмосферы	4	2	-	-	-	2	2
9. Современные модификации классических методов анализа волновых полей в случайно-неоднородных средах	10	4	-	-	-	4	6
10. Методы анализа свойств волн в статистически анизотропных случайных средах	6	3	-	-	-	3	3
11. Дифракция случайных волн на простейших структурах. Теорема Ван-Циттерта-Цернике	6	3	-	-	-	3	3
Промежуточная аттестация: зачет							
Итого	72	32	4	-	-	36	36

Таблица 2

Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятия	Форма текущего контроля*
1	Обзор типов задач, решаемых теорией распространения волн в случайных средах	Постановка задач анализа свойств волновых полей, распространяющихся в случайно-неоднородных средах. Постановка задач дифракции случайных волновых полей.	Лекция	-
2	Основные понятия теории случайных полей	Процессы со стационарными приращениями. Локально однородные случайные поля. Математический аппарат теории волновых полей.	Лекция	-
3	Микроструктура турбулентности атмосферы	Параметры, характеризующие свойства турбулентности. Модель Колмогорова-Обухова. Способы учета отклонений от модели.	Лекция	-
4	Обзор классических методов анализа распространения волн в случайно-неоднородных средах	Вывод уравнения для волнового поля в случайной среде. Метод малых возмущений. Метод плавных возмущений. Переход к	Лекция Семинар	-

		параболическому уравнению.		
5	Понятие о марковском приближении. Уравнения для статистических моментов поля	Понятие марковского приближения. Вывод уравнений для среднего поля и функции взаимной когерентности. Вывод уравнений для высших статистических моментов волнового поля.	Лекция	-
6	Методы численного моделирования распространения волн в случайно-неоднородных средах	Понятие фазового экрана. Построение аналитических и численных моделей фазового экрана, отвечающих свойствам реальной среды.	Лекция	-
7	Методы анализа свойств когерентного излучения в турбулентной атмосфере	Параметры, характеризующие свойства волновых пучков при распространении в атмосфере. Аналитические соотношения и некоторые экспериментальные результаты.	Лекция	-
8	Экспериментальные методы получения параметров турбулентной атмосферы	Оптические методы измерения структурной характеристики показателя преломления в турбулентной атмосфере. Схема эксперимента и методика обработки получаемых данных. Влияние приемной аппаратуры.	Лекция	-
9	Современные модификации классических методов анализа волновых полей в случайно-неоднородных средах	Метод геометрической оптики: классический подход и современные модификации. Установление аналогий между задачами о распространении волн в случайных средах и о движении частиц в случайных гидродинамических потоках. Лагранжево и эйлерово описание. Метод «теплых» лучей.	Лекция	-
10	Методы анализа свойств волн в статистически анизотропных случайных средах	Вывод уравнений для среднего поля и функции когерентности в статистически анизотропной случайной среде. Анализ ракурсной чувствительности.	Лекция	-
11	Дифракция случайных волн на простейших структурах. Теорема Ван-Циттерта-Цернике	Прохождение случайной волны через отверстие в экране. Теорема Ван-Циттерта-Цернике	Лекция	-

4. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

Виды самостоятельной работы обучающихся: изучение рекомендованной литературы (в т.ч. журнальных статей), подготовка обзоров к семинару, решение задач.

5. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине

5.1. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине

При выполнении всех работ учитываются следующие **основные критерии**:

– уровень теоретических знаний (подразумевается не только формальное воспроизведение информации, но и понимание предмета, которое подтверждается правильными ответами на дополнительные, уточняющие вопросы);

- умение использовать теоретические знания при анализе конкретных проблем, ситуаций;
- качество изложения материала, то есть обоснованность, четкость, логичность ответа, а также его полнота (то есть содержательность, не исключающая сжатости);
- способность устанавливать внутри- и межпредметные связи,
- оригинальность мышления, знакомство с дополнительной литературой и другие факторы.

Описание шкалы оценивания на промежуточной аттестации в форме зачета

Оценка	Уровень подготовленности, характеризуемый оценкой
<i>Зачтено</i>	владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить проблемные ситуации в организации научных исследований, способность критически анализировать и сравнивать существующие подходы и методы к оценке результативности научной деятельности, свободное владение источниками, умение четко и ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.
<i>Не зачтено</i>	непонимание смысла ключевых проблем, недостаточное владение науковедческой терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации, неспособность анализировать и сравнивать существующие концепции, подходы и методы, неумение ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.

5.2. Примеры типовых контрольных заданий или иных материалов, используемых для оценивания результатов обучения по дисциплине

1. Основные типы задач теории распространения излучения в случайно-неоднородных средах. Математическая постановка типичных задач и их практическое применение.
2. Основные понятия теории случайных процессов и случайных полей. Стационарные процессы и однородные поля. Процессы со стационарными приращениями. Корреляционная и структурная функция.
3. Статистическое описание оптических неоднородностей турбулентной атмосферы. Микроструктура турбулентности атмосферы. Экспериментальные данные и гипотезы Колмогорова. Оптические характеристики турбулентной атмосферы.
4. Классические методы теории распространения оптических волн в случайно-неоднородных средах.
 - 4.1. Уравнение распространения волн в случайно-неоднородных средах.
 - 4.2. Метод малых возмущений (Борновское приближение). Вычисление средней интенсивности рассеянного поля. Пределы применимости метода.
 - 4.3. Метод плавных возмущений (метод Рытова). Флуктуации уровня и фазы плоской волны (вычисление в рамках метода плавных возмущений). Пределы применимости метода.
 - 4.4. Параболическое уравнение. Пределы применимости метода.
 - 4.5. Приближение фазового экрана. Метод фазовых экранов. Построение численной модели фазового экрана. Пределы применимости метода.

- 4.6. Приближение марковского случайного процесса. Уравнения для статистических моментов поля. Вывод уравнения для среднего поля волны. Функция взаимной когерентности. Анализ некоторых особенностей распространения лазерного пучка в турбулентной атмосфере с помощью функции взаимной когерентности. Оптические методы измерения параметров турбулентной атмосферы.
5. Современные методы анализа волновых полей. Метод геометрической оптики: классический подход и современные модификации. Флуктуации плотности гидродинамического потока частиц. Корреляционные свойства флуктуаций интенсивности. Дифракционное сглаживание каустических особенностей волнового поля.
6. Распространение волн в статистически анизотропной случайной среде. Уравнение для среднего поля волны.
7. Дифракция случайных полей в простейших оптических системах. Случай малого (по сравнению с характерным размером неоднородностей) и большого отверстия. Теорема Ван-Циттерта – Цернике.

Примерный перечень типовых задач для подготовки к зачету:

1. Для среды с гауссовой функцией корреляции флуктуаций диэлектрической проницаемости оценить предельно допустимое значение длины трассы L , при котором еще справедлив метод малых возмущений. Длина волны излучения $\lambda = 630$ нм, характерный масштаб неоднородностей принять равным внутреннему масштабу атмосферной турбулентности на высоте трассы над землей $h = 2$ м, $\langle \varepsilon_1^2 \rangle = 10^{-5}$.
2. Проверить условия применимости параболического уравнения в атмосфере Земли. Длина волны излучения $\lambda = 630$ нм, высота трассы над землей $h = 2$ м, длина трассы $L = 2.5$ км.
3. Полностью когерентный коллимированный пучок He-Ne лазера ($\lambda = 630$ нм, диаметр выходной апертуры коллиматора 50 мм) распространяется вдоль однородной трассы в турбулентной атмосфере на высоте 20 м. Оценить радиус пространственной когерентности на расстоянии 200 м от выходной апертуры.
4. Плоский слой среды моделируется системой эквидистантных одинаковых фазовых экранов. Фаза на экране меняется по закону $\Psi(y) = \Psi_0 \exp(-y^2/l^2)$, число узлов сетки разбиения экрана N . 1) Найти шаг разбиения Δy , необходимый для выполнения теоремы отсчетов. 2) Пусть на слой падает монохроматическая волна (λ известно). Найти расстояние между экранами Δx , при котором каждый следующий экран находится в зоне геометрической оптики характерных неоднородностей предыдущего экрана. 3) Какова при этом наибольшая допустимая толщина слоя?
5. Плоский слой среды моделируется системой эквидистантных одинаковых фазовых экранов. Фаза на экране меняется по закону $\Psi(y) = \Psi_0 \sin(\kappa y)$, где $\kappa = 2\pi/l$, число узлов сетки разбиения экрана N . 1) Найти шаг разбиения Δy , необходимый для выполнения теоремы отсчетов. 2) Пусть на слой падает монохроматическая волна (λ известно). Найти расстояние между экранами Δx , при котором каждый следующий экран находится в зоне геометрической оптики характерных неоднородностей предыдущего экрана. 3) Какова при этом наибольшая допустимая толщина слоя?
6. Найти оптимальный радиус коллимированного гауссова пучка, если $\lambda = 630$ нм, длина трассы $L = 100$ м. Чему при этом равен радиус пространственной когерентности, если

распространение происходит в турбулентной атмосфере вдоль однородной трассы на высоте 10 м над землей?

7. Найти эффективный радиус коллимированного полностью когерентного (на выходной апертуре) гауссова пучка в турбулентной атмосфере, если $\lambda = 630$ нм, диаметр выходной апертуры коллиматора 50 мм, высота трассы над землей 10 м, длина трассы 100 м.

8. Для среды с гауссовой функцией корреляции флуктуаций диэлектрической проницаемости оценить предельно допустимое значение длины трассы L , при котором еще справедлив метод малых возмущений. Источник излучения – He-Ne лазер, характерный масштаб неоднородностей принять равным внутреннему масштабу атмосферной турбулентности на высоте трассы над землей $h = 10$ км, $\langle \varepsilon_1^2 \rangle = 10^{-5}$.

9. Гауссов монохроматический пучок проходит слой турбулентной атмосферы, а затем фокусируется приемной линзой в плоскость наблюдения. Вывести формулу для расстояния за линзой, на котором средний размер освещенного пятна будет минимальным. При каком условии это расстояние совпадет с фокусным расстоянием приемной линзы? Фокусное расстояние приемной линзы, а также все необходимые параметры пучка считать известными.

10. Оценить в рамках метода плавных возмущений минимальное и максимальное значения среднего квадрата флуктуаций фазы волны. Для флуктуаций диэлектрической проницаемости принять гауссову модель корреляционной функции с дисперсией, характерной для турбулентной атмосферы. Источник излучения – He-Ne лазер, высота трассы над землей 10 м, длина трассы 100 м.

11. Оценить в рамках метода плавных возмущений минимальное и максимальное значения среднего квадрата флуктуаций уровня волны. Для флуктуаций диэлектрической проницаемости принять гауссову модель корреляционной функции с дисперсией, характерной для турбулентной атмосферы. Источник излучения – He-Ne лазер, высота трассы над землей 10 м, длина трассы 100 м.

12. Оценить отношение средней интенсивности в центре гауссова пучка в турбулентной атмосфере к интенсивности в центре этого пучка на выходной апертуре. Источник излучения – He-Ne лазер, пучок коллимированный, полностью когерентный, диаметр выходной апертуры коллиматора 50 мм. Высота трассы над землей 10 м, длина трассы 100 м.

13. Найти отношение средней интенсивности в центре гауссова пучка в плоскости минимального изображения приемной линзы к интенсивности в центре этого пучка на выходной апертуре. Источник излучения – He-Ne лазер, фокусное расстояние приемной линзы 50 см, диаметр приемной линзы 50 мм. Высота трассы над землей 10 м, длина трассы 500 м. Считать волну, падающую на линзу, плоской.

14. Найти отношение средней интенсивности в центре гауссова пучка в плоскости минимального изображения приемной линзы к интенсивности в центре этого пучка на выходной апертуре. Источник излучения – He-Ne лазер, фокусное расстояние приемной линзы 50 см, диаметр приемной линзы 50 мм. Высота трассы над землей 10 м, длина трассы 200 м. Считать волну, падающую на линзу, сферической.

15. Некогерентный пучок света ($\lambda = 500$ нм) формируется коллиматором, выходная щель которого имеет характерный размер 1 мм. Пренебрегая дифракцией на щели, оценить расстояние, на котором свет можно будет считать когерентным.

16. При определении структурной постоянной показателя преломления атмосферы когерентным методом использована приемная линза диаметром 10 см. При длине трассы 10 м отношение интенсивности в центре освещенного пятна в фокальной плоскости к

интенсивности в максимуме идеальной картины равно 0,2. Найти по этим данным C_n^2 . На каком расстоянии от центра освещенного пятна интенсивность убывает в e раз, если фокусное расстояние линзы 150 см?

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) Основная литература

1. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Часть II. М. Наука, 1978, 463 стр.
2. Кляцкин, В.И. Стохастические уравнения: теория и ее приложения к акустике, гидродинамике и радиофизике. В 2 т. Т.2. Когерентные явления в стохастических динамических системах [Электронный ресурс] : монография — Электрон. дан. — Москва : Физматлит, 2008. — 344 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/59473>. — Загл. с экрана.
3. Грибова Е.З. Волны в случайно-неоднородных средах. [Электронный ресурс] : учебное пособие. — Н. Новгород: ННГУ, 2019. — Режим доступа: <http://www.lib.unn.ru/students/other.html> — Загл. с экрана.

б) дополнительная литература:

1. Кляцкин В.И., Динамика стохастических систем: Курс лекций [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Москва : Физматлит, 2003. — 240 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/59302>. — Загл. с экрана.
2. Грибова Е. З., Саичев А. И. Физический подход к анализу диффузии частиц: монография. — Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2012. — 232 с.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

Электронно-библиотечные системы (электронная библиотека):

<http://e.lanbook.com/>; <http://www.biblioclub.ru>.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для хранения и профилактического обслуживания оборудования и помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети Интернет и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ;
- материально-техническое обеспечение, необходимое для реализации дисциплины, включая лабораторное оборудование;
- лицензионное программное обеспечение: *Windows, Microsoft Office*;
- обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.

Рабочая программа учебной дисциплины составлена в соответствии с учебным планом, Положением о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Постановление Правительства РФ от 30.11.2021 № 2122), Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки

научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Приказ Минобрнауки РФ от 20.10.2021 № 951).

Авторы _____ Е.З. Грибова

Рецензент _____ В.Г. Гавриленко

Заведующий кафедрой _____ М.И. Бакунов

Программа одобрена на заседании Методической комиссии радиофизического факультета от «20» января 2022 года, протокол № 01/22.