

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
Российской академии наук» (ИПФ РАН)

УТВЕРЖДАЮ:

Зам. директора по научной работе

_____ М.Ю. Глявин

« _____ » _____ 20__ г.

Рабочая программа дисциплины

Волны в случайно-неоднородных средах

Уровень высшего образования

Подготовка кадров высшей квалификации

Направление подготовки / специальность

03.06.01 Физика и астрономия

Направленность образовательной программы

01.04.06 Акустика

Квалификация (степень)

Исследователь. Преподаватель-исследователь.

Форма обучения

очная

Нижний Новгород

20__

1. Место и цели дисциплины в структуре образовательной программы (ОП)

Дисциплина «Волны в случайно-неоднородных средах» относится к числу профильных дисциплин вариативной части образовательной программы, является дисциплиной по выбору аспиранта, преподается на втором году обучения в четвертом семестре.

Целями освоения дисциплины являются:

- формирование у современных представлений о методах статистического описания случайных волновых полей (СВП) и методах расчета статистических характеристик случайных волновых полей для решения ряда прикладных задач, в частности, задач теории локации и видения объектов в случайно-неоднородных средах, дистанционной диагностики самих рассеивающих сред с помощью радиоволн, лазерного излучения или звука;
- формирование у аспирантов профессиональных компетенций в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» и направленностью подготовки 01.04.06 «Акустика».

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Таблица 1:

Планируемые результаты обучения по дисциплине

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций
ПК-2 <i>способность проводить научные исследования и решать научно-исследовательские задачи, соответствующие направленности подготовки, используя специализированные знания в области физики и астрономии, современные методы исследований и информационные технологии, с учетом отечественного и зарубежного опыта</i> (этап освоения – базовый)	З1 (ПК-2) Знать основы теории когерентности и ее взаимосвязь с теорией переноса излучения У1 (ПК-2) Уметь использовать полученные знания для решения конкретных задач теории распространения волн в случайно-неоднородных средах и их рассеяния на случайных объектах; а также при проведении научных исследований в соответствующей области с учетом отечественного и зарубежного опыта В1 (ПК-2) Владеть навыками решения задач, основанными на знаниях, полученных в ходе освоения дисциплины
ПК-3 <i>способность свободно ориентироваться в разделах физики, необходимых для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности (в соответствии с направленностью подготовки)</i> (этап освоения – базовый)	З1 (ПК-3) Знать закономерности рассеяния волн на неоднородностях показателя преломления среды и ансамбле частиц. У1 (ПК-3) Уметь использовать полученные знания для решения конкретных задач теории рассеяния волн в случайно-неоднородных средах на случайных объектах; уметь применять полученные знания для решения научно-инновационных задач. В1 (ПК-3) Владеть статистическими методами описания случайных волновых полей и использовать их при необходимости при проведении научных исследований в инновационной деятельности

3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 3 зачетные единицы, всего 108 часов, из которых 38 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (36 часов занятия лекционного типа, в т.ч. мероприятия текущего контроля успеваемости, 2 часа мероприятия промежуточной аттестации), 70 составляет самостоятельная работа обучающегося.

Структура дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		из них			
Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Всего			
<u>Тема 1.</u> Функциональный метод описания случайных полей	22	8		8	14
<u>Тема 2.</u> Однократное рассеяние волн на флуктуациях показателя преломления среды и частицах вещества	22	8		8	14
<u>Тема 3.</u> Феноменологическая теория переноса излучения	22	8		8	14
<u>Тема 4.</u> Марковское приближение теории рассеяния волн в случайно неоднородной среде	20	6		6	14
<u>Тема 5.</u> Элементы общей теории многократного рассеяния волн	20	6		6	14
в т.ч. текущий контроль			4		
Промежуточная аттестация – зачет	2			2	
Итого		108			

Содержание разделов дисциплины

Функциональный метод описания случайных полей.

Корреляционные функции случайных полей и их спектральные разложения (определения). Функциональный метод описания случайных полей. Определение функционала. Понятие вариационной производной. Правила функционального дифференцирования. Характеристический функционал. Расщепление корреляций. Формула Фуруцу-Новикова для гауссовых случайных полей. Принцип динамической причинности. Примеры применения формулы размыкания.

Однократное рассеяние волн на флуктуациях показателя преломления среды и частицах вещества.

Дифференциальное сечение рассеяния элементарного объема сплошной среды в борновском приближении, его связь с пространственным спектром флуктуаций диэлектрической проницаемости. Избирательный механизм рассеяния. Анализ функции когерентности однократно рассеянного поля. Особенности рассеяния электромагнитных волн. Границы применимости борновского приближения.

Сечение рассеяния (СР) и сечение поглощения (СП) частицы вещества (определения). Амплитуда и Т-оператор рассеяния отдельной частицы. Аналитические свойства амплитуды рассеяния: оптическая теорема и теорема взаимности. Приближенные методы расчета амплитуды рассеяния одиночной частицы в рэлеевском, борновском и эйкональном приближениях. Оптические характеристики элементарного объема дисперсной среды – показатели рассеяния, поглощения, ослабления и индикатриса рассеяния (определения), их связь с СР и СП частиц вещества. Когерентные явления при

рассеянии волны на совокупности случайно распределенных частиц вещества. Эффективный комплексный показатель преломления дисперсной среды.

Феноменологическая теория переноса излучения.

Основные фотометрические понятия. Интегродифференциальное уравнение переноса излучения (УПИ) для лучевой интенсивности. Граничные условия. Общие свойства уравнения переноса. Вероятностная интерпретация УПИ. Интегральная форма УПИ. Когерентная и диффузная лучевая интенсивности. Коэффициенты яркости и альбедо среды. Вывод уравнения переноса для свободного излучения. Закон сохранения яркости в свободном пространстве. Функция когерентности поля плоских источников. Теорема Ван-Циттерта – Цернике. Аналитические методы решения УПИ: модифицированное борновское, малоугловое и диффузионное приближения.

Марковское приближение теории рассеяния волн в случайно неоднородной среде.

Параболическое уравнение в среде с крупномасштабными неоднородностями. Модель флуктуаций показателя преломления. Уравнение для среднего поля и его общее решение. Уравнение для функции когерентности поля и его связь с уравнением переноса излучения в малоугловом приближении. Границы применимости марковского приближения.

Элементы общей теории многократного рассеяния волн.

Теория возмущений и диаграммная техника. Уравнения Дайсона для среднего поля и Бете–Солпитера для функции когерентности в сплошной рассеивающей среде. Многократное рассеяние волн на облаке случайных рассеивателей. Система уравнений многократного рассеяния волн на дискретных неоднородностях. Кофигурационное усреднение для дискретных рассеивателей. Уравнение Фолди–Тверского для когерентного поля и уравнение Тверского для функции когерентности.

4. Образовательные технологии

Основными видами образовательных технологий дисциплины «Волны в случайно-неоднородных средах» являются занятия лекционного типа с применением технологий интерактивного обучения (презентаций), проблемный метод изложения материала, диалоговая форма проведения занятий и самостоятельная работа аспиранта.

5. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

Используются следующие виды самостоятельной работы аспиранта: в читальном зале библиотеки ИПФ РАН, в компьютерном классе с доступом к ресурсам Интернет и в домашних условиях. Порядок выполнения самостоятельной работы соответствует программе курса и контролируется в ходе аудиторных занятий по данной дисциплине. Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, доступные ресурсы в Интернет по тематике курса, а также конспекты и презентации лекций.

6. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), и уровня их сформированности

Описание показателей и критериев оценивания компетенций приведены в приложении 1.

6.2. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине. Описание шкал оценивания

Для оценивания сформированности компетенций используется промежуточная аттестация в форме зачета. Зачет состоит из индивидуального собеседования и решения практических контрольных заданий. Критерии оценок выполнения задания:

Зачтено	В целом удовлетворительная подготовка, возможно с заметными, но не грубыми ошибками или недочетами. Аспирант дает полный ответ на все теоретические вопросы собеседования,
---------	--

	возможно с небольшими неточностями; допускаются негрубые ошибки при ответах на дополнительные вопросы. Полученные ответы отличаются логической последовательностью, достаточной четкостью в выражении мыслей, возможно с не всегда полной обоснованностью выводов.
Не зачтено	Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Аспирант дает ошибочные ответы как на теоретические вопросы, так и на наводящие и дополнительные вопросы преподавателя, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять на практике приобретенные навыки.

6.3. Контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих сформированность компетенций.

Вопросы и задания для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

Для оценки сформированности профессиональных компетенций ПК-2, ПК-3:

- 1 Характеристический функционал. Формула Фуруцу–Новикова для гауссовых случайных полей. Принцип динамической причинности.
- 2 Однократное рассеяние волн на флуктуациях диэлектрической проницаемости среды. Дифференциальное сечение рассеяния. Функция когерентности однократно рассеянного поля. Границы применимости борновского приближения.
- 3 Сечение рассеяния и сечение поглощения одиночной частицы; их связь с амплитудой рассеяния. Оптическая теорема.
- 4 Интегральное представление амплитуды рассеяния (АР) одиночной частицы. Связь АР с Т-оператором рассеяния. Расчет АР в рэлеевском; борновском и эйкональном приближениях.
- 5 Среднее поле и средняя интенсивность в среде с дискретными рассеивателями в борновском приближении. Дифференциальное сечение рассеяния единицы объема дисперсной среды. Когерентные явления при рассеянии. Эффективная комплексная диэлектрическая проницаемость дискретной среды.
- 6 Вывод уравнения переноса для свободного излучения. Функция когерентности и ее связь с лучевой интенсивностью. Закон сохранения яркости в свободном пространстве.
- 7 Расчет функции когерентности поля в свободном полупространстве на основе закона сохранения яркости. Обобщенная яркость плоских источников. Теорема Ван-Циттерта-Цернике.
- 8 Дифференциальное уравнение переноса излучения (УПИ) для лучевой интенсивности и его основные свойства. Вероятностная интерпретация УПИ.
- 9 Уравнение переноса излучения в плоско-слоистой среде. Граничные условия. Интегральная форма УПИ. Коэффициенты яркости и альбедо среды.
- 10 Малоугловое уравнение переноса излучения и границы его применимости. Уточненное малоугловое приближение, учитывающее эффекты искажения сигналов при их прохождении через рассеивающую среду.
- 11 Диффузионное приближение теории переноса излучения.
- 12 Уравнение для среднего поля в приближении марковского случайного процесса и его общее решение.
- 13 Уравнение для функция когерентности поля в приближении марковского случайного процесса и его связь с уравнением переноса излучения в малоугловом приближении.
- 14 Уравнения Дайсона и Бете-Солпитера.
- 15 Система уравнений многократного рассеяния волн на ансамбле частиц. Вывод уравнения Фолди–Тверского для когерентного поля в дисперсной среде. Эффективное волновое число

Типовые задачи для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

Для оценки сформированности профессиональных компетенций ПК-2, ПК-3:

Задача 1

Рассчитать продольную функцию когерентности однократно рассеянного поля $\Gamma(x, \rho) = \langle u(x - \rho/2, 0, 0) u^*(x + \rho/2, 0, 0) \rangle$ на совокупности большого числа независимых частиц, случайно расположенных в объеме V с характерным линейным размером L и оценить его характерный продольный радиус корреляции (т. е. масштаб функции $\Gamma(x, \rho)$ по разностной переменной ρ) при $x \gg \rho$ и $L \ll x \ll kL^2$. Ось x выбрана в направлении распространения плоской падающей волны с волновым числом k .

Задача 2

На границу слоя случайной среды ($0 < x < L$) с показателем рассеяния σ , показателем поглощения κ и индикатрисой рассеяния $\chi = 1$ в направлении (μ_0, φ_0) падает излучение с яркостью $I_0 = \delta(\mu - \mu_0) \delta(\varphi - \varphi_0)$. На каком расстоянии от границы однократно рассеянная вперед диффузная интенсивность достигает максимума? Найти коэффициенты яркости отраженного и прошедшего излучения.

Задача 3

В марковском приближении теории рассеяния вывести уравнение для поперечной функции когерентности волнового поля с использованием формулы Фуруцу–Новикова принципа динамической причинности.

Задача 4

На границу $x = 0$ плоскостистой среды, содержащей случайные крупномасштабные неоднородности, падает по нормали плоская волна. В приближении Фоккера–Планка найти угловое распределение интенсивности на расстоянии x от границы и оценить характерный поперечный радиус корреляции поля. Корреляционная функция флуктуаций диэлектрической проницаемости дается выражением $\psi_\varepsilon(\rho_{\parallel}, \rho_{\perp}) = \sigma_\varepsilon^2 \exp(-|\rho_{\parallel}|/l_{\parallel} - \frac{1}{2}\rho_{\perp}^2/l_{\perp}^2)$, в котором σ_ε^2 – дисперсия флуктуаций, а l_{\parallel} и l_{\perp} – соответствующие масштабы корреляции.

Задача 5

В эйкональном приближении рассчитать полное сечение поглощения и коэффициент экстинкции однородной диэлектрической сферы радиуса a при $ka \gg 1$, где k – волновое число падающей плоской волны.

Задача 6

На границу слоя случайной среды ($0 < x < L$) с индикатрисой рассеяния $\chi(\mathbf{s}, \mathbf{s}') = (1 - p_b)\chi_1(\mathbf{s}, \mathbf{s}') + p_b/4\pi$, где p_b – вероятность обратного рассеяния ($p_b \ll 1$), а $\chi_1(\mathbf{s}, \mathbf{s}')$ – сильно вытянута в направлении вперед, падает по нормали плоская волна с интенсивностью $I_0 = \delta(\mathbf{s} - \mathbf{s}_0)$. Найти приближенное выражение для средней интенсивности обратно рассеянного излучения на выходе из слоя, учитывающее эффекты многократного рассеяния. Сравнить полученный результат с аналогичным решением в модифицированном борновском приближении. Коэффициенты рассеяния σ и поглощения κ заданы.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

- 1) Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах, т.1, 2. Издательство: М.: Мир, 1981, с. 322. – 4 экз. <http://mexalib.com/view/5289>
- 2) Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука. - 736 стр. – 7 экз.
- 3) Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. *Теория волн*. М.: Наука. 1990. – 7 экз.

б) дополнительная литература:

- 1) В.Ю. Зайцев, С. Н. Гурбатов, Н. В. Прончатов-Рубцов, Нелинейные акустические явления в структурно-неоднородных средах, эксперименты и модели, Учебное пособие, Нижний Новгород, ИПФ РАН, 2009, 268 стр.– 3 экз.
- 2) Т.Л. Ким. Рассеяние волн в случайно-неоднородных средах: модель скалярного поля. Учебное пособие. <http://stat.phys.spbu.ru/Metod/mm.pdf>.
- 3) Чернов Л. А. - Распространение волн в среде со случайными неоднородностями. - М.: Изд-во АН СССР, 1958. - 158 с. – 2 экз.
- 4) Новиков Б. К, Руденко О. В., Тимошенко В.И. *Нелинейная гидроакустика*. Л.: Судостроение. 1980. 264 с. – 7 экз.
- 5) Сборник научных трудов «Нелинейная акустика. Теоретические и экспериментальные исследования» Редактор Н.А. Городецкая. [Электронный ресурс – Виртуальная библиотека ИПФ РАН] <http://www.iapras.ru/biblio/img/na.pdf>

в) Интернет-ресурсы

- 1) Научная литература. А. Исимару. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т.1
<http://www.booksshare.net/index.php?id1=4&category=physics&author=isimaru-a&book=1981>
- 2) Научная литература. А. Исимару. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т.2.
<http://www.booksshare.net/index.php?id1=4&category=physics&author=isimaru-a&book=1981>

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины.

- Специальные помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет";
- Лицензионное программное обеспечение (*Windows, Microsoft Office*);
- Обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются (при необходимости) электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия, направленность 01.04.06 Акустика.

Автор _____ А.Г. Сазонтов

Ответственный за направление подготовки _____ Вл.В. Кочаровский

Рецензент _____

Программа принята на заседании Ученого совета отделения геофизических исследований и Центра гидроакустики ИПФ РАН, протокол № _____ от _____ года.

Ученый секретарь ОГИиЦГ _____ М.В. Шаталина

Карты компетенций, в формировании которых участвует дисциплина

ПК-2: способность проводить научные исследования и решать научно-исследовательские задачи, соответствующие направленности подготовки, используя специализированные знания в области физики и астрономии, современные методы исследований и информационные технологии, с учетом отечественного и зарубежного опыта

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания результатов обучения	
	Зачтено	Не зачтено
<u>Знания:</u> Знать основы теории когерентности и ее взаимосвязь с теорией переноса излучения	Успешная демонстрация знаний по базовым разделам дисциплины	Отсутствие знаний или фрагментарные знания без положительного результата применения
<u>Умения:</u> Уметь использовать полученные знания для решения конкретных задач теории распространения волн в случайно-неоднородных средах и их рассеяния на случайных объектах; а также при проведении научных исследований в соответствующей области с учетом отечественного и зарубежного опыта	Успешная демонстрация умений по базовым разделам дисциплины	Отсутствие умений или фрагментарное присутствие умений без положительного результата
<u>Навыки:</u> Владеть навыками решения задач, основанными на знаниях, полученных в ходе освоения дисциплины	Успешная демонстрация навыков решения задач на базе полученных в ходе освоения дисциплины знаниях	Отсутствие навыков или фрагментарные навыки без положительного результата применения
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	50 – 100%	0 – 50 %

ПК-3: способность свободно ориентироваться в разделах физики, необходимых для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности (в соответствии с направленностью подготовки)

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания результатов обучения	
	Зачтено	Не зачтено
<u>Знания:</u> Знать закономерности рассеяния волн на неоднородностях показателя преломления среды и ансамбле частиц.	Успешная демонстрация знаний по базовым разделам дисциплины	Отсутствие знаний или фрагментарные знания без положительного результата применения
<u>Умения:</u> Уметь использовать полученные знания для решения конкретных задач теории рассеяния волн в случайно-неоднородных средах на случайных объектах; уметь применять полученные знания для решения научно-инновационных задач.	Успешная демонстрация умений по базовым разделам дисциплины	Отсутствие умений или фрагментарное присутствие умений без положительного результата
<u>Навыки:</u> Владеть статистическими методами описания случайных волновых полей и использовать их при необходимости при проведении научных исследований в инновационной деятельности Знать основы теории когерентности и ее взаимосвязь с теорией переноса излучения	Успешная демонстрация навыков решения задач на базе полученных в ходе освоения дисциплины знаниях	Отсутствие навыков или фрагментарные навыки без положительного результата применения
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	50 – 100%	0 – 50 %