

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 " 30 " ноября 2022 г. № 13

Рабочая программа дисциплины
Радиофизика (кандидатский экзамен)

Уровень высшего образования
Подготовка научных и научно-педагогических кадров

Программа аспирантуры
Радиофизика

Научная специальность
1.3.4 Радиофизика

Форма обучения
Очная

Нижний Новгород
2023 год начала подготовки

1. Место и цель дисциплины в структуре ПА

Дисциплина «Радиофизика (кандидатский экзамен)» относится к числу *обязательных* дисциплин образовательного компонента программы аспирантуры и изучается на 4-ом году обучения в 7 семестре.

Цель дисциплины – проверка знаний, умений и навыков, сформированных в ходе освоения программы аспирантуры и в процессе научно-исследовательской работы за три предшествующих года обучения в аспирантуре в области физики и радиофизики.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Выпускник, освоивший программу, должен

Знать:

- современное состояние науки в области радиофизики;
- современные подходы к моделированию различных явлений в области радиофизики и оценке полученных результатов;

Уметь:

- представлять результаты НИР (в т.ч., диссертационной работы) академическому и бизнес-сообществу;
- самостоятельно интерпретировать результаты научного исследования и оценивать границы применимости полученных результатов;

Владеть:

- владеть навыками критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач;
- навыками моделирования различных явлений в области радиофизики и оценки полученных результатов.

3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., всего - 72 часа, из которых 72 часа составляет самостоятельная работа обучающегося.

Таблица 1

Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятия	Форма текущего контроля*
1	Теория колебаний	Линейные колебательные системы с одной степенью свободы. Силовое и параметрическое воздействие на линейные и слабонелинейные колебательные системы. Автоколебательная система с одной степенью свободы. Энергетические соотношения в автоколебательных системах. Методы расчета автоколебательных систем. Воздействие гармонического сигнала на автоколебательные системы. Синхронизация. Явления затягивания и гашения колебаний. Применение затягивания для стабилизации частоты.	СР	-

		<p>Аналитические и качественные методы теории нелинейных колебаний. Анализ возможных движений и бифуркаций в фазовом пространстве: метод малого параметра, метод Ван-дер-Поля, метод Крылова—Боголюбова. Укороченные уравнения. Усреднение в системах, содержащих быстрые и медленные движения. Колебательные системы с двумя и многими степенями свободы. Нормальные колебания. Вынужденные колебания.</p> <p>Автоколебательные системы с двумя и более степенями свободы. Взаимная синхронизация колебаний двух генераторов.</p> <p>Параметрическое усиление и параметрическая генерация. Параметрические усилители и генераторы. Деление частоты.</p> <p>Устойчивость стационарных режимов автономных и неавтономных колебательных систем. Временные и спектральные методы оценки устойчивости. Собственные и вынужденные колебания линейных распределенных систем. Собственные функции системы (моды). Разложение вынужденных колебаний по системе собственных функций.</p> <p>Распределенные автоколебательные системы. Лазер как пример такой системы. Условия самовозбуждения. Одномодовый и многомодовый режимы генерации. Хаотические колебания в динамических системах. Понятие о хаотическом (странном) аттракторе. Возможные пути потери устойчивости регулярных колебаний и перехода к хаосу.</p>		
2	Теория волн	<p>Плоские однородные и неоднородные волны. Плоские акустические волны в вязкой теплопроводящей среде, упругие продольные и поперечные волны в твердом теле, электромагнитные волны в среде с проводимостью. Поток энергии. Поляризация.</p> <p>Распространение сигнала в диспергирующей среде. Простейшие</p>	СР	-

		<p>физические модели диспергирующих сред. Волновой пакет в первом и втором приближении теории дисперсии. Фазовая и групповая скорости. Параболическое уравнение для огибающей. Расплывание и компрессия импульсов. Поле в средах с временной. Дисперсионные соотношения Крамерса—Кронига и принцип причинности.</p> <p>Свойства электромагнитных волн в анизотропных средах. Оптические кристаллы, уравнение Френеля, обыкновенная и необыкновенная волны. Магнитоактивные среды. Тензор диэлектрической проницаемости плазмы в магнитном поле; нормальные волны, их поляризация.</p> <p>Волны в периодических структурах. Механические цепочки, акустические и оптические фононы. Полосы пропускания и непрозрачности. Электрические цепочки, сплошная среда со слабыми периодическими неоднородностями. Связанные волны. Приближение геометрической оптики. Уравнения эйконала. Дифференциальное уравнение луча. Лучи и поле волны в слоисто-неоднородных средах.</p> <p>Электромагнитные волны в металлических волноводах. Диэлектрические волноводы, световоды. Линзовые линии и открытые резонаторы. Гауссовские пучки. Метод Кирхгофа в теории дифракции. Функции Грина. Условия излучения. Дифракция в зоне Френеля и Фраунгофера. Характеристики поля в фокусе линзы. Волны в нелинейных средах без дисперсии. Образование разрывов. Ударные волны. Уравнение Бюргерса для диссипативной среды и свойства его решений. Генерация гармоник исходного монохроматического сигнала, эффекты нелинейного поглощения, насыщения и детектирования.</p> <p>Уравнение Кортевега–де–Вриза и синус – Гордона. Стационарные волны. Понятие о</p>		
--	--	--	--	--

		<p>солитонах. Взаимодействия плоских волн в диспергирующих средах. Генерация второй гармоники. Параметрическое усиление и генерация.</p> <p>Самовоздействие волновых пучков. Самофокусировка света. Приближения нелинейной квазиоптики и нелинейной геометрической оптики. Обращение волнового фронта. Интенсивные акустические пучки; параметрические излучатели звука.</p>		
3	Статистическая радиофизика	<p>Случайные величины и процессы, способы их описания. Стационарный случайный процесс. Статистическое усреднение и усреднение во времени. Эргодичность. Измерение вероятностей и средних значений.</p> <p>Корреляционные и спектральные характеристики стационарных случайных процессов. Теорема Винера—Хинчина. Белый шум и другие примеры спектров и корреляционных функций.</p> <p>Модели случайных процессов: гауссовский процесс, узкополосный стационарный шум, импульсные случайные процессы, дробовой шум.</p> <p>Отклик линейной системы на шумовые воздействия; функция Грина, интеграл Дюамеля.</p> <p>Действие шума на колебательный контур, фильтрация шума. Нелинейные преобразования (умножения частоты и амплитудное детектирование узкополосного шума).</p> <p>Марковские и диффузионные процессы. Уравнение Фоккера—Планка. Броуновское движение. Флуктуационно-диссипационная теорема. Тепловой шум; классический и квантовый варианты формулы Найквиста. Тепловое излучение абсолютно черного тела.</p> <p>Случайные поля. Пространственная и временная когерентность. Дифракция случайных волн. Теорема Ван Циттерта—Цернике. Дифракция регулярной волны на случайном</p>	СР	-

		<p>фазовом экране. Тепловое электромагнитное поле. Теорема взаимности.</p> <p>Рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Борновское приближение, метод плавных возмущений. Рассеяние волн на шероховатой поверхности. Понятие об обратной задаче рассеяния.</p> <p>Взаимодействие случайных волн. Генерация второй оптической гармоники, самофокусировка и самомодуляция частично когерентных волн.</p> <p>Преобразование спектров шумовых волн в нелинейных средах без дисперсии.</p>		
4	Принципы усиления, генерации и управления сигналами	<p>Принцип работы, устройство и параметры лазеров (примеры: гелий-неоновый лазер, лазер на рубине, полупроводниковый лазер).</p> <p>Оптические резонаторы. Резонатор Фабри—Перо, конфокальный и концентрический резонаторы. Неустойчивый резонатор. Продольные и поперечные типы колебаний. Спектр частот и расходимость излучения. Добротность.</p> <p>Режимы работы лазеров: непрерывный режим генерации, режим модуляции добротности резонатора, режим синхронизации мод. Сверхкороткие импульсы. Шумы лазеров, формула Таунса и предельная стабильность частоты. Оптические компрессоры и получение фемтосекундных импульсов.</p> <p>Молекулярный генератор. Квантовые стандарты частоты (времени). Волноводы, длинные линии и резонаторы. Критическая частота и критическая длина волновода. ТЕ-, ТН- и ТЕМ-волны. Диэлектрические волноводы. Периодические структуры и замедляющие системы. Волновое сопротивление.</p> <p>Усилители СВЧ-диапазона (резонаторный, бегущей волны). Полоса пропускания усилителя бегущей волны.</p> <p>Генерация волн в СВЧ-диапазоне. Принцип работы и устройство лампы</p>	СР	-

		<p>бегущей и обратной волны, магнетрона и клистрона. Отрицательное дифференциальное сопротивление и генераторы СВЧ на полевых транзисторах, туннельных диодах, диодах Ганна и лавиннопролетных диодах. Эффект Джозефсона.</p> <p>Взаимодействие волн пространственного заряда с акустическим полем, акустоэлектрический эффект. Принципы работы кустоэлектронных устройств (усилители ультразвука, линии задержки, фильтры, конвольверы, запоминающие устройства).</p> <p>Взаимодействия света со звуком. Дифракция Брэгга и Рамана—Ната. Принципы работы устройств акустооптики (модуляторы и дефлекторы света, преобразователи свет–сигнал, акустооптические фильтры), анализаторы спектра и корреляторы. Линейный электрооптический и магнитооптический эффекты и их применение для управления светом.</p>		
5	Антенны и распространение радиоволн	<p>Вибратор Герца. Ближняя и дальняя зоны. Диаграмма направленности. Коэффициент усиления и коэффициент рассеяния антенны. Антенны для ДВ-, СВ- и СВЧ-диапазонов. Параболическая антенна. Фазируемые антенные решетки. Эффективная площадь и шумовая температура приемной антенны.</p> <p>Геометрическое и дифракционное приближения при анализе распространения радиоволн. Влияние неровностей земной поверхности. Земные и тропосферные радиоволны. Рассеяние и поглощение радиоволн в тропосфере. Эффект «замирания».</p> <p>Тропосферный волновод. Распространение радиоволн в ионосфере. Дисперсия и поглощение радиоволн в ионосферной плазме. Ионосферная рефракция. Ход лучей в подводном звуковом канале и тропосферном радиоволноводе.</p>	СР	-

4. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

4.1. Основной формой организации самостоятельной работы обучающихся является изучение рекомендованной литературы, доступ к которой может быть осуществлен через Фундаментальную библиотеку ННГУ им. Н.И.Лобачевского, использование ресурсов сети Интернет.

4.2. Контроль самостоятельной работы обучающихся проводится в форме консультаций и собеседования с научным руководителем.

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.

Промежуточной аттестацией по дисциплине является экзамен.

Описание шкалы оценивания на промежуточной аттестации в форме экзамена

Оценка *отлично* – исчерпывающее владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, твердое знание основных положений дисциплины, умение применять концептуальный аппарат при анализе актуальных проблем. Логически последовательные, содержательные, конкретные ответы на все вопросы.

Оценка *хорошо* – достаточно полные знания программного материала, правильное понимание сути вопросов, знание определений, умение формулировать тезисы и аргументы. Ответы последовательные и в целом правильные, хотя допускаются неточности, поверхностное знакомство с отдельными теориями и фактами, достаточно формальное отношение к рекомендованным для подготовки материалам.

Оценка *удовлетворительно* – фрагментарные знания, расплывчатые представления о предмете. Ответ содержит как правильные утверждения, так и ошибки, возможно, грубые. Испытуемый плохо ориентируется в учебном материале, не может устранить неточности в своем ответе даже после наводящих вопросов.

Оценка *неудовлетворительно* – отсутствие ответа хотя бы на один из основных вопросов, либо грубые ошибки в ответах, полное непонимание смысла проблем, не достаточно полное владение терминологией.

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

ПРОГРАММА-МИНИМУМ кандидатского экзамена по специальности

1. Теория колебаний

Линейные колебательные системы с одной степенью свободы. Силовое и параметрическое воздействие на линейные и слабонелинейные колебательные системы. Автоколебательная система с одной степенью свободы. Энергетические соотношения в автоколебательных системах. Методы расчета автоколебательных систем. Воздействие гармонического сигнала на автоколебательные системы. Синхронизация. Явления затягивания и гашения колебаний. Применение затягивания для стабилизации частоты.

Аналитические и качественные методы теории нелинейных колебаний. Анализ возможных движений и бифуркаций в фазовом пространстве: метод малого параметра, метод Ван-дер-Поля, метод Крылова—Боголюбова. Укороченные уравнения. Усреднение в системах, содержащих быстрые и медленные движения. Колебательные системы с двумя и многими степенями свободы. Нормальные колебания. Вынужденные колебания.

Автоколебательные системы с двумя и более степенями свободы. Взаимная синхронизация колебаний двух генераторов. Параметрическое усиление и параметрическая генерация. Параметрические усилители и генераторы. Деление частоты.

Устойчивость стационарных режимов автономных и неавтономных колебательных систем. Временные и спектральные методы оценки устойчивости. Собственные и вынужденные колебания линейных распределенных систем. Собственные функции системы (моды). Разложение вынужденных колебаний по системе собственных функций.

Распределенные автоколебательные системы. Лазер как пример такой системы. Условия самовозбуждения. Одномодовый и многомодовый режимы генерации. Хаотические колебания в динамических системах. Понятие о хаотическом (странном) аттракторе. Возможные пути потери устойчивости регулярных колебаний и перехода к хаосу.

2. Теория волн

Плоские однородные и неоднородные волны. Плоские акустические волны в вязкой теплопроводящей среде, упругие продольные и поперечные волны в твердом теле, электромагнитные волны в среде с проводимостью. Поток энергии. Поляризация. Распространение сигнала в диспергирующей среде. Простейшие физические модели диспергирующих сред. Волновой пакет в первом и втором приближении теории дисперсии. Фазовая и групповая скорости. Параболическое уравнение для огибающей. Расплывание и компрессия импульсов. Поле в средах с временной. Дисперсионные соотношения Крамерса—Кронига и принцип причинности.

Свойства электромагнитных волн в анизотропных средах. Оптические кристаллы, уравнение Френеля, обыкновенная и необыкновенная волны. Магнитоактивные среды. Тензор диэлектрической проницаемости плазмы в магнитном поле; нормальные волны, их поляризация.

Волны в периодических структурах. Механические цепочки, акустические и оптические фононы. Полосы пропускания и непрозрачности. Электрические цепочки, сплошная среда со слабыми периодическими неоднородностями. Связанные волны. Приближение геометрической оптики. Уравнения эйконала. Дифференциальное уравнение луча. Лучи и поле волны в слоисто-неоднородных средах.

Электромагнитные волны в металлических волноводах. Диэлектрические волноводы, световоды. Линзовые линии и открытые резонаторы. Гауссовские пучки. Метод Кирхгофа в теории дифракции. Функции Грина. Условия излучения. Дифракция в зоне Френеля и Фраунгофера. Характеристики поля в фокусе линзы. Волны в нелинейных средах без дисперсии. Образование разрывов. Ударные волны. Уравнение Бюргерса для диссипативной среды и свойства его решений. Генерация гармоник исходного монохроматического сигнала, эффекты нелинейного поглощения, насыщения и детектирования.

Уравнение Кортвега–де–Вриза и синус – Гордона. Стационарные волны. Понятие о солитонах. Взаимодействия плоских волн в диспергирующих средах. Генерация второй гармоники. Параметрическое усиление и генерация.

Самовоздействие волновых пучков. Самофокусировка света. Приближения нелинейной квазиоптики и нелинейной геометрической оптики. Обращение волнового фронта. Интенсивные акустические пучки; параметрические излучатели звука.

3. Статистическая радиофизика

Случайные величины и процессы, способы их описания. Стационарный случайный процесс. Статистическое усреднение и усреднение во времени. Эргодичность. Измерение вероятностей и средних значений.

Корреляционные и спектральные характеристики стационарных случайных процессов. Теорема Винера—Хинчина. Белый шум и другие примеры спектров и корреляционных функций.

Модели случайных процессов: гауссовский процесс, узкополосный стационарный шум, импульсные случайные процессы, дробовой шум.

Отклик линейной системы на шумовые воздействия; функция Грина, интеграл Дюамеля. Действие шума на колебательный контур, фильтрация шума. Нелинейные преобразования (умножения частоты и амплитудное детектирование узкополосного шума).

Марковские и диффузионные процессы. Уравнение Фоккера—Планка. Броуновское движение. Флуктуационно-диссипационная теорема. Тепловой шум; классический и квантовый варианты формулы Найквиста. Тепловое излучение абсолютно черного тела.

Случайные поля. Пространственная и временная когерентность. Дифракция случайных волн. Теорема Ван Циттерта—Цернике. Дифракция регулярной волны на случайном фазовом экране. Тепловое электромагнитное поле. Теорема взаимности.

Рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Борновское приближение, метод плавных возмущений. Рассеяние волн на шероховатой поверхности. Понятие об обратной задаче рассеяния.

Взаимодействие случайных волн. Генерация второй оптической гармоники, самофокусировка и самомодуляция частично когерентных волн. Преобразование спектров шумовых волн в нелинейных средах без дисперсии.

4. Принципы усиления, генерации и управления сигналами

Принцип работы, устройство и параметры лазеров (примеры: гелий-неоновый лазер, лазер на рубине, полупроводниковый лазер).

Оптические резонаторы. Резонатор Фабри—Перо, конфокальный и концентрический резонаторы. Неустойчивый резонатор. Продольные и поперечные типы колебаний. Спектр частот и расходимость излучения. Добротность.

Режимы работы лазеров: непрерывный режим генерации, режим модуляции добротности резонатора, режим синхронизации мод. Сверхкороткие импульсы. Шумы лазеров, формула Таунса и предельная стабильность частоты. Оптические компрессоры и получение фемтосекундных импульсов.

Молекулярный генератор. Квантовые стандарты частоты (времени). Волноводы, длинные линии и резонаторы. Критическая частота и критическая длина волновода. ТЕ-, ТН- и ТЕМ-волны. Диэлектрические волноводы. Периодические структуры и замедляющие системы. Волновое сопротивление.

Усилители СВЧ-диапазона (резонаторный, бегущей волны). Полоса пропускания усилителя бегущей волны.

Генерация волн в СВЧ-диапазоне. Принцип работы и устройство лампы бегущей и обратной волны, магнетрона и клистрона. Отрицательное дифференциальное сопротивление и генераторы СВЧ на полевых транзисторах, туннельных диодах, диодах Ганна и лавиннопролетных диодах. Эффект Джозефсона.

Взаимодействие волн пространственного заряда с акустическим полем, акустоэлектрический эффект. Принципы работы акустоэлектронных устройств (усилители ультразвука, линии задержки, фильтры, конвольверы, запоминающие устройства).

Взаимодействия света со звуком. Дифракция Брэгга и Рамана—Ната. Принципы работы устройств акустооптики (модуляторы и дефлекторы света, преобразователи свет—сигнал, акустооптические фильтры), анализаторы спектра и корреляторы. Линейный электрооптический и магнитооптический эффекты и их применение для управления светом.

5. Антенны и распространение радиоволн

Вибратор Герца. Ближняя и дальняя зоны. Диаграмма направленности. Коэффициент усиления и коэффициент рассеяния антенны. Антенны для ДВ-, СВ- и СВЧ-диапазонов. Параболическая антенна. Фазированные антенные решетки. Эффективная площадь и шумовая температура приемной антенны.

Геометрическое и дифракционное приближения при анализе распространения радиоволн. Влияние неровностей земной поверхности. Земные и тропосферные радиоволны. Рассеяние и поглощение радиоволн в тропосфере. Эффект «замирания». Тропосферный волновод. Распространение радиоволн в ионосфере. Дисперсия и поглощение радиоволн в ионосферной плазме. Ионосферная рефракция. Ход лучей в подводном звуковом канале и тропосферном радиоволноводе.

6. Выделение сигналов на фоне помех

Задачи оптимального приема сигнала. Апостериорная плотность вероятности. Функция правдоподобия. Статистическая проверка гипотез. Критерии Байеса, Неймана—Пирсона и Вальда проверки гипотез.

Априорные сведения о сигнале и шуме. Наблюдение и сообщение. Задачи интерполяции, фильтрации и экстраполяции.

Линейная фильтрация Колмогорова—Винера на основе минимизации дисперсии ошибки. Принцип ортогональности ошибки и наблюдения. Реализуемые линейные фильтры и уравнение Винера-Хопфа. Выделение сигнала из шума. Согласованный фильтр. Линейный фильтр Калмана—Бьюси. Стохастические уравнения для модели сообщения и шума. Дифференциальные уравнения фильтра. Уравнение для апостериорной информации в форме уравнения Риккати. Сравнение фильтрации методом Колмогорова—Винера и Калмана—Бьюси.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА кандидатского экзамена по специальности

Раздел 1. Электродинамика и специальная теория относительности

ОБЩИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной формах для полей, зарядов и токов в среде. Средние макроскопические поля и источники. Общие граничные условия для макроскопических полей. Материальные уравнения. Закон сохранения заряда. Сила Лоренца. Теорема Пойнтинга (закон сохранения энергии), энергия и поток энергии электромагнитного поля.

Максвелловский тензор натяжений. Импульс электромагнитного поля.

Единственность решения начальной задачи для общей системы уравнений Максвелла. Обратимость решений во времени. Принцип перестановочной двойственности; магнитные токи и заряды.

Уравнения электростатики, магнитостатики и токовой статики. Методы расчета статических полей в однородной среде и при наличии границ проводников и диэлектриков.

Общее потенциальное описание полей, зависящих от времени (скалярный и векторный потенциалы, калибровочные преобразования). Дифференциальные уравнения второго порядка для полей и потенциалов в диэлектрике и проводнике.

Однородное и неоднородное волновые уравнения для электромагнитных волн. Структура электромагнитного поля в произвольных плоских волнах в однородной изотропной среде.

Уравнения Максвелла, граничные условия и материальные соотношения для гармонических полей. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Теорема единственности решения уравнений Максвелла для гармонических полей.

МОНОХРОМАТИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Однородные и неоднородные плоские волны в однородной среде. Квазистационарные поля и токи в хороших проводниках. Скин-эффект. Граничные условия Леонтовича; поверхностный импеданс.

Лемма Лоренца и теорема взаимности для гармонических полей. Излучение электромагнитных волн источниками с заданными распределениями гармонических токов. Сопротивление излучения. Поле излучения в дальней зоне. Связь между угловым распределением излучения и пространственным Фурье-спектром плотности тока.

Электромагнитные волны в средах с временной дисперсией; выражение для плотности энергии; распространение квазимонохроматического волнового пакета. Нормальные волны в анизотропных средах; поверхность волновых векторов; двойное лучепреломление в кристаллах. Гиротропные среды. Среда с пространственной дисперсией. Поперечные и продольные волны в изотропной плазме.

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ, ЗАМЕДЛЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ, РЕЗОНАТОРЫ

Волны в длинных линиях. Описание волн в терминах тока и напряжения; телеграфные уравнения; поперечные импедансы; отражение волны от нагрузки.

Волны TE, TM и TEM типов в линиях передачи с идеально проводящими границами (общее описание, основные моды прямоугольного и круглого волноводов и коаксиальной линии). Собственные колебания в полых резонаторах.

Структура поля низших мод и спектр собственных частот идеального прямоугольного резонатора. Ортогональность полей собственных мод идеального резонатора.

Затухание волн в неидеальных волноводах, обусловленное потерями энергии в заполняющей среде и в стенках.

Методы расчета затухания колебаний в неидеальных резонаторах. Сравнение спектров колебаний идеального и неидеального резонаторов.

Медленные (поверхностные) волны в замедляющих структурах (металлических, диэлектрических, плазменных). Волоконно-оптические волноводы.

Методы расчета полей, создаваемых внутри волноводов и полых резонаторов сторонними гармоническими токами. Возбуждение волноводов и резонаторов штыревыми и щелевыми антеннами. Возбуждение волноводов при облучении открытого торца квазиоптическим волновым пучком.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ДИФРАКЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Поверхностные электрические и магнитные токи, эквивалентные тангенциальным компонентам полей на границе области. Принцип дополнительных экранов Бабинне. Коротковолновые приближения (метод геометрической оптики, кирхгофовское приближение, метод физической оптики). Понятия дифференциального и полного сечений рассеяния тела.

Открытые волноводы и резонаторы. Диафрагмированные квазиоптические системы с квадратичными фазовыми корректорами. Дифракционные потери. Селекция мод.

Зеркальные квазиоптические линии передачи; дифракционные потери и потери при отражении. Диагностика качества квазиоптических волновых пучков и электродинамические методы управления их параметрами.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (СТО)

Экспериментальные основы специальной теории относительности (СТО). Принцип относительности в механике и электродинамике. Понятие инерциальной системы отсчета. Постулаты Эйнштейна.

Преобразования Лоренца, относительность понятия одновременности событий, сокращение длины движущегося отрезка, замедление хода движущихся часов, понятие собственного времени тела, закон сложения скоростей, эффект Допплера. Импульс и энергия свободной частицы, масса и энергия покоя. Релятивистское уравнение движения материальной точки. Движение заряда в постоянном электрическом поле, постоянном магнитном поле и в скрещенных полях. Релятивистские интеграл действия и функция Лагранжа.

Ковариантная формулировка уравнений электродинамики в вакууме. Четырех-векторы потенциала и плотности тока, тензор электромагнитного поля, тензор энергии-импульса. Закон преобразования полей. Инварианты поля. Инвариантность заряда.

Уравнения поля и материальные уравнения для движущихся сред. Преобразования полей и векторов поляризации. Граничные условия на движущихся поверхностях.

ПОЛЕ ДВИЖУЩИХСЯ ЗАРЯДОВ

Электромагнитные поля равномерно и неравномерно движущегося точечного заряда в вакууме. Потенциалы Лиенара-Вихерта. Тормозное, магнитотормозное и синхротронное излучение точечного заряда. Излучение Вавилова-Черенкова при сверхсветовом движении заряда в среде.

Электромагнитная масса заряда и трудности классической теории электрона. Классический радиус электрона. Реакция излучения.

Раздел 2. Линейные волновые процессы

Однородное и неоднородное волновое уравнение. Общие решения однородного волнового уравнения в виде сферических, цилиндрических и плоских волн.

Дисперсионные соотношения для плоских волн в однородных материальных средах. Фазовая и групповая скорости. Поляризация плоских волн.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Характеристики электромагнитных волн в изотропных средах. Временная и пространственная дисперсия. Соотношения Крамерса-Кронига. Общие закономерности распространения электромагнитных волн в анизотропных средах. Свойства тензора диэлектрической проницаемости кристаллов. Простейшие типы нормальных плоских волн в одноосном и двухосном кристаллах, в гиротропной среде. Эффект Фарадея, эффект Коттона-Муттона.

Электромагнитный волновой пучок. Представление в виде суперпозиции однородных плоских волн. Малоугловое (параксиальное) приближение (квазиоптический пучок). Уравнение поперечной диффузии (параболическое уравнение) для амплитуды волнового пучка и его решение. Пучок с гауссовым распределением амплитуды.

Волны в неоднородных средах. Метод геометрической оптики для скалярных волновых полей в трехмерно-неоднородной изотропной среде. Система уравнений последовательных приближений. Уравнение эйконала. Лучи. Уравнение переноса. Закон сохранения энергии в лучевой трубке. Волновые уравнения для слоистонеоднородных сред. Линейный слой и решение Эйри. Метод геометрической оптики и ВКБ-приближение. Каустики. Рефракция коротких волн в тропосфере и ионосфере Земли. Критическая частота. Естественный волновод Земля-ионосфера.

Принцип Гюйгенса-Френеля для скалярных и векторных полей. Дифракция света на решетках, щелях, отверстиях и экранах.

ВОЛНЫ В ПЛАЗМЕ

Диэлектрическая проницаемость холодной изотропной плазмы. Плазменные колебания, ленгмюровская частота. Дисперсия высокочастотных электромагнитных волн в однородной изотропной плазме. Полное внутреннее отражение и глубина проникновения электромагнитного поля в плазму. Двухжидкостная модель плазмы и ионный звук. Дисперсионное соотношение для плазменных волн с учетом слабой пространственной дисперсии.

Тензор диэлектрической проницаемости холодной магнитоактивной плазмы. Высокочастотные обыкновенная и необыкновенная нормальные волны (на примерах продольного и поперечного распространения), их показатели преломления, поляризация. Точки отражения и резонансы в плазме, области непрозрачности. Квазипродольное и квазипоперечное приближения для высокочастотных волн в магнитоактивной плазме. Свистящие атмосферерики. Линейные уравнения магнитной гидродинамики. Магнитогидродинамические волны Альфвена, быстрая и медленная магнитозвуковые волны.

ИЗЛУЧЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Теория эффекта Вавилова-Черенкова. Интегральная форма решения задачи об электромагнитных полях при прямолинейном и равномерном движении точечного электрического заряда в однородной изотропной среде с учетом временной дисперсии. Мощность излучения волн. Черенковское излучение в прозрачной среде с дисперсией. Проблема прохождения заряженных частиц через вещество. Ионизационные и поляризационные потери.

Дипольное приближение в теории тормозного излучения при соударениях заряженных частиц.

Магнитотормозное излучение электромагнитных волн при движении электрона в постоянном магнитном поле. Распределение энергии по спектру (для циклотронного и синхротронного излучения). Диаграммы направленности излучаемой мощности. Полная излучаемая мощность. Поляризация магнитотормозного излучения. Магнитодрейфовое излучение.

ВОЛНЫ В ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ

Полная замкнутая система уравнений механики для жидкостей и газов: уравнение непрерывности, уравнение Навье-Стокса для баланса импульсов, закон сохранения энергии в дифференциальной и интегральной формах. Линеаризация уравнений механики жидкостей и газов относительно малых возмущений средних параметров среды. Уравнения линейной акустики и гидродинамики. Акустические волны в жидкостях и газах. Поверхностные гравитационные волны.

Акустические монополи и диполи. Резонансный поршневой излучатель звука. Акустический импеданс излучателя, присоединенная масса и упругость, сопротивление излучения. Излучение волн Маха при движении хорошо обтекаемых тел со сверхзвуковыми скоростями.

Поглощение звуковых волн в вязкой теплопроводной среде. Скорость звука по Ньютону и по Лапласу.

Акусто-гравитационные и внутренние волны в слоистостратифицированной среде.

ВОЛНЫ В УПРУГИХ ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Закон Гука и уравнения механики упругих тел. Объемные и сдвиговые деформации. Понятие о нормальных волнах. Два типа нормальных волн в упругом теле.

Основные уравнения линейной сейсмодинамики. Сейсмические волны в упругом полупространстве со свободной границей: волны сжатия, сдвиговые волны, волны Рэлея и Лява. Механизмы взрывов в упругом теле. Импульсное излучение сейсмических волн. Сейсмографы и типичная сейсмограмма. Шкала магнитуд Рихтера.

Раздел 3. Статистическая радиофизика

СЛУЧАЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ И СИГНАЛЫ

Характеристические, моментные и кумулянтные функции случайного процесса (определения). Корреляционная функция и коэффициент корреляции. Плотность вероятностей и характеристическая функция гауссовского процесса, его основные свойства. Статистическое описание совокупности двух случайных процессов, взаимная корреляционная функция.

Спектральная плотность мощности. Соотношение между энергетическим спектром и автокорреляционной функцией стационарного процесса (формула Винера-Хинчина). Ширина спектра случайного процесса, ее связь с временем корреляции. Узкополосный случайный процесс, его представление с помощью квадратурных компонент, амплитуда и фаза процесса.

Тепловые шумы в квазистационарных цепях. Формула Найквиста.

Оптимальное обнаружение сигналов. Отношение правдоподобия. Обнаружение детерминированного сигнала на фоне гауссовских помех. Корреляционный приемник, согласованный фильтр, отношение сигнала к шуму на выходе согласованного фильтра.

СЛУЧАЙНЫЕ ВОЛНОВЫЕ ПОЛЯ

Статистические характеристики случайных волновых полей (определения). Среднее поле, пространственно-временная корреляционная функция, моменты высших порядков.

Функция когерентности и ее связь с яркостью (интенсивностью) поля излучения. Закон сохранения яркости в свободном пространстве. Закон изменения яркости на границе сред с различными показателями преломления.

Тепловое электромагнитное поле. Флуктуационно-диссипационная теорема. Обобщенный закон Кирхгофа. Спектральная яркость теплового излучения и его радиояркость температура.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ ВОЛН В СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Борновское приближение теории рассеяния волн на флуктуациях показателя преломления среды. Избирательный механизм рассеяния.

Методы расчета флуктуаций амплитуды и фазы волны в средах с крупномасштабными неоднородностями показателя преломления: приближение геометрической оптики, метод плавных возмущений Рытова. Флуктуации амплитуды и фазы волны в турбулентной атмосфере.

Эффективный показатель преломления случайно-неоднородной среды для статистически среднего поля. Уравнение для функции когерентности волнового пучка и его связь с уравнением переноса излучения в малоугловом приближении.

Обратное рассеяние волнового пучка на мелкомасштабных неоднородностях среды при наличии крупномасштабных неоднородностей. Когерентные явления при рассеянии назад.

ОТРАЖЕНИЕ ВОЛН ОТ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Поверхность с мелкомасштабными неровностями: коэффициент отражения для среднего поля, параметр Рэлея, удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) и ее связь с пространственным спектром неровностей.

Поверхность с крупномасштабными пологими неровностями: представление УЭПР через функцию распределения уклонов поверхности.

Двухмасштабная модель шероховатой поверхности и ее УЭПР.

Раздел 4. Теория колебаний и нелинейная динамика

Адиабатические инварианты. Геометрический смысл адиабатического инварианта. Системы с быстро меняющимися параметрами. Усредненная пондеромоторная сила. Связь с теорией адиабатических инвариантов.

Резонанс в нелинейных системах. Устойчивость состояний равновесия. Явление гистерезиса при медленном изменении амплитуды силы. Обоснование сходимости в методе Ван-дер-Поля. Оценка точности.

Стохастичность в динамических системах. Экспериментальные признаки стохастичности. Точечные отображения для систем с одной степенью свободы. Отображение Фейгенбаума. Удвоение периода. Инвариантная мера. Эргодичность. «Динамическая» диффузия. Системы с $3/2$ степенями свободы. Глобальная стохастичность. Критерий перекрытия резонансов. Критерий многопоточности. Уравнение Эйнштейна-Фоккера-Планка.

Цепочки связанных осцилляторов. Функция Блоха. Длинноволновое приближение.

Понятие об абсолютной и конвективной неустойчивостях.

Трехволновые взаимодействия. Условия синхронизма волн. Распадные и нераспадные спектры. Соотношения Мэнли-Роу. Распадная неустойчивость. Волны с «отрицательной» энергией. Взрывная неустойчивость.

Ударные волны. Образование разрывов. Оценка длины опрокидывания. Оценка времени опрокидывания. Структура фронта ударной волны в рамках уравнения Бюргерса. Уравнение Кортевега – де Вриза (КдВ). Солитоны.

Лагранжев формализм и вывод укороченных уравнений. Метод Уизема.

Основы качественной теории и теории бифуркаций динамических систем на плоскости.

Основные бифуркации многомерных динамических систем. Бифуркации состояний равновесия: двукратное равновесие, бифуркация Андронова-Хопфа. Бифуркации периодических движений: двукратный предельный цикл, удвоение периода, рождение инвариантного тора. Нелокальные бифуркации в окрестности гомоклинической траектории. Динамический хаос. Странный аттрактор.

Характеристические показатели Ляпунова. Фрактальные структуры и размерность странных аттракторов. Ляпуновская размерность. Переход к хаосу через последовательность бифуркаций удвоения периода. Универсальность Фейгенбаума.

Аттрактор Лоренца и хаос в жидкости. Вывод модели Лоренца. Бифуркации в системе Лоренца.

Конкуренция колебаний в многомодовых резонаторах.

Солитоны нелинейного уравнения Шредингера (НУШ).

Устойчивость солитонов. Второй метод Ляпунова. Неравенство Соболева. Устойчивость КдВ-солитона. Устойчивость НУШ-солитона.

Самофокусировка, качественная модель процесса. Поперечная неустойчивость пучков большой мощности. Филаментация. Однородные каналы. Критическая мощность самофокусировки. Метод моментов: оценка длины самофокусировки, оценка критической мощности. Безабберационное описание процесса самофокусировки.

Интегрируемые уравнения в частных производных. Интегрируемость в сосредоточенных системах. Метод Дарбу. Безотражательные потенциалы. Условия совместности. Уравнение Бюргерса и его «линеаризуемость». Схема Лакса. Оценка полного числа солитонов по начальным условиям. Метод обратной задачи рассеяния.

Раздел 5. Генерация и усиление колебаний и волн

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ

Термодинамическая неравновесность среды как необходимое условие усиления и генерации колебаний и волн. Обратная связь в генераторе.

Простейшие фундаментальные модели генераторов и усилителей:

- триодный усилитель;
- усиление волны в среде с отрицательной проводимостью;
- усиление сигнала при взаимодействии волн с противоположными знаками энергии;
- автогенератор как усилитель с положительной обратной связью;
- автогенератор как осциллятор с отрицательным трением;
- параметрические генераторы и усилители;
- регенеративный усилитель.

Флуктуации параметров активной среды как основная причина уширения линии генератора и усилителя.

Селекция мод в генераторах и усилителях с распределёнными параметрами. Взаимодействие (конкуренция и кооперация) мод в нелинейном режиме.

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Элементарные процессы взаимодействия вещества с электромагнитным полем: поглощение, спонтанное и индуцированное излучение фотонов. Коэффициенты Эйнштейна.

Отрицательная проводимость среды с инверсией населенностей уровней.
Когерентность индуцированного излучения.

Усиление электромагнитной волны в среде с инверсией.

Самосогласованная система уравнений лазера-автогенератора. Порог самовозбуждения и насыщение.

Методы реализации инверсии населенностей. Трехуровневые и четырехуровневые схемы.

Типы лазеров: твердотельные, газовые, эксимерные и химические лазеры, полупроводниковые лазеры, лазеры на органических красителях.

МИКРОВОЛНОВАЯ ВАКУУМНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Индивидуальное (спонтанное) и коллективное (стимулированное) излучения в квазиклассических системах:

- типы спонтанного излучения электронов: черенковское, переходное и тормозное излучение; рассеяние волн на электронах; соответствующие синхронизмы между электронами и электромагнитными волнами;

- стимулированное излучение электронных потоков; два подхода:

- группировка электронов и излучение электронных сгустков при взаимодействии электронного потока с волной,

- взаимодействие электромагнитной волны с одной из собственных волн электронного потока; конвективная и абсолютная неустойчивости.

Электронные СВЧ усилители; основные схемы:

- усилитель попутной волны;

- секционированные усилители клистронного типа;

- регенеративные усилители.

Электронные СВЧ генераторы; принципы обратной связи и основные схемы:

- усилитель с положительной обратной связью;

- генератор обратной (встречной) волны;

- предельный случай генератора с высокодобротным резонатором.

Приборы, основанные на стимулированном черенковском и переходном излучениях электронов: магнетрон, ЛБВ и ЛОВ типа “О”, клистрон.

Приборы, основанные на стимулированном тормозном излучении электронов: мазеры на циклонном резонансе и лазеры на свободных электронах.

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Твердотельный триод - транзистор:

- биполярный транзистор;

- полевой транзистор;

- гетеротранзистор.

Генератор Ганна (генератор на отрицательной дифференциальной проводимости).

Генераторы, основанные на отрицательной проводимости, связанной с туннелированием:

- туннельный диод;

- резонансно-туннельный диод;

- лавинно-пролетный диод;

- усиление акустических волн дрейфом носителей в полупроводниках ($V_{dr} > V_{sound}$).

ГЕНЕРАТОРЫ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН

Электроакустические преобразователи для воздушной, водной и твердой сред. Диффузорные и рупорные громкоговорители.

Автогенераторы звука. Свистки, сирены, голосовой аппарат, музыкальные инструменты.

Параметрические генераторы звука.

Раздел 6. Методы радиофизических измерений и автоматизации физического эксперимента

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И СИГНАЛОВ

Фундаментальные пределы точности измерений физических величин. Виды погрешностей измерений и их источники. Количественные характеристики погрешностей. Методы уменьшения погрешностей.

Методы измерения статических, низкочастотных, высокочастотных и СВЧ полей. Измерение СВЧ поля в волноводе и в свободном пространстве.

Методы измерения параметров электромагнитных сигналов. Методы измерения длины волны, частоты и периода колебаний. Методы измерения фазовых сдвигов.

Методы аппаратного и компьютерного спектрального анализа. Последовательный и параллельный метод резонансного измерения спектра. Параметрический и оптический спектроанализатор. Спектральный анализ с временной компрессией сигналов.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Методы измерения вероятностных и энергетических характеристик случайных процессов.

Методы частотно-временного анализа нестационарных сигналов. Текущий и мгновенный спектры, «скользящий» Фурье-спектр, преобразование Вигнера-Вилля, вейвлет-анализ. Метод Прони, кореллограммный и периодограммный методы оценивания энергетического спектра.

Методы измерения слабых сигналов. Критерии оптимальности. Понятие целевой функции. Измерение параметров сигналов. Оптимальное измерение амплитуды, фазы и частоты. Синхронное детектирование. Оптимальный радиометр. Реальные радиометры. Радиометрический выигрыш.

РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И ДАТЧИКИ

Полевые датчики. Емкостной и индуктивный СВЧ зонды. Варикапы. Полевой транзистор.

Тепловые датчики. Датчик термоэдс. Пирозлектрические преобразователи. Термисторы и позисторы.

Квантовомеханические датчики. Эффекты ядерного и ферромагнитного резонансов. Гальваномагнитные датчики. Эффекты Холла и Гаусса. Индукционные датчики.

Акустооптические преобразователи. Магнитоакустические и магнитооптические датчики. Оптоэлектронные функциональные узлы.

Преобразователи на поверхностных акустических волнах.

СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Спектральное представление сигналов. Линейное, параметрическое и нелинейное преобразование сигналов. Дискретизация и квантование сигналов. Теорема Котельникова.

Аналоговый и дискретный ряд Фурье. Аналоговые и цифровые фильтры. Быстрое преобразование Фурье.

Аналого-цифровое и цифроаналоговое преобразования. Интегральные операционные усилители и функциональные узлы на их основе. Базовые схемы транзисторной логики. Приборные и измерительные интерфейсы.

Архитектура микропроцессоров. Цифровые процессоры сигналов. Обработка сигналов на базе цифрового процессора сигналов. Варианты многопроцессорных систем.

Управление базами данных. Методы обработки данных. Технологии MatLab и LabVIEW

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) Основная литература

1. Ахманов С. А., Дьяков Ю. Е., Чиркин А. С. - Введение в статистическую радиофизику и оптику: [учеб. пособие для физ. специальностей вузов]. - М.: Наука, 1981. - 640 с.
2. Зверев В. А. - Радиооптика: Преобразования сигналов в радио и оптике. - М.: Советское радио, 1975. - 304 с.
3. Ландау, Л.Д. Курс теоретической физики. Статистическая физика [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — Электрон. дан. — Москва: Физматлит, 2001. — 616 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/2230>. — Загл. с экрана.

б) Дополнительная литература

Литература к разделу 1:

1. Никольский В. В., Никольская Т. И. - Электродинамика и распространение радиоволн: [учеб. пособие для радиотехн. специальностей вузов]. - М.: Наука, 1989. - 543 с.
2. Вайнштейн Л. А. - Электромагнитные волны. - М.: Радио и связь, 1988. - 440 с.
3. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Т.8 Электродинамика сплошных сред. [Электронный ресурс] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — Электрон. дан. — М.: Физматлит, 2005. — 656 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/2234> — Загл. с экрана.
4. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Т.2 Теория поля [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — Электрон. дан. — Москва: Физматлит, 2006. — 536 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/2236>. — Загл. с экрана.
5. Гольдштейн Л. Д., Зернов Н. В. - Электромагнитные поля и волны. - М.: Советское радио, 1971. - 662 с.
6. Бредов, М.М. Классическая электродинамика [Электронный ресурс]: учеб. пособие / М.М. Бредов, В.В. Румянцев, И.Н. Топтыгин. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2003. — 400 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/606>. — Загл. с экрана.
7. Баскаков С. И. - Основы электродинамики: [учеб. пособие для радиотехн. специальностей вузов]. - М.: Советское радио, 1973. - 248 с.
8. Джексон Д. - Классическая электродинамика. - М.: Мир, 1965. - 702 с.
9. Тамм, И.Е. Основы теории электричества. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М.: Физматлит, 2003. — 616 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/2333> — Загл. с экрана.

Литература к разделу 2:

1. Теория волн: [учеб. пособие для физ. специальностей вузов]./Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П., [и др. - М.: Наука, 1990. - 432 с.
2. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Т.6 Гидродинамика [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — Электрон. дан. — Москва: Физматлит, 2001. — 736 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/2232>. — Загл. с экрана.

3. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Т.7 Теория упругости [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — Электрон. дан. — Москва: Физматлит, 2007. — 264 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/2233>. — Загл. с экрана.
4. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Т.8 Электродинамика сплошных сред. [Электронный ресурс] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — Электрон. дан. — М.: Физматлит, 2005. — 656 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/2234> — Загл. с экрана.
5. Вайнштейн Л. А. - Электромагнитные волны. - М.: Радио и связь, 1988. - 440 с.
6. Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я. - Волновые явления в ионосфере и космической плазме. - М.: Наука, 1984. - 392 с.
7. Кролл Н., Трайвелипис А - Основы физики плазмы. - М.: Мир, 1975. - 526 с.

Литература к разделу 3:

1. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. - Введение в статистическую радиофизику: [учеб. пособие для физ. специальностей вузов]. Ч. 2. - М.: Наука, 1978. - 463 с.
2. Кляцкин В. И. - Стохастические уравнения и волны в случайно неоднородных средах. - М.: Наука, 1980. - 336 с.

Литература к разделу 4:

1. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. А - Теория колебаний. - М.: Наука, 1981. - 568 с.
2. Бутенин Н. В., Неймарк Ю. И., Фуфаев Н. А - Введение в теорию нелинейных колебаний: [учеб. пособие для вузов]. - М.: Наука, 1987. - 382 с.
3. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. - Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. - М.: Наука, 1974. - 503 с.
4. Стрелков, С.П. Введение в теорию колебаний [Электронный ресурс] : учеб. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2005. — 440 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/603>. — Загл. с экрана.
5. Мандельштам Л. И. - Лекции по теории колебаний. - М.: Наука, 1972. - 470 с.

Литература к разделу 5:

1. Ярив А. - Квантовая электроника. - М.: Советское радио, 1980. - 488 с.
2. Вайнштейн Л. А., Солнцев В. А. - Лекции по сверхвысокочастотной электронике. - М.: Советское радио, 1973. - 399 с.

Литература к разделу 6:

1. Винокуров В. И., Каплин С. И., Петелин И. Г. - Электрорадиоизмерения: [учеб. пособие для радиотехн. специальностей вузов]. - М.: Высшая школа, 1986. - 350, [1] с.
2. Кисляков А. Г., Разин В. А., Цейтлин Н. М. - Введение в радиоастрономию. Ч. 2., 1996. - 196 с.
3. Макс Ж. - Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: пер. с фр. А. Ф. Горюнова, А. В. Крянева : в 2 т. Т. 1. - М.: Мир, 1983. - 311 с.

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).

Автор: д.ф.-м.н., проф. А.В. Кудрин

Рецензент: д.ф.-м.н., проф. С.Н. Гурбатов

Декан: д.ф.-м.н., проф. В.В. Матросов

Программа одобрена на заседании Методической комиссии радиофизического факультета от «14» ноября 2022 года, протокол № 08/22.