

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



15 » апрель 2022 г.

Программа кандидатского экзамена по научной специальности

1.3.4. Радиофизика

Нижний Новгород  
2022

**ПРОГРАММА-МИНИМУМ**  
кандидатского экзамена по специальности

**1.3.4 Радиоп физика**  
по физико-математическим наукам

**Введение**

В основу настоящей программы положены следующие дисциплины: теория колебаний; теория волн; статистическая радиоп физика; принципы усиления, генерации и управления сигналами; антенны и распространение радиоволн; выделение сигналов на фоне помех. Программа разработана экспертным советом по физике Высшей аттестационной комиссии при участии Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова и Московского физико-технического института (государственного университета).

**1. Теория колебаний**

1. Линейные колебательные системы с одной степенью свободы. Силовое и параметрическое воздействие на линейные и слабо нелинейные колебательные системы.
2. Автоколебательная система с одной степенью свободы. Энергетические соотношения в автоколебательных системах. Методы расчета автоколебательных систем.
3. Воздействие гармонического сигнала на автоколебательные системы. Синхронизация. Явления затягивания и гашения колебаний. Применение затягивания для стабилизации частоты.
4. 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.
5. Колебательные системы с двумя и многими степенями свободы. Нормальные колебания. Вынужденные колебания.
6. Автоколебательные системы с двумя и более степенями свободы. Взаимная синхронизация колебаний двух генераторов.
7. Параметрическое усиление и параметрическая генерация. Параметрические усилители и генераторы. Деление частоты.
8. Устойчивость стационарных режимов автономных и неавтономных колебательных систем. Временные и спектральные методы оценки устойчивости.
9. Собственные и вынужденные колебания линейных распределенных систем. Собственные функции системы (моды). Разложение вынужденных колебаний по системе собственных функций.
10. Распределенные автоколебательные системы. Лазер как пример такой системы. Условия самовозбуждения. Одномодовый и многомодовый режимы генерации.
11. Хаотические колебания в динамических системах. Понятие о хаотическом (странном) аттракторе. Возможные пути потери устойчивости регулярных колебаний и перехода к хаосу.

**2. Теория волн**

1. 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.
2. 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.

3. 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.
4. Волны в периодических структурах. Механические цепочки, акустические и оптические фононы. Полосы пропускания и непрозрачности. Электрические цепочки, сплошная среда со слабыми периодическими неоднородностями. Связанные волны.
5. Приближение геометрической оптики. Уравнения эйконала. Дифференциальное уравнение луча. Лучи и поле волны в слоисто-неоднородных средах.
6. Электромагнитные волны в металлических волноводах. Диэлектрические волноводы, световоды. Линзовые линии и открытые резонаторы. Гауссовские пучки.
7. Метод Кирхгофа в теории дифракции. Функции Грина. Условия излучения. Дифракция в зоне Френеля и Фраунгофера. Характеристики поля в фокусе линзы.
8. Волны в нелинейных средах без дисперсии. Образование разрывов. Ударные волны. Уравнение Бюргера для диссипативной среды и свойства его решений. Генерация гармоник исходного монохроматического сигнала, эффекты нелинейного поглощения, насыщения и детектирования.
9. Уравнение Кортевега-де Вриза и синус-Гордона. Стационарные волны. Понятие о солитонах<sup>11</sup>. Взаимодействия плоских волн в диспергирующих средах. Генерация второй гармоники. Параметрическое усиление и генерация.
10. Самовоздействие волновых пучков. Самофокусировка света. Приближения нелинейной квазиоптики и нелинейной геометрической оптики. Обращение волнового фронта. Интенсивные акустические пучки; параметрические излучатели звука.

### 3. Статистическая радиофизика

1. Случайные величины и процессы, способы их описания. Стационарный случайный процесс. Статистическое усреднение и усреднение во времени. Эргодичность. Измерение вероятностей и средних значений.
2. Корреляционные и спектральные характеристики стационарных случайных процессов. Теорема Винера-Хинчина. Белый шум и другие примеры спектров и корреляционных функций.
3. Модели случайных процессов: гауссовский процесс, узкополосный стационарный шум, импульсные случайные процессы, дробовой шум.
4. 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).
5. Марковские и диффузионные процессы. Уравнение Фоккера-Планка.
6. Броуновское движение. Флуктуационно-диссипационная теорема. Тепловой шум; классический и квантовый варианты формулы Найквиста. Тепловое излучение абсолютно черного тела.
7. 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.
8. Рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Борновское приближение, метод плавных возмущений. Рассеяние волн на шероховатой поверхности. Понятие об обратной задаче рассеяния.
9. 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

1. Принцип работы, устройство и параметры лазеров (примеры: гелий-неоновый лазер, лазер на рубине, полупроводниковый лазер).
2. Оптические резонаторы. Резонатор Фабри-Перо, конфокальный и концентрический резонаторы. Неустойчивый резонатор. Продольные и поперечные типы колебаний. Спектр частот и расходимость излучения. Добротность.
3. 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.
4. Молекулярный генератор. Квантовые стандарты частоты (времени).
5. Волноводы, длинные линии и резонаторы. Критическая частота и критическая длина волновода.  $TE$ -,  $TH$ ,- и  $TEM$ -волны. Диэлектрические волноводы. Периодические структуры и замедляющие системы. Волновое сопротивление.
6. Усилители СВЧ-диапазона (резонаторный, бегущей волны). Полоса пропускания усилителя бегущей волны.
7. 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.
8. Взаимодействие волн пространственного заряда с акустическим полем, акустоэлектрический эффект. Принципы работы акустоэлектронных устройств (усилители ультразвука, линии задержки, фильтры, конвольверы, запоминающие устройства).
9. 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.
10. Линейный электрооптический и магнитооптический эффекты и их применение для управления светом.

#### 5. Антенны и распространение радиоволн

1. 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.
2. 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

1. Задачи оптимального приема сигнала. Апостериорная плотность вероятности. Функция правдоподобия. Статистическая проверка гипотез. Критерии Байеса, Неймана-Пирсона и Вальда проверки гипотез.
2. Априорные сведения о сигнале и шуме. Наблюдение и сообщение. Задачи интерполяции, фильтрации и экстраполяции.
3. 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.

4. 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.
5. Основные задачи нелинейной фильтрации и синтеза систем.

### Основная литература

1. Н. В. Карлов, Н.А. Кириченко. Колебания, волны, структуры. – М.: Физматлит, 2001.
2. М. Б. Виноградова, О.В. Руденко, А.П. Сухоруков. Теория волн. – М.: Наука, 1990.
3. М. И. Рабинович, Д.И. Трубецков. Основы теории колебаний и волн. – М.: Наука, 1987.
4. Н. Н. Моисеев. Асимптотические методы нелинейной механики. – М.: Наука, 1981
5. С.А. Ахманов, Ю.Е. Дьяков, А.С. Чиркин. Введение в статистическую радиофизику и оптику, – М.: Наука, 1981.
6. Н. М. Цейтлин. Антенная техника и радиоастрономия. – М.: Радио и связь, 1976.
7. В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. – М.: Радио и связь, 1991.
8. А. Ярив, П.Юх. Оптические волны в кристаллах. – М.: Мир, 1987.
9. Г. Кайно. Акустические волны. Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов. – М.: Мир, 1990.
10. В. В. Никольский, Т.И. Никольская. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука, 1989.

### Дополнительная литература

1. А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин. Теория колебаний. – М.: Наука, 1981.
2. В. В. Мигулин, В. И. Медведев, Е. Р. Мустель, В. Н. Парыгин. Основы теории колебаний. – М.: Наука, 1988.
3. Г. М. Заславский, Р. З. Сагдеев. Введение в нелинейную физику: От маятника до турбулентности и хаоса. – М.: Наука, 1988.
4. Н. Н. Боголюбов, Ю. А. Митропольский. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. – М.: Наука, 1974.
5. С. М. Рытов. Введение в статистическую радиофизику. Часть 1. Случайные процессы. – М.: Наука, 1976.
6. С. М. Рытов, Ю. А. Кравцов, В. И. Татарский. Введение в статистическую радиофизику. Часть 2. Случайные поля. – М.: Наука, 1978.
7. Дж. Гауер. Оптические системы связи. – М.: Радио и связь, 1989.
8. Л. Д. Бахрах, С. Д. Кременецкий. Синтез излучающих систем. – М.: Радио и связь, 1974.
9. В. И. Балакший, В. Н. Парыгин, Л. Е. Чирков. Физические основы акустооптики. – М.: Радио и связь, 1985.
10. Ф. Качмарек. Введение в физику лазеров. – М.: Мир, 1981.
11. Л. А. Вайнштейн, В. А. Солнцев. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. – М.: Сов. радио, 1973.
12. В. А. Зверев. Радиооптика. – М.: Сов. радио, 1975.
13. М. Букингам. Шумы в электронных приборах и системах. – М.: Мир, 1986.
14. Н. В. Карлов. Лекции по квантовой электронике. – М.: Наука, 1983.
15. Б. Р. Левин. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Радио и связь, 1989.
16. Л. В. Ландау, Е. М. Лифшиц. Статистическая физика. – М.: Наука, 1999, том V, часть 1.
17. Е. Л. Фейнберг. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. – М.: Наука, 1999.

# ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА кандидатского экзамена по специальности

## 1.3.4 Радиоп физика

### Раздел 1. 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

1. 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 одно- и трехосном кристаллах, в гиротропной среде. Эффект Фарадея, эффект Коттона-Муттона.

Принцип Гюйгенса-Френеля для скалярных и векторных полей.

Дифракция света на решетках, щелях, отверстиях и экранах.

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 сечения рассеяния тела.

Закрытые и открытые линии передач. Потери в линиях передач электромагнитной энергии. Диагностика модового состава излучения в волноводах и качества квазиоптических волновых пучков; электродинамические методы управления их параметрами.

### ВОЛНЫ В ПЛАЗМЕ

1. 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.

2. 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 Альвена, быстрая и медленная магнитозвуковые волны.

### ВОЛНЫ В ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ

1. Полная замкнутая система уравнений механики для жидкостей и газов: уравнение непрерывности, уравнение Навье-Стокса для баланса импульсов, закон сохранения энергии в дифференциальной и интегральной форме. Линеаризация уравнений механики жидкостей и газов относительно малых возмущений средних параметров среды. Акустические волны в жидкостях и газах. Поверхностные гравитационные волны. Простая волна. Опрокидывание. Ударная волна

2. 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.

1. Закон Гука и уравнения механики упругих тел. Объемные и сдвиговые деформации. Тензор деформаций и тензор напряжений. Два типа нормальных волн в упругом теле. Особенности волн в пьезокристаллах, поверхностные волны.

2. 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.

### Литература к разделу 1.

1. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. - М.: Наука, 1979, 1-е издание; М.: Наука, 1990, 2-е издание.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. - М.: Наука, 1986.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. - М.: Наука, 1987.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.
5. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. - М.: Советское радио, 1988.
6. Гинзбург В.Л. Электромагнитные волны в плазме. - М.: Наука, 1967.
7. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. - М.: Наука, 1973.
8. Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионо-сфере и космической плазме. - М.: Наука, 1984.
9. Железняков В.В. Электромагнитные волны в космической плазме. М.: Наука, 1977.
10. Лайтхилл Д. Волны в жидкостях. - М.: Мир, 1981.
11. Кролл Н., Трайвелпис . Основы физики плазмы. - М.: Мир, 1975.
12. Гинзбург В.Л. Теоретическая физика и астрофизика. - М.: Наука, 1975.

## **Раздел 2. Теория колебаний и нелинейная динамика**

1. Адиабатические инварианты в системах с одной степенью свободы. Геометрический смысл адиабатического инварианта. Колебательные системы с быстро меняющимися параметрами. Усредненная «высокочастотная» сила. Связь с теорией адиабатических инвариантов.

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

3. 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.

4. Цепочки связанных осцилляторов. Функция Блоха. Длинноволновое приближение.

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

6. Ударные волны. Образование разрывов. Оценка длины опрокидывания. Оценка времени опрокидывания. Структура фронта ударной волны в рамках уравнения Бюргерса. Уравнение Кортевега - Де-Вриза. Солитоны.

7. Основы качественной теории и теории бифуркаций динамических систем на плоскости. Основные бифуркации многомерных динамических систем. Бифуркации состоя-

ний 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.

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

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

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

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

### Литература к разделу 2.

1. А.А.Андронов, А.А.Витт, С.Э.Хайкин. Теория колебаний, - М.: Физматгаз, 1959, (М.: Наука, 1981).

2. М.И.Рабинович, Д.И.Трубецков. Введение в теорию колебаний и волн. - М.: Наука, 1984 (1 изд.), 1992 (2 изд.).

3. Г.М.Заславский, Р.З.Сагдеев. Введение в нелинейную физику. - М.: Мир, 198

4. Н.В.Бутенин, Ю.И.Неймарк, Н.А.Фуфаев. Введение в теорию нелинейных колебаний. - М.: Наука, 1987.

5. Н.Н.Боголюбов, Ю.И.Митропольский. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. - М.: Наука, 1974.

6. С.П.Стрелков. Введение в теорию колебаний. - М.: Наука, 1964.

7. Л.И.Мандельштам. Лекции по теории колебаний, - М.: Наука, 1972.

8. М.И.Рабинович. Теория колебаний и волн. Учебное пособие. - Горький, Изд-во ГГУ, 1977.

9. М.И.Рабинович, М.И.Мотова, Т.М.Тарантович. Колебания и волны в нелинейных системах. Учебное пособие. - Горький, Изд-во ГГУ, 1978.

10. Сборник задач по теории колебаний. Под ред. В.И.Королева, Л.В.Постникова, - М.: Наука, 1978.

11. В.С.Анищенко. Сложные колебания в простых системах. - М.: Наука, 1990.

12. Г.Шустер. Детерминированный хаос. - М.: Мир, 1988.

13. М.Абловиц, Х.Сигур. Солитоны и метод обратной задачи рассеяния.

14. С.Н.Власов, В.Н.Таланов. Самофокусировка волн. РАН-ИПФ, Н.Новгород. 1998.

### **Раздел 3. Статистическая радиофизика.**

1. Случайные процессы и сигналы.

1.1. 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.

1.2. Спектральная плотность мощности. Соотношение между энергетическим спектром и автокорреляционной функцией стационарного процесса (формула Винера).



- ра-Хинчина). Ширина спектра случайного процесса, ее связь с временем корреляции. Узкополосный случайный процесс, его представление с помощью квадратурных компонент, амплитуда и фаза процесса.
- 1.3. Тепловые шумы в квазистационарных цепях. Формула Найквиста.
  - 1.4. Оптимальное обнаружение сигналов. Отношение правдоподобия. Обнаружение детерминированного сигнала на фоне гауссовских помех. Соотношение сигнал/шум, методы его повышения. Корреляционный приемник, согласованный фильтр, отношение сигнала к шуму на выходе согласованного фильтра.
2. Случайные волновые поля.
    - 2.1. Статистические характеристики случайных волновых полей (определения). Среднее поле, пространственно-временная корреляционная функция, моменты высших порядков.
    - 2.2. 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.
    - 2.3. Тепловое электромагнитное поле. Флуктуационно-диссипационная теорема. Обобщенный закон Кирхгофа. Спектральная яркость теплового излучения и его радиояркость температура.
  3. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах.
    - 3.1. Борновское приближение теории рассеяния волн на флуктуациях показателя преломления среды. Избирательный механизм рассеяния.
    - 3.2. 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.
    - 3.3. 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.
    - 3.4. Обратное рассеяние волнового пучка на мелкомасштабных неоднородностях среды при наличии крупномасштабных неоднородностей. Когерентные явления при рассеянии назад.
  4. Отражение волн от шероховатых поверхностей.
    - 4.1. Поверхность с мелкомасштабными неровностями: коэффициент отражения для среднего поля, параметр Рэлея, удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) и ее связь с пространственным спектром неровностей.
    - 4.2. Поверхность с крупномасштабными пологими неровностями: представление УЭПР через функцию распределения уклонов поверхности.
    - 4.3. Двухмасштабная модель шероховатой поверхности и ее УЭПР.

#### Литература к разделу 3.

1. Б.Р. Левин. Теоретические основы статистической радиотехники. - М.: Радио и связь, 1989.
2. С.М.Рытов, Ю.А.Кравцов, В.И.Татарский. Введение в статистическую радиофизику, ч.2 - Случайные поля. - М.: Наука, 1978.
3. А.Исмару. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. - М.: Мир, 1981.
4. Л.А.Чернов. Распространение волн в среде со случайными неоднородностями. - М.: Наука, 1975.
5. С.М.Рытов. Теория электрических флуктуаций и теплового излучения. - М.: Изд. АН СССР, 1953.
6. Л.А.Апресян, Ю.А.Кравцов. Теория переноса излучения. - М.: Наука, 1983.

7. В.И.Кляцкин. Статистическое описание динамических систем с флуктуирующими параметрами. - М.: Наука, 1975.
8. В.И.Кляцкин. Стохастические уравнения и волны в случайно-неоднородных средах. - М.: Наука, 1980.
9. Ф.Г.Басс, И.М.Фукс. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. - М.: Наука, 1972.
10. Рабинович М.И Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. - М.: Наука, 1984.

#### Раздел 4. 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.

Флуктуация 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. Оптические уравнения Максвелла-Блоха.

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

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

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

\* стимулированное излучение электронных потоков; два подхода:

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

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

2. Электронные СВЧ усилители; основные схемы:
  - а) усилитель попутной волны,
  - б) секционированные усилители клистронного типа,
  - в) регенеративные усилители.
3. Электронные СВЧ генераторы; принципы обратной связи и основные схемы:
  - а) усилитель с положительной обратной связью,
  - б) генератор обратной (встречной) волны,
  - в) предельный случай генератора с высокодобротным резонатором.
4. Приборы, основанные на стимулированном черенковском и переходном излучениях электронов: магнетрон, ЛБВ и ЛОВ типа "О", клистрон.
5. Приборы, основанные на стимулированном тормозном излучении электронов: мазеры на циклонном резонансе и лазеры на свободных электронах.

### **Твердотельная электроника**

1. Твердотельный триод - транзистор:
  - биполярный,
  - полевой,
  - гетеротранзистор.
2. Генератор Ганна (генератор на отрицательной дифференциальной проводимости).
3. Генераторы, основанные на отрицательной проводимости, связанной с туннелированием:
  - туннельный диод,
  - резонансно-туннельный диод.
  - ЛПД,
  - усиление акустических волн дрейфом носителей в полупроводниках ( $V_{dr} > V_{sound}$ ).

### **Генераторы акустических колебаний и волн**

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

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

Параметрические генераторы звука.

#### Литература к разделу 4.

1. Ярив А. Квантовая электроника. М.: Советское радио, изд.2-е, 1980.
2. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. М.: Наука, 1983.
3. Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Советское радио, 1973.
4. Шевчик В.Н., Трубецков Д.И. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. М.: Советское радио, 1970.
5. Релятивистская высокочастотная электроника: Сб. статей под. ред. Гапонова-Грехова А.В., Горький: ИПФ АН СССР, 1979.
6. Гапонов А.В., Петелин М.И., Юлпатов В.К. Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике. Изв. ВУЗов, Радиофизика, т.10, с.1414 (1967).
7. Генераторы когерентного излучения на свободных электронах: Сб. статей. Пер. с англ. под ред. А.А.Рухадзе. М.: Мир, 1983.
8. Конуэлл Э. Кинетические свойства полупроводников в сильных полях. М.: Мир, 1970.
9. Шур М. Современные приборы на арсениде галлия. М.: Мир, 1991.
10. Пожела В.К. Плазма и токовые неустойчивости в полупроводниках. М.: Наука, 1977.
11. Вахитов Я.Ш. Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура. М.: Искусство, 1982.

12. Римский-Корсаков А.В., Ямщиков В.С., Жулин В.И., Рехтман В.И. Акустические подводные низкочастотные излучатели Библиотека инженера-гидроакустика). Л.: Судостроение, 1984.

13. Свирдлин Г.М. Гидроакустические преобразователи и антенны. Л.: Судостроение, 1980.

## Раздел 5. Дополнительные главы

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ДВИЖУЩИХСЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ.

1. Электромагнитные поля равномерно и неравномерно движущегося точечного заряда в вакууме. Потенциалы Лиенара-Вихерта.

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

### ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ

1. Теория эффекта Вавилова - Черенкова. Интегральная форма решения задачи об ЭМ 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.

2. Дипольное приближение в теории тормозного излучения при соударениях заряженных частиц.

3. 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.

4. Особенности излучения заряженных частиц в среде: нормальный и аномальный эффект Доплера, депрессия циклотронного излучения в необыкновенной волне на первой гармонике, подавление синхротронного излучения в плазме.

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В СПЛОШНЫХ СРЕДАХ

1. Уравнения Максвелла-Лоренца, их усреднение по межатомным масштабам. Поля – действующее и среднее макроскопическое. Диэлектрическая и магнитная проницаемости, проводимость среды.

2. Среды с временной и пространственной дисперсией. Описание электромагнитного поля на языке спектральных Фурье-компонент. Комплексные диэлектрическая и магнитные проницаемости среды. Фазовая и групповая скорости электромагнитных волн в диспергирующей среде. Плотность энергии электромагнитного поля в диспергирующей среде.

### ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

1. Лемма Лоренца и теорема взаимности для гармонических полей.

Излучение электромагнитных волн антеннами с заданными распределениями гармонических токов. Сопротивление излучения. Поля излучения в дальней зоне. Связь между угловым распределением излучения и пространственным Фурье-спектром плотности тока.

2. Возбуждение волноводов и резонаторов штыревыми и щелевыми антеннами. Возбуждение волноводов при облучении открытого торца квазиоптическим волновым пучком. Излучение открытого конца волновода. Согласующие рупоры. Рупорно-линзовые антенны.

3. Зеркальные параболические антенны, их максимально достижимая направленность, требования к точности изготовления поверхности, способы облучения поверхности. Диаграммы направленности на передачу и на прием. Увеличение углового разрешения с использованием интерферометров.

Литература к разделу 5.

1. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теория поля. М.: Наука, 1988.
2. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. М., Наука, 1982.
3. Дж. Джексон. Классическая электродинамика. М., Мир, 1965.
4. В.Л.Гинзбург. Распространение электромагнитных волн в плазме. М., Наука, 1967.
5. В.Л.Гинзбург. Теоретическая физика и астрофизика. М. Наука, 1975
6. В.В.Железняков. Электромагнитные волны в космической плазме. М., Наука, 1977.
4. Л.А.Вайнштейн. Электромагнитные волны. М., Сов. Радио, 1988.
7. А.Г.Кисляков, В.А.Разин, Н.М.Цейтлин. Введение в радиоастрономию. М., Физико-математическая литература, 1995.