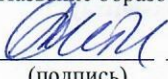




МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Дальневосточный федеральный университет»**  
(ДФУ)

**ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА**

«СОГЛАСОВАНО»

Руководитель ОП  
Радиофизика  
Названии образовательной программы»  
  
Стаценко Л.Г.  
(подпись) (Ф.И.О.)  
«17» мая 2019г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Заведующая кафедрой  
электроники и средств связи  
Названии кафедры)  
  
Стаценко Л.Г.  
(подпись) (Ф.И.О.)  
«17» мая 2019г.



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**  
**Нелинейная динамика в радиофизике**

Направление подготовки 03.06.01 Физика и астрономия

Профиль «Радиофизика»  
Форма подготовки (очная)

курс 2 семестр 3  
лекции 18 час. / 0,5 з.е.  
практические занятия 10 час. / 0,28 з.е.  
лабораторные работы – не предусмотрено учебным планом  
с использованием МАО лек. 4 час. / пр. 6 час.  
всего часов контактной работы 18 час.  
в том числе с использованием МАО 10 час.  
самостоятельная работа 90 час.  
курсовая работа / курсовой проект – не предусмотрено учебным планом  
зачет 3 семестр  
экзамен – не предусмотрено учебным планом

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия (уровень подготовки кадров высшей квалификации), утвержденного приказом министерства образования и науки РФ от 03 июля 2014г. № 867

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры электроники и средств связи, протокол № 14 от 17 мая 2019г.

Заведующая кафедрой Стаценко Л.Г.  
Составитель к-т физ.-мат. наук, доцент Титов П.Л.

**Оборотная сторона титульного листа**

**I. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры / академического департамента:**

Протокол от « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой /директор академического департамента

\_\_\_\_\_  
(подпись)

\_\_\_\_\_  
(И.О. Фамилия)

**II. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры (академического департамента):**

Протокол от « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой/директор академического департамента

\_\_\_\_\_  
(подпись)

\_\_\_\_\_  
(И.О. Фамилия)

## АННОТАЦИЯ

Дисциплина «Нелинейная динамика в радиофизике» предназначена для направления подготовки 03.06.01 Физика и астрономия, профиль «Радиофизика». Трудоемкость дисциплины 3 зачетных единицы, 108 академических часа, из них 8 часов лекций, 10 часов практических работ, 90 часов самостоятельная работа. Данная дисциплина входит в вариативную часть блока обязательных дисциплин. Дисциплина реализуется на 2 курсе в 3 семестре.

**Цель** – формирование у аспирантов целостного представления о различных эффектах, процессах, явлениях, затрагивающих понятия «нелинейность», «хаотичность» и «фрактальность», в радиофизике и других областях знаний, а также о способах их оценки, описания, изучения.

### **Задачи:**

1. Изучение основ нелинейной динамики, понятий «детерминированный хаос», «фрактал». Изучение основных способов описания нелинейных динамических систем (в т.ч. с хаотическим поведением) и фрактальных объектов.

2. Изучение классических и перспективных схем генераторов хаотических колебаний в различных диапазонах частот. Анализ спектральных характеристик. Вопросы использования хаоса в перспективных системах связи. Сравнительная характеристика хаотических и квазишумовых сигналов.

3. Изучение нелинейных эффектов взаимодействия волн и материальных сред. Отражение и рассеяние волн фрактальными поверхностями. Применение фракталов в дистанционном зондировании. Распространение волн в турбулентной атмосфере.

Для успешного изучения дисциплины «Нелинейная динамика в радиофизике» у обучающихся должны быть сформированы следующие предварительные компетенции:

– УК-1. Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.

– УК-2. Способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области истории и философии науки.

– УК-3. Готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач.

– УК-4. Готовность использовать современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранном языках.

– УК-5. Способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития.

– ОПК-1. Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий.

– ОПК-2. Готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования.

В результате изучения дисциплины у аспирантов формируются следующие универсальные / общепрофессиональные / профессиональные компетенции (элементы компетенций).

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции	
ПК-3. Готовность исследовать особенности распространения радиосигналов в различных физических средах	Знает	Основные нелинейные явления, эффекты, процессы в области радиофизики, их основные характеристики и закономерности; Различные показатели, методы, при помощи которых описываются поведение нелинейных динамических систем различной природы и структура фрактальных объектов
	Умеет	Использовать существующие математические методы описания нелинейных явлений и процессов в электронных схемах и при взаимодействии волн с материальными средами; Использовать соответствующее программное обеспечение для моделирования нелинейных явлений в области радиофизики
	Владеет	Современным программным обеспечением для моделирования нелинейных явлений в области радиофизики; Навыками применения математического аппарата для описания нелинейных явлений и процессов в электронных схемах и при взаимодействии волн с материальными средами

## **I. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА (8 часов, в том числе 4 часа с использованием методов активного обучения)**

**МОДУЛЬ 1. Взаимодействия волн в нелинейных средах. Солитоны (3 часа)**

**Раздел 1. Волны в нелинейных средах. Элементы нелинейной оптики (1 час)**

**Тема 1. Трех- и четырехчастотные взаимодействия в нелинейных средах (0,5 часа)**

Дисперсия и синхронизм. Описание трехволновых взаимодействий. Законы сохранения в среде без потерь. Генерация второй гармоники.

Взаимодействие волн в непоглощающей среде при точном синхронизме. Влияние линейных потерь. Параметрические процессы в квадратичной среде. Параметрическое преобразование частоты вниз при высокочастотной накачке. Эффективность преобразования частоты вверх и вниз. Основные уравнения четырехволнового взаимодействия. Первые интегралы уравнений в отсутствие диссипации (соотношения Менли-Роу). Генерация третьей гармоники в непоглощающей среде.

## **Тема 2. Элементы нелинейной оптики. Вынужденное комбинационное рассеяние света (ВКР) (0,5 часа)**

Преобразование частот в волновых пучках в квадратичной среде. Основные уравнения. Взаимодействие двух усиливаемых пучков при постоянной высокочастотной накачке. Уравнения одноволнового приближения. Дифракция усиливаемых волн и эффект аномальной фокусировки пучка. Параметрическая диффузия. Обращение волнового фронта при четырехволновом взаимодействии в кубичной среде. Физическая природа ВКР. Основные уравнения процесса ВКР. Стоксово излучение. Законы сохранения в отсутствие диссипации. Порог генерации. Вынужденное комбинационное рассеяние вперед. Преобразование энергии накачки в волну стоксова излучения при ВКР назад. Антистоксово излучение.

## **Раздел 2. Радиоволны в турбулентной атмосфере. Солитоны (2 часа)**

### **Тема 1. Солитоны как решения уравнений динамики (1 час)**

Солитонное решение уравнения Кортевега – де Фриза (КдФ). Основные свойства уравнения КдФ. Фазовая плоскость стационарных волн. Амплитуда, скорость распространения, длительность. Солитонное решение уравнения синус-Гордона. Основные свойства солитонного решения уравнения синус-Гордона. Солитонное и стационарное решения нелинейного уравнения Шредингера. Фазовая плоскость стационарных волн. Уравнение Колмогорова-Петровского-Пискунова (КПП). Решение уравнения КПП в форме солитона. Примеры солитонов в природе.

### **Тема 2. Распространение радиоволн в турбулентной атмосфере (1 часа)**

Волновое уравнение для сплошной случайно неоднородной среды. Рассеяние волн в случайной сплошной среде. Формула Брукера-Гордона. Методы моделирования распространения радиоволн в турбулентной среде в случае слабых флуктуаций. Приближение Рытова. Статистические характеристики уровня и фазы. Сильные флуктуации. Параболическое уравнение. Метод Гюйгенса-Кирхгофа. Приближение фазового экрана.

## **МОДУЛЬ 2. Способы описания нелинейных динамических систем. Динамический хаос и фракталы в электронике, радиосвязи, радиофизике (5 часов)**

### **Раздел 1. Особенности поведения нелинейных динамических систем, условия хаотичности. Электронные генераторы хаоса (2 часа)**

#### **Тема 1. Смена режима поведения нелинейных динамических систем (бифуркации), сценарии перехода к хаосу (1 час)**

Понятие о фазовом пространстве. Бифуркация Пуанкаре-Андронов-Хопфа. Мягкая и жесткая потери устойчивости. Бифуркации предельных циклов. Бифуркация удвоения периода. Бифуркация Неймарка рождения в фазовом пространстве инвариантного тора. Седло-узловые бифуркации коразмерности один. Бифуркация коразмерности два.

Нарушение устойчивости и переход к хаотическому поведению. Сценарий Фейгенбаума перехода к хаосу через бифуркации удвоения периода. Описание поведения динамической системы через точечное отображение. Процедура Кёнигса-Ламерея. Бифуркационная диаграмма. Универсалии Фейгенбаума. Сценарий Рюэля-Такенса перехода к хаосу через разрушение двухчастотных колебаний. Сценарий Помо-Манневиля перехода к хаосу через перемежаемость (за счет увеличения числа хаотических всплесков).

## **Тема 2. Традиционные и странные аттракторы. Аттракторы генераторов хаотических колебаний и систем, демонстрирующих хаотическое поведение (1 час)**

Классические аттракторы: аттракторы типа устойчивый цикл, фокус, тор. Соответствующие им зависимости от времени. Термин «странный аттрактор». Отображение Эно. Отображение Икеды.

Описание динамических систем через системы дифференциальных уравнений. Численное решение системы дифференциальных уравнений.

Система Лоренца-Рёсслера и ее аттрактор. Автоколебательная реакция по А.Тьюрингу. Свойства странных аттракторов.

Осциллятор Уеды. Осциллятор Ван-дер-Поля. Осциллятор Дуффинга. Неавтономный автогенератор с жестким возбуждением. Карты динамических режимов.

Электронные генераторы хаотических колебаний и соответствующие им аттракторы. Генератор Кияшко-Пиковского-Рабиновича. Генератор Дмитриева-Кислова. Схема Л.Чуа.

Анализ работы автогенератора при наличии шума. Метод линеаризации. Статистическая динамика фазовой автоподстройки.

Основные свойства детерминированного хаоса. Способы описания странных аттракторов и поведения хаотических динамических систем. Сечения Пуанкаре. Показатели Ляпунова.

Влияние шума на форму аттракторов хаотических систем.

## **Раздел 2. Основы теории фракталов и ее применение к различным задачам в области радиосвязи, радиофизики (3 часа)**

### **Тема 1. Основы теории фракталов. Фрактальные размерности (1 час)**

Определение фрактала по Б.Мандельброту (раннее и позднее). Классификация фракталов по А.Потапову (математические, физические). Примеры классических математических фракталов – Канторова пыль, снежинка Коха. Вычисление их размерностей. Размерность пространства вложения и топологическая размерность составляющих элементов фрактала.

Парадокс определения длины береговой линии. Примеры фрактальных объектов разной размерности. Парадокс с фрактальными шестиугольниками (нарушение соотношений евклидовой геометрии). Структура сечения Пуанкаре странного аттрактора как кантороподобное множество.

Экспериментальные способы определения фрактальной размерности. Методика Грассбергера-Прокаччо. Информационная размерность. Спектр размерностей Реньи. Мультифрактальные множества. Фрактальность геометрическая и фрактальность структурная. Древесные графы как пример объекта со структурной фрактальностью. Фрактальная размерность как отношение энтропий.

## **Тема 2. Случайные самоподобные процессы с обобщенно-гиперболическим спектром (шумы) (1 час)**

Самоподобие степенных законов. Самоподобие шумов со спектральной плотностью, подчиняющейся обобщенно-гиперболическому закону. Степень их случайности/неслучайности. Аддитивный белый гауссовский шум. Розовый шум как психоакустический эквивалент белого шума. Интеграл от броуновского движения (винеровский процесс) – коричневый шум. Спектр мощности кривых изменения цен на фондовом и валютном рынках. Синий шум. Черный шум, соответствующий катастрофическим явлениям.

Оценка степени случайности процесса при помощи показателя Херста ( $H=R/S$ ). Значения показателя, соответствующие различным шумам. Автокорреляционные функции шумов. Связь показателя Херста и степенного показателя спектральной плотности шума.

Математические и физические способы получения шумов с различным спектром.

## **Тема 3. Применение элементов теории фракталов и теории динамического хаоса в практических задачах радиопизики, радиолокации, радиосвязи (1 час)**

Дробное интегрирование как современный инструмент анализа фрактальных явлений и процессов.

Фрактальные антенны. Их частотные и направленные свойства. Перспективные фрактальные метаматериалы. Отражение волн фрактальными поверхностями.

Вопросы самоподобного размещения ретрансляторов для обеспечения живучести системы связи. Полезные свойства хаотических сигналов для возможного применения в перспективных системах связи. Прямохаотические системы связи, структурная схема, характеристики. Хаотические сигналы как разновидность широкополосных сигналов.

Фракталы в дистанционном зондировании, обнаружение объектов. Фрактальные методы моделирования поверхностей объектов, в том числе подстилающих поверхностей, горных рельефов. Фрактальное обнаружение сигналов на фоне шумов.

Фрактальные свойства радиосигналов, в том числе речевых и телевизионных. Современные методы обработки речевых сигналов, изображений. Фрактальное сжатие изображений. Краткие теоретические сведения. Преимущества и недостатки. Особенности обработки информации различного назначения, в том числе медицинской информации.

## **II. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА**

**(10 часов, в том числе 6 часов с использованием методов активного обучения)**

### **Практические занятия (10 / 6 часов)**

**Занятие 1. Сравнение солитонных решений различных уравнений, с использованием методов активного обучения. Дискуссия (1 час)**

На основе полученных знаний в ходе лекционного курса, а также знаний, приобретенных самостоятельно, аспиранты индивидуально или группами (определяет преподаватель в начале занятия) участвуют в групповом обсуждении решений уравнений динамики в форме солитонов.

Цель обсуждения – по возможности полно, всесторонне обсудить вопросы сравнения и классификации солитонов: параметры, влияющие на их ширину (длительность), амплитуду, скорость распространения. А также возможную применимость в практических задачах передачи информации.

В процессе дискуссии (только в случае обсуждения группами не менее 3-5 человек в каждой) часть группы (1-2 человека) по согласованию с преподавателем может заниматься вычислениями, моделированием обсуждаемого явления на компьютере для повышения аргументированности дискуссии.

**Занятие 2. Анализ сценария Фейгенбаума. Построение процедуры Кенигса-Ламерея при различных значениях управляющего параметра, с использованием методов активного обучения. Дискуссия (1 час)**

В начале занятия преподаватель дает основные теоретические сведения о сценарии Фейгенбаума и о методике построения диаграммы Кенигса-Ламерея. Затем индивидуально каждому аспиранту даются значения управляющего параметра (3 значения), для которых он должен графически реализовать процедуру (в тетради, при помощи художественных средств ПК или на доске). Далее осуществляется переход в фазу обсуждения результатов. Следствием графических способов построения являются неизбежные неточности в динамике системы, особенно вблизи точек бифуркации и других характерных точек. В результате чего возникнут противоречия между диаграммами аспирантов. Цель дискуссии – обсудить возникшие противоречия и по возможности прийти к корректному результату, удовлетворяющему всех. Второстепенная цель – умение признать возможность ошибки и правоту оппонента. На этапе групповой дискуссии пользоваться вычислительными средствами анализа сценария Фейгенбаума



запрещается. После того, как результаты были обсуждены, преподаватель строит диаграмму на компьютере при помощи пакета моделирования MathCAD (или аналога) для всех заданных аспирантам значений управляющего параметра и делает общие выводы.

### **Занятие 3. Построение и анализ бифуркационной диаграммы Фейгенбаума. Расчет универсальных констант, с использованием методов активного обучения. Решение задач на проблемные темы (1 час)**

Задачи выполняются в форме компьютерного моделирования с возможностью индивидуального и группового консультирования преподавателем в процессе решения. Предварительно преподаватель дает необходимые теоретические сведения в лекционном курсе, а также непосредственно в начале практического занятия. Знакомит со средой моделирования (MathCAD или аналоги), если у аспирантов отсутствуют навыки работы с ней.

Типовое задание №1:

Построить бифуркационную диаграмму Фейгенбаума при следующих заданных входных параметрах:

- а) минимальное значение управляющего параметра;
- б) максимальное значение управляющего параметра;
- в) количество точек по управляющему параметру;
- г) количество циклов (итераций) отображения в каждой точке;
- д) количество отображаемых циклов в каждой точке.

Например:

- а) 3,0;
- б) 3,5;
- в) 100;
- г) 500;
- д) 50.

В результате выполнения данного задания аспирантами в среде MathCAD должна быть написана небольшая процедура, вычисляющая соответствующие точки бифуркационной диаграммы для заданных параметров.

Типовое задание №2:

Определить расстояние (по управляющему параметру) между  $m$ -й и  $n$ -й (считая от нуля) точками бифуркаций с точностью 0,01.

В процессе решения аспирантам необходимо с заданной точностью определить значение управляющего параметра, при котором происходит резкое изменение поведения системы (это и есть точка бифуркации).

Типовое задание №3:

Определить расстояние по ординате от  $m$ -й позиции бифуркации до каждой из двух следующих из нее точек в  $(m+1)$ -й позиции (считая от нуля).

Типовое задание №4:

Определить расстояние по ординате от  $m$ -й точки бифуркации до  $(m+1)$ -й и от  $(m+1)$ -й до  $(m+2)$ -й (считая от нуля), если двигаться по верхним ветвям бифуркационной диаграммы.

Типовое задание №5:

При каком значении управляющего параметра может наблюдаться цикл с кратностью 8?

Типовое задание №6:

Исследуя предел отношения расстояний по управляющему параметру между точками  $m$  и  $(m+1)$ , при  $m \rightarrow \infty$ , определить одно из универсальных чисел Фейгенбаума.

**Занятие 4. Построение и анализ фрактальных аттракторов Эно и Икеды, аттрактора Лоренца-Рёсслера. Анализ влияния шума на форму и устойчивость аттракторов, с использованием методов активного обучения. Дискуссия (1 часа)**

В данном занятии подразумевается дискуссия по результатам выполнения предварительного компьютерного моделирования. Вначале преподаватель разбивает группу аспирантов на подгруппы. Каждой из них дается индивидуальное задание – построить один из странных аттракторов Эно, Икеды, Лоренца-Рёсслера. Каждая группа должна построить несколько вариантов аттракторов для различных сочетаний управляющих параметров, соответствующих как регулярным, квазипериодическим режимам, так и режимам с различной степенью хаотичности. Сочетания управляющих параметров могут быть как заданы преподавателем, так и выбраны самостоятельно (предварительно, до начала занятия, на основе самостоятельного изучения вопроса).

Далее, в каждый из управляющих параметров при моделировании добавляется контролируемый уровень шума. Целесообразно для простоты использовать генератор случайных чисел с равномерной плотностью –  $\text{rnd}$ . Постоянная составляющая (сам параметр) и уровень шума (среднее, ширина) выбираются таким образом, чтобы средний уровень величины параметра оставался на прежнем уровне. А полуширина интервала случайной величины выбирается равной последовательно: 10%, 25%, 50%, 75%, 100% от величины суммарного среднего (параметр+шум) значения. Для всех значений строятся аттракторы и визуально сравниваются. Процедура проводится для всех заданных преподавателем параметров. Можно также вносить шум в различные параметры одновременно в контролируемой пропорции. Также при наличии времени исследуется влияние шума на режимы с различной степенью хаотичности.

Полученные результаты обсуждаются в группе и делаются выводы о сравнительной устойчивости аттракторов различных систем при наличии шума заданной величины, а также об устойчивости систем по различным параметрам.

**Занятие 5. Моделирование поведения схемы Л. Чуа в программе MathCAD (или аналоге). Расчет параметров схемы для заданного режима и моделирование в программе ElectronicWorkbench (или аналоге), с использованием методов активного обучения. Проектирование (1 час)**

В результате выполнения задания у каждого аспиранта должны быть рассчитаны номиналы элементов, выбраны активные элементы, собрана рабочая схема генератора хаотических сигналов по схеме Л. Чуа в программе Electronic Workbench (Multisim).

В начале занятия преподаватель кратко описывает задание и приводит основные этапы расчета элементов схемы. Частотный диапазон генератора каждый выбирает самостоятельно, в результате чего у каждого из аспирантов должна быть схема с уникальными значениями параметров.

Аспирантам предлагается реализовать нелинейный элемент на конверторах отрицательных сопротивлений, собранных на операционных усилителях. При желании учащиеся могут предложить свою реализацию (обдуманную заранее, до проведения занятия).

Также в процессе работы необходимо установить интервалы значений элементов (хотя бы для одного из регулирующих элементов – какой-либо емкости, индуктивности, сопротивления), в которых наблюдаются различные режимы поведения – стационарный режим (постоянное значение), периодические колебания, хаотические аттракторы различных типов (в частности, аттрактор Double Scroll).

**Занятие 6. Вычисление размерности фрактального объекта, вложенного в двумерное пространство, по методу Грассбергера-Прокаччо. Построение случайных и детерминированных фракталов. Вычисление информационной размерности, с использованием методов активного обучения. Решение задач на проблемные темы (1 час)**

Задачи выполняются в форме компьютерного моделирования с возможностью индивидуального и группового консультирования преподавателем в процессе решения. Предварительно преподаватель дает необходимые теоретические сведения в лекционном курсе, а также непосредственно в начале практического занятия. Знакомит со средой моделирования (MathCAD или аналоги), если у аспирантов отсутствуют навыки работы с ней.

Типовое задание №1:

Дано двумерное монохромное (черно-белое) изображение какого-либо фрактального объекта (пример: изображение рек, ветвь дерева, снежинка, фрактальный орнамент, облако, береговая линия, плавучие льдины, карта звездного неба и пр.). Реализовать в вычислительной среде MathCAD процедуру вычисления фрактальной размерности (ограничение – либо заданная точность, либо отношение максимального и минимального масштабов рассмотрения).

Для решения задачи изображение дробится на отдельные фрагменты. Если часть объекта попадает в какой-либо фрагмент, то он считается занятым. Далее, подсчитывается число занятых фрагментов как функция от размера фрагмента. Наклон прямой, построенной в двойных логарифмических осях, и будет значением фрактальной размерности. Следует помнить, что в реальных объектах прямая получится только на

достаточно ограниченном участке, что нужно учитывать при обработке результатов.

Типовое задание №2:

Построить изображение фрактала Кантора (Канторова «пыль») для заданного числа итераций  $n$ . Не рекомендуется задавать  $n$  больше 7-10 (необоснованно возрастет время вычислений).

Типовое задание №3:

Построить изображение фрактала Коха («снежинка» Коха) для заданного числа итераций  $n$ . Не рекомендуется задавать  $n$  больше 7-10 (необоснованно возрастет время вычислений).

Типовое задание №4:

Построить изображение кривой «дракона» для заданного числа итераций  $n$ . Не рекомендуется задавать  $n$  больше 10 (необоснованно возрастет время вычислений).

Типовое задание №5:

Построить изображение «ковра» Серпинского для заданного числа итераций  $n$ . Не рекомендуется задавать  $n$  больше 7-10 (необоснованно возрастет время вычислений).

Типовое задание №6:

Построить изображение «ковра» Серпинского как аттрактивного множества следующего отображения (т.н. «игра в хаос»). Вначале внутри треугольника выбирается произвольная точка. Затем случайно выбирается одна из вершин треугольника. Находится середина отрезка, образованного начальной точкой и выбранной вершиной треугольника. Эта середина является начальной точкой для второй итерации. Далее снова случайным образом выбирается вершина треугольника и процесс повторяется. Для построения достаточно «плотного» изображения необходимо провести несколько тысяч итераций.

**Занятие 7. Определение спектральных характеристик хаотических и шумовых временных рядов. Идентификация вида шума. Реконструкция аттрактора по временному ряду. Вычисление фрактальных размерностей временных рядов. Использование программы fractan, с использованием методов активного обучения. Решение задач на проблемные темы (3 часа)**

Задачи выполняются в форме компьютерного моделирования с возможностью индивидуального и группового консультирования преподавателем в процессе решения. Предварительно преподаватель дает необходимые теоретические сведения в лекционном курсе, а также непосредственно в начале практического занятия. Знакомит со средой моделирования (MathCAD или аналоги), если у аспирантов отсутствуют навыки работы с ней.

Типовое задание №1:

Дана реализация шумоподобного или хаотического сигнала (например, в виде значений в форме txt-файла). Найти спектральную плотность сигнала, пользуясь известными функциями, встроенными в пакет моделирования. По

форме спектра сделать соответствующие выводы о возможной природе сигнала (почти регулярный; шумовой, если шумовой, то какой тип шума; хаотический).

Типовое задание №2:

Дана реализация шумоподобного или хаотического сигнала (например, в виде значений в форме txt-файла). Выбрать фазовое пространство, провести реконструкцию аттрактора, пользуясь теоремой Рюэля-Такенса. На основе полученного аттрактора сделать выводы о природе сигнала (почти регулярный; хаотический; шумовой).

Типовое задание №3:

Дан тип шума (примеры: белый, розовый, коричневый, черный). Сгенерировать временную реализацию данного типа шума достаточной длины (несколько тысяч значений). Рассчитать для нее показатель Херста. Сравнить с теоретическим значением.

После решения задач (получения некоторых первичных навыков работы с временными реализациями сигналов) переходят к дискуссии.

Преподаватель дает аспирантам 10-20 листов, на каждом из которых отпечатана (с хорошим качеством и разрешением) реализация хаотического, шумового (с различными показателями спектральной плотности, например, 1; 1,25; 1,5; 2; 2,25; 2,5; 2,75; 3,0) или квазипериодического сигнала. В ходе дискуссии аспирантам предлагается определить, к какому классу сигналов относится данная реализация; дополнительно для хаотических – к какой из известных систем; дополнительно для шумовых – к какой величине показателя спектральной плотности. После обмена мнениями и согласования аспиранты выдвигают свои версии, а преподаватель их корректирует, сопровождая комментариями по виду реализаций и соответствующими выводами.

**Занятие 8. Определение фрактальных размерностей оптических изображений естественных и искусственных объектов. Определение фрактальных характеристик речевых и телевизионных сигналов. Фрактальное сжатие изображений, с использованием методов активного обучения. Дискуссия (1 час)**

На основе полученные знания в ходе лекционного курса, а также знания, приобретенных самостоятельно, аспиранты индивидуально или группами (определяет преподаватель в начале занятия) участвуют в групповом обсуждении отличий фрактальных характеристик естественных и искусственных объектов. В процессе дискуссии (только в случае обсуждения группами не менее 3-5 человек в каждой) часть группы (1-2 человека) по согласованию с преподавателем может заниматься вычислениями, моделированием обсуждаемого явления/процесса/способа обработки на компьютере для повышения аргументированности дискуссии.

Цель: обсудить вопросы расчета фрактальных характеристик искусственных и естественных объектов, вопросы классификации этих объектов по фрактальным признакам; вопросы фрактальной обработки речевых и телевизионных сигналов; фрактальное сжатие изображений. Также

подвергаются обсуждению возможности, перспективы и области применения всех рассматриваемых характеристик в практических задачах обнаружения, классификации, хранения, обработки, передачи информации.

### **III. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ**

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «Нелинейная динамика в радиофизике» представлено в приложении 1 и включает в себя:

план-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине, в том числе примерные нормы времени на выполнение по каждому заданию;

характеристика заданий для самостоятельной работы обучающихся и методические рекомендации по их выполнению;

требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы;

критерии оценки выполнения самостоятельной работы.

### **IV. КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛИ КУРСА**

№ п/п	Контролируемые разделы / темы дисциплины	Коды, наименование и этапы формирования компетенций		Оценочные средства	
				текущий контроль	промежуточная аттестация
1	Теоретическая часть	ПК-3	Знает основные нелинейные явления, эффекты, процессы в области радиофизики, их основные характеристики и закономерности	Собеседование	Собеседование
2	Практическая часть	ПК-3	Умеет использовать существующие математические методы описания нелинейных явлений и процессов в электронных схемах и при взаимодействии волн с материальными средами	Реферат	Собеседование
			Владеет навыками применения математического	Контрольная работа	

			аппарата для описания нелинейных явлений и процессов в электронных схемах и при взаимодействии волн с материальными средами		
--	--	--	---	--	--

Фонд оценочных средств по дисциплине представлен в приложении 2.

## **V. СПИСОК УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Основная литература**

1. Андрианов И. Методы асимптотического анализа и синтеза в нелинейной динамике и механике деформируемого твердого тела [Электронный ресурс] / И. Андрианов, Я. Авреичевич. — Электрон. текстовые данные. — Москва, Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, Ижевский институт компьютерных исследований, 2013. — 276 с. — 978-5-4344-0116-6. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/28899.html>
2. Аврамов К.В. Нелинейная динамика упругих систем. Том 1. Модели, методы, явления [Электронный ресурс] / К.В. Аврамов, Ю.В. Михлин. — Электрон. текстовые данные. — Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований, 2015. — 716 с. — 978-5-4344-0299-6. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/69361.html>
3. Аврамов К.В. Нелинейная динамика упругих систем. Том 2. Приложения [Электронный ресурс] / К.В. Аврамов, Ю.В. Михлин. — Электрон. текстовые данные. — Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований, 2015. — 700 с. — 978-5-4344-0301-6. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/69362.html>
4. Мищенко, Е.Ф. Автоволновые процессы в нелинейных средах с диффузией: Монография / Е.Ф. Мищенко, В.А. Садовничий, А.Ю. Колесов [и др.]. — М. : Физматлит, 2010. — 397 с. Режим доступа: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=48283](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=48283)

### **Дополнительная литература**

1. Ахманов, С.А. Статистическая радиофизика и оптика: Учебное пособие / С.А. Ахманов, Ю.Е. Дьяков, А.С. Чиркин. — М.: Физматлит, 2010. — 423 с. Режим доступа: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=48263](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=48263)

2. Багдоев, А.Г. Линейные и нелинейные волны в диспергирующих сплошных средах. / А.Г. Багдоев, В.И. Ерофеев, А.В. Шекоян. — М. : Физматлит, 2009. — 318 с. Режим доступа: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=2665](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=2665)
3. Божокин С.В. Фракталы и мультифракталы [Электронный ресурс]: Учебное пособие / Божокин С.В., Паршин Д.А.— Электрон. текстовые данные.— Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001.— 128 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/17672>. Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/17672>
4. Карпман В.И. Нелинейные волны в диспергирующих средах. М.: Наука, 1973. — 175 с. Режим доступа: <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:84081&theme=FEFU> – 1 экз.
5. Киселев Г.Л. Квантовая и оптическая электроника. - М: Лань, 2011. – 314 с. Режим доступа: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=627](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=627)
6. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Т.8 Электродинамика сплошных сред: Учебное пособие / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — М.: Физматлит, 2005. — 651 с. Режим доступа: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=2234](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=2234)
7. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Современные проблемы нелинейной динамики. М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 335 с. Режим доступа: <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:14314&theme=FEFU> – 1 экз.
8. Муромцев, Д.Ю. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие / Д.Ю. Муромцев, Ю.Т. Зырянов, П.А. Федюнин [и др.]. — СПб.: Лань, 2014. — 448 с. Режим доступа: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=50680](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=50680)

### **Профессиональные базы данных и информационные справочные системы**

1. База данных Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
2. База данных Web of Science <http://apps.webofknowledge.com/>
3. База данных полнотекстовых академических журналов Китая <http://oversea.cnki.net/>
5. Электронная библиотека диссертаций Российской государственной библиотеки <http://diss.rsl.ru/>
6. Электронные базы данных EBSCO <http://search.ebscohost.com/>
7. Научная электронная библиотека <https://elibrary.ru/defaultx.asp>
8. Академия Google. Поисковая система по полным текстам научных публикаций всех форматов и дисциплин <https://scholar.google.ru/>

## **VI. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**



Для изучения дисциплины «Нелинейная динамика в радиофизике» обучающемуся предлагаются лекционные и практические занятия. Обязательным элементом является самостоятельная работа. Из 108 общих учебных часов 90 часов отводится на самостоятельную работу аспиранта. В рамках часов, выделенных на самостоятельную работу, аспирант должен производить подготовку к зачетным проверкам, собеседованиям, а также изучать темы, отведенные преподавателем на самостоятельное изучение.

Примерное распределение часов самостоятельной работы, которые аспирант должен отводить на тот или иной вид занятий: закрепление лекционного материала и подготовка к собеседованиям – 36 часов, подготовка к практическим работам – 31 час, 12 часов подготовка реферата, 11 часов на подготовку к зачету. Тем не менее, учитывая особенности каждого аспиранта, указанные часы могут варьироваться.

Дисциплину рекомендуется изучать по плану занятий. Обучающийся должен своевременно выполнять задания, выданные на практических занятиях.

При подготовке к лекциям обучающийся изучает план лекционного материала, рекомендованную и дополнительную литературу.

В рамках практической работы предусмотрены решение задачи и реферат на предложенную преподавателем тему.

## VII. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

№ п/п	Наименование оборудованных помещений и помещений для самостоятельной работы с указанием адреса	Перечень основного оборудования
1.	690922, Приморский край, г. Владивосток, остров Русский, полуостров Саперный, поселок Аякс, 10, корпус Е, ауд. 727 (Лаборатория современных технологий беспроводной связи). Учебная аудитория для проведения занятий лекционного, практического и семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.	Помещение укомплектовано специализированной учебной мебелью (посадочных мест – 27) Моноблок LenovoC306G-i34164G500UDK (11 шт), Акустическая система ExtronSI 3CTLP (3 шт), врезной интерфейс TLSTAM 201 StandartIII, документ-камераAvervisionCP355AF, ЖК-панель 47” LGM4716CCBA, матричный коммутатор ExtronDXP 44 DVIPRO, микрофонная петличная радиосистема SennheiserEW 122 G3, мультимедийный проектор Mitsubishi EW330U, расширение для контроллера управления ExtronIPLTCR48, сетевая видеокамера MultipixMP-HD718, стойка металлическая для ЖК-дисплея, усилитель мощности ExtronXPA 2001-100V, усилитель-распределитель DVI сигнала ExtronDVIDA2, цифровой

		аудиопроцессорExtronDMP 44 LC, экран проекционный ScreenLineTrimWhiteIce, NationalInstrumentsELVISII+, NationalInstrumentsEMONADATAx, NationalInstrumentsEMONASIGEx, NationalInstruments USRP 2901, NationalInstruments USRP 2920, ПО: NationalInstrumentsLabVIEW с модулями расширения
2.	Аудитория для самостоятельной работы аспирантов: 690922, Приморский край, г. Владивосток, остров Русский, полуостров Саперный, поселок Аякс, 10, корпусА, каб.А1017	Моноблок Lenovo C360G-i34164G500UDK – 15 шт. Интегрированный сенсорный дисплей PolymediaFlipBox - 1 шт. Копир-принтер-цветной сканер в e-mail с 4 лотками XeroxWorkCentre 5330 (WC5330C – 1 шт.
3.	Помещение для хранения и профилактики учебного оборудования. 690922, Приморский край, г. Владивосток, остров Русский, полуостров Саперный, поселок Аякс, 10, корпус Е, ауд. 225	



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Дальневосточный федеральный университет»  
(ДВФУ)

---

---

**ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ  
РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ**

**по дисциплине «Нелинейная динамика в радиофизике»**

Направление подготовки *03.06.01 Физика и астрономия*

Профиль «Радиофизика»

Форма подготовки (очная)

**Владивосток  
2019**

### План-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине

№ п/п	Дата/сроки выполнения	Вид самостоятельной работы	Примерные нормы времени на выполнение	Форма контроля
1	2 неделя	Закрепление лекционного материала, подготовка к собеседованию	10,25	Собеседование
2	2 неделя	Выполнение практических заданий, повторение лекционного материала, изучение дополнительной литературы	7,5	Контрольная работа
3	3 неделя	Закрепление лекционного материала, подготовка к собеседованию	10,25	Собеседование
4	3 неделя	Выполнение практических заданий, повторение лекционного материала, изучение дополнительной литературы	7,5	Контрольная работа
5	4 неделя	Закрепление лекционного материала, подготовка к собеседованию	10,25	Собеседование
6	4 неделя	Выполнение практических заданий, повторение лекционного материала, изучение дополнительной	7,5	Контрольная работа

		литературы		
7	5 неделя	Закрепление лекционного материала, подготовка к собеседованию	10,25	Собеседование
8	5 неделя	Выполнение практических заданий, повторение лекционного материала, изучение дополнительной литературы	7,5	Контрольная работа
9	6, 7 неделя	Поиск информации и проведение исследования по тематике реферата	10	Реферат
10	7 неделя	Подготовка к экзамену	9	Зачет

### **Методические указания по подготовке к контрольным работам**

Контрольные работы представляют особую форму сочетания теории и практики. Их назначение – проверить проработку теоретического и практического материала предмета за время регулярной и планомерной самостоятельной работы аспирантов на протяжении всего курса. Процесс подготовки к контрольным работам включает изучение нормативных документов, обязательной и дополнительной литературы по рассматриваемому вопросу.

### **Методические указания по подготовке к собеседованиям**

При подготовке к собеседованиям по темам дисциплины «Нелинейная динамика в радиофизике» необходимо изучить основную и дополнительную литературу, а также воспользоваться ресурсами информационно-телекоммуникационной сети «Интернет». Перечень вопросов для собеседования находится в приложении 2.

## Методические указания по подготовке реферата

Реферат относится к категории «письменная работа», оформляется по правилам оформления письменных работ ДВФУ.

Необходимо обратить внимание на следующие аспекты в оформлении реферата:

- набор текста;
- структурирование работы;
- оформление заголовков всех видов (рубрик-подрубрик-пунктов-подпунктов, рисунков, таблиц, приложений);
- оформление перечислений (списков с нумерацией или маркировкой);
- оформление таблиц;
- оформление иллюстраций (графики, рисунки, фотографии, схемы, «скриншоты»);
- набор и оформление математических выражений (формул);
- оформление списков литературы (библиографических описаний) и ссылок на источники, цитирования.
- Набор текста
- Набор текста осуществляется на компьютере, в соответствии со следующими требованиями:
- печать – на одной стороне листа белой бумаги формата А4 (размер 210 на 297 мм.);
- интервал межстрочный – полуторный;
- шрифт – TimesNewRoman;
- размер шрифта - 14 пт., в том числе в заголовках (в таблицах допускается 10-12 пт.);
- выравнивание текста – «по ширине»;
- поля страницы левое – 25-30 мм., правое – 10 мм., верхнее и нижнее – 20 мм.;
- нумерация страниц – в правом нижнем углу страницы (для страниц с книжной ориентацией), сквозная, от титульного листа до последней страницы, арабскими цифрами (первой страницей считается титульный лист, на котором номер не ставится, на следующей странице проставляется цифра «2» и т. д.).
- режим автоматического переноса слов, за исключением титульного листа и заголовков всех уровней (перенос слов для отдельного абзаца блокируется средствами MSWord с помощью команды «Формат» – абзац при выборе опции «запретить автоматический перенос слов»).

Если рисунок или таблица размещены на листе формата больше А4, их следует учитывать, как одну страницу. Номер страницы в этих случаях допускается не проставлять.

Список литературы и все приложения включаются в общую в сквозную нумерацию страниц работы.

Рекомендации по оформлению графического материала, полученного с экранов в виде «скриншотов».

Графические копии экрана («скриншоты»), отражающие графики, диаграммы моделей, схемы, экранные формы и т.п. должны отвечать требованиям визуальной наглядности представления иллюстративного материала, как по размерам графических объектов, так и разрешающей способности отображения текстов, цветовому оформлению и другим важным пользовательским параметрам.

Рекомендуется в среде программного приложения настроить «экран» на параметры масштабирования и размещения снимаемых для иллюстрации объектов. При этом необходимо убрать «лишние» окна, команды, выделения объектов и т.п.

В перенесенных в реферат «скриншотах» рекомендуется «срезать» ненужные области, путем редактирования «изображений», а при необходимости отмасштабировать их для заполнения страницы отчета «по ширине».

«Скриншоты» в реферате оформляются как рисунки, с заголовками, помещаемыми ниже области рисунков, а в тексте должны быть ссылки на указанные рисунки.

### **Методические указания по подготовке к экзамену**

К концу семестра обучающийся должен отчитаться по всем практическим работам. Темы, рассмотренные на лекционных занятиях, но не затронутые на практических занятиях, разбираются обучающимися во время самостоятельной работы.

При подготовке к экзамену необходимо повторить учебный материал, используя конспект лекций, основную и дополнительную литературу.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Дальневосточный федеральный университет»**  
(ДФУ)

---

**ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА**

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**  
**по дисциплине «Нелинейная динамика в радиофизике»**  
Направление подготовки *03.06.01 Физика и астрономия*  
Профиль «Радиофизика»  
Форма подготовки (очная)

**Владивосток**  
**2017**



## Паспорт ФОС

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции	
ПК-3. Готовность исследовать особенности распространения радиосигналов в различных физических средах	Знает	Основные нелинейные явления, эффекты, процессы в области радиофизики, их основные характеристики и закономерности; Различные показатели, методы, при помощи которых описываются поведение нелинейных динамических систем различной природы и структура фрактальных объектов
	Умеет	Использовать существующие математические методы описания нелинейных явлений и процессов в электронных схемах и при взаимодействии волн с материальными средами; Использовать соответствующее программное обеспечение для моделирования нелинейных явлений в области радиофизики
	Владеет	Современным программным обеспечением для моделирования нелинейных явлений в области радиофизики; Навыками применения математического аппарата для описания нелинейных явлений и процессов в электронных схемах и при взаимодействии волн с материальными средами

№ п/п	Контролируемые разделы / темы дисциплины	Коды, наименование и этапы формирования компетенций		Оценочные средства	
				текущий контроль	промежуточная аттестация
1	Теоретическая часть	ПК-3	Знает основные нелинейные явления, эффекты, процессы в области радиофизики, их основные характеристики и закономерности	Собеседование	Вопросы для подготовки к экзамену
2	Практическая часть	ПК-3	Умеет использовать существующие математические методы описания нелинейных	Реферат	Вопросы для подготовки к экзамену

			явлений и процессов в электронных схемах и при взаимодействии волн с материальными средами		
			Владеет навыками применения математического аппарата для описания нелинейных явлений и процессов в электронных схемах и при взаимодействии волн с материальными средами	Контрольная работа	Вопросы для подготовки к экзамену

### Шкала оценивания уровня сформированности компетенций

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции		критерии	показатели
ПК-3. Готовность исследовать особенности распространения радиосигналов в различных физических средах	знает (пороговый уровень)	Знает основные нелинейные явления, эффекты, процессы в области радиофизики, их основные характеристики и закономерности	Сформированные знания основных нелинейных явлений, эффектов, процессов в области радиофизики, их основных характеристик и закономерностей	60-74
	умеет (продвинутый)	Умеет использовать существующие математические методы описания нелинейных явлений и процессов в электронных	Сформированное умение использовать существующие математические методы описания нелинейных явлений и процессов в электронных	75-89

		схемах и при взаимодействии волн с материальными средами физических средах	схемах и при взаимодействии волн с материальными средами физических средах	
	владеет (высокий)	Владеет навыками применения математического аппарата для описания нелинейных явлений и процессов в электронных схемах и при взаимодействии волн с материальными средами	Успешное и систематическое применение математического аппарата для описания нелинейных явлений и процессов в электронных схемах и при взаимодействии волн с материальными средами	90-100

## Оценочные средства для промежуточной аттестации

### Перечень вопросов к зачету

1. Трехволновые взаимодействия в квадратичной среде.
2. Параметрическое преобразование частоты при высокочастотной накачке, эффективность преобразования частоты вверх и вниз.
3. Четырехволновые взаимодействия в кубичной среде. Уравнения Мэнли-Роу.
4. Дифракция усиливаемых волн и эффект аномальной фокусировки пучка в оптике.
5. Физическая природа и основные уравнения вынужденного комбинационного рассеяния.
6. Законы сохранения в отсутствие диссипации. Порог генерации. Вынужденное комбинационное рассеяние вперед.
7. Солитонное решение уравнения Кортевега – де Фриза.
8. Солитонное решение уравнения синус-Гордона.
9. Солитонное решение нелинейного уравнения Шредингера.
10. Солитонное решение уравнения Колмогорова-Петровского-Пискунова.
11. Волновое уравнение для сплошной случайно неоднородной среды.
12. Методы моделирования распространения радиоволн в турбулентной среде в случае слабых флуктуаций.
13. Распространение волнового пучка в пределах прямой видимости.

14. Сильные флуктуации. Параболическое уравнение. Приближение фазового экрана.
15. Бифуркации Пуанкаре-Андронova-Хопфа, Неймарка, удвоения периода.
16. Седло-узловые бифуркации коразмерности один. Бифуркации коразмерности два.
17. Сценарий Фейгенбаума перехода к хаосу через бифуркации удвоения периода. Процедура Кёнигса-Ламерея. Бифуркационная диаграмма. Универсалии Фейгенбаума.
18. Сценарий Рюэля-Такенса перехода к хаосу через разрушение двухчастотных колебаний. Сценарий Помо-Манневиля перехода к хаосу через перемежаемость.
19. Странный аттрактор. Отображение Эно. Отображение Икеды. Влияние шума на форму аттракторов хаотических систем.
20. Система Лоренца-Рёсслера.
21. Осциллятор Уеды. Осциллятор Ван-дер-Поля. Осциллятор Дуффинга. Карты динамических режимов.
22. Электронные генераторы хаотических колебаний и соответствующие им аттракторы. Схема Л. Чуа.
23. Размерность Хаусдорфа. Определение, классификация, примеры физических и математических фракталов различных размерностей.
24. Экспериментальные способы определения фрактальной размерности. Мультифрактальные множества.
25. Самоподобие шумов со спектральной плотностью, подчиняющейся обобщенно-гиперболическому закону. Классификация.
26. Оценка степени случайности процесса при помощи показателя Херста ( $H=R/S$ ). Автокорреляционные функции шумов. Связь показателя Херста и степенного показателя спектральной плотности шума.
27. Фрактальные антенны. Перспективные метаматериалы. Отражение волн фрактальными поверхностями.
28. Хаотические сигналы как носители информации для перспективных систем связи. Прямохаотическая система связи.
29. Фракталы в дистанционном зондировании, обнаружение объектов, сигналов на фоне шумов. Фрактальные методы моделирования поверхностей объектов.
30. Фрактальные свойства радиосигналов. Современные методы обработки речевых сигналов, изображений. Фрактальное сжатие изображений.

### **Критерии оценки результатов по дисциплине «Нелинейная динамика в радиофизике»**

Оценка зачета (стандартная)	Требования к сформированным компетенциям
Зачтено (отлично)	Оценка «отлично» выставляется аспиранту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе,

	последовательно, чётко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, свободно справляется с задачами, вопросами и другими видами применения знаний, причём не затрудняется с ответом при видоизменении заданий, использует в ответе материал монографической литературы, правильно обосновывает принятое решение, владеет разносторонними навыками и приёмами выполнения практических задач.
Зачтено (хорошо)	Оценка «хорошо» выставляется аспиранту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос, правильно применяет теоретические положения при решении практических вопросов и задач, владеет необходимыми навыками и приёмами их выполнения.
Зачтено (удовлетворительно)	Оценка «удовлетворительно» выставляется аспиранту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, испытывает затруднения при выполнении практических работ.
Незачтено (неудовлетворительно)	Оценка «неудовлетворительно» выставляется аспиранту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, неуверенно, с большими затруднениями выполняет практические работы. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится аспирантам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

## Оценочные средства для текущего контроля

### Перечень вопросов для собеседования

МОДУЛЬ 1. Взаимодействия волн в нелинейных средах. Солитоны

Раздел 1. Волны в нелинейных средах. Элементы нелинейной оптики

Тема 1. Трех- и четырехчастотные взаимодействия в нелинейных средах

Дисперсия и синхронизм. Описание трехволновых взаимодействий.

Законы сохранения в среде без потерь. Генерация второй гармоники.

Взаимодействие волн в непоглощающей среде при точном синхронизме.

Влияние линейных потерь. Параметрические процессы в квадратичной среде.

Параметрическое преобразование частоты вниз при высокочастотной накачке. Эффективность преобразования частоты вверх и вниз.

Основные уравнения четырехволнового взаимодействия. Первые интегралы уравнений в отсутствие диссипации (соотношения Менли-Роу). Генерация третьей гармоники в непоглощающей среде.

Тема 2. Элементы нелинейной оптики. Вынужденное комбинационное рассеяние света (ВКР)

Преобразование частот в волновых пучках в квадратичной среде. Основные уравнения. Взаимодействие двух усиливаемых пучков при

постоянной высокочастотной накачке. Уравнения одноволнового приближения. Дифракция усиливаемых волн и эффект аномальной фокусировки пучка. Параметрическая диффузия. Обращение волнового фронта при четырехволновом взаимодействии в кубичной среде.

Физическая природа ВКР. Основные уравнения процесса ВКР. Стоксово излучение. Законы сохранения в отсутствие диссипации. Порог генерации. Вынужденное комбинационное рассеяние вперед. Преобразование энергии накачки в волну стоксова излучения при ВКР назад. Антистоксово излучение.

Раздел 2. Радиоволны в турбулентной атмосфере. Солитоны

Тема 1. Солитоны как решения уравнений динамики

Солитонное решение уравнения Кортевега – де Фриза (КдФ). Основные свойства уравнения КдФ. Фазовая плоскость стационарных волн. Амплитуда, скорость распространения, длительность. Солитонное решение уравнения синус-Гордона. Основные свойства солитонного решения уравнения синус-Гордона. Солитонное и стационарное решения нелинейного уравнения Шредингера. Фазовая плоскость стационарных волн. Уравнение Колмогорова-Петровского-Пискунова (КПП). Решение уравнения КПП в форме солитона. Примеры солитонов в природе.

Тема 2. Распространение радиоволн в турбулентной атмосфере

Волновое уравнение для сплошной случайно неоднородной среды. Рассеяние волн в случайной сплошной среде. Формула Брукера-Гордона. Методы моделирования распространения радиоволн в турбулентной среде в случае слабых флуктуаций. Приближение Рытова. Статистические характеристики уровня и фазы. Сильные флуктуации. Параболическое уравнение. Метод Гюйгенса-Кирхгофа. Приближение фазового экрана.

МОДУЛЬ 2. Способы описания нелинейных динамических систем. Динамический хаос и фракталы в электронике, радиосвязи, радиофизике

Раздел 1. Особенности поведения нелинейных динамических систем, условия хаотичности. Электронные генераторы хаоса

Тема 1. Смена режима поведения нелинейных динамических систем (бифуркации), сценарии перехода к хаосу

Понятие о фазовом пространстве. Бифуркация Пуанкаре-Андронов-Хопфа. Мягкая и жесткая потери устойчивости. Бифуркации предельных циклов. Бифуркация удвоения периода. Бифуркация Неймарка рождения в фазовом пространстве инвариантного тора. Седло-узловые бифуркации коразмерности один. Бифуркация коразмерности два.

Нарушение устойчивости и переход к хаотическому поведению. Сценарий Фейгенбаума перехода к хаосу через бифуркации удвоения периода. Описание поведения динамической системы через точечное отображение. Процедура Кёнигса-Ламерея. Бифуркационная диаграмма. Универсалии Фейгенбаума. Сценарий Рюэля-Такенса перехода к хаосу через разрушение двухчастотных колебаний. Сценарий Помо-Манневила перехода к хаосу через перемежаемость (за счет увеличения числа хаотических всплесков).

Тема 2. Традиционные и странные аттракторы. Аттракторы генераторов хаотических колебаний и систем, демонстрирующих хаотическое поведение

Классические аттракторы: аттракторы типа устойчивый цикл, фокус, тор. Соответствующие им зависимости от времени. Термин «странный аттрактор». Отображение Эно. Отображение Икеды.

Описание динамических систем через системы дифференциальных уравнений. Численное решение системы дифференциальных уравнений.

Система Лоренца-Рёсслера и ее аттрактор. Автоколебательная реакция по А.Тьюрингу. Свойства странных аттракторов.

Осциллятор Уеды. Осциллятор Ван-дер-Поля. Осциллятор Дуффинга. Неавтономный автогенератор с жестким возбуждением. Карты динамических режимов.

Электронные генераторы хаотических колебаний и соответствующие им аттракторы. Генератор Кияшко-Пиковского-Рабиновича. Генератор Дмитриева-Кислова. Схема Л.Чуа.

Анализ работы автогенератора при наличии шума. Метод линеаризации. Статистическая динамика фазовой автоподстройки.

Основные свойства детерминированного хаоса. Способы описания странных аттракторов и поведения хаотических динамических систем. Сечения Пуанкаре. Показатели Ляпунова.

Влияние шума на форму аттракторов хаотических систем.

Раздел 2. Основы теории фракталов и ее применение к различным задачам в области радиосвязи, радиофизики

Тема 1. Основы теории фракталов. Фрактальные размерности

Определение фрактала по Б.Мандельброту (раннее и позднее). Классификация фракталов по А.Потапову (математические, физические). Примеры классических математических фракталов – Канторова пыль, снежинка Коха. Вычисление их размерностей. Размерность пространства вложения и топологическая размерность составляющих элементов фрактала.

Парадокс определения длины береговой линии. Примеры фрактальных объектов разной размерности. Парадокс с фрактальными шестиугольниками (нарушение соотношений евклидовой геометрии). Структура сечения Пуанкаре странного аттрактора как кантороподобное множество.

Экспериментальные способы определения фрактальной размерности. Методика Грассбергера-Прокаччо. Информационная размерность. Спектр размерностей Реньи. Мультифрактальные множества. Фрактальность геометрическая и фрактальность структурная. Древесные графы как пример объекта со структурной фрактальностью. Фрактальная размерность как отношение энтропий.

Тема 2. Случайные самоподобные процессы с обобщенно-гиперболическим спектром (шумы)

Самоподобие степенных законов. Самоподобие шумов со спектральной плотностью, подчиняющейся обобщенно-гиперболическому закону. Степень их случайности/неслучайности. Аддитивный белый гауссовский шум. Розовый шум как психоакустический эквивалент белого шума. Интеграл от

броуновского движения (винеровский процесс) – коричневый шум. Спектр мощности кривых изменения цен на фондовом и валютном рынках. Синий шум. Черный шум, соответствующий катастрофическим явлениям.

Оценка степени случайности процесса при помощи показателя Херста ( $H=R/S$ ). Значения показателя, соответствующие различным шумам. Автокорреляционные функции шумов. Связь показателя Херста и степенного показателя спектральной плотности шума.

Математические и физические способы получения шумов с различным спектром.

Тема 3. Применение элементов теории фракталов и теории динамического хаоса в практических задачах радиофизики, радиолокации, радиосвязи

Дробное интегрирование как современный инструмент анализа фрактальных явлений и процессов.

Фрактальные антенны. Их частотные и направленные свойства. Перспективные фрактальные метаматериалы. Отражение волн фрактальными поверхностями.

Вопросы самоподобного размещения ретрансляторов для обеспечения живучести системы связи. Полезные свойства хаотических сигналов для возможного применения в перспективных системах связи. Прямохаотические системы связи, структурная схема, характеристики. Хаотические сигналы как разновидность широкополосных сигналов.

Фракталы в дистанционном зондировании, обнаружение объектов. Фрактальные методы моделирования поверхностей объектов, в том числе подстилающих поверхностей, горных рельефов. Фрактальное обнаружение сигналов на фоне шумов.

Фрактальные свойства радиосигналов, в том числе речевых и телевизионных. Современные методы обработки речевых сигналов, изображений. Фрактальное сжатие изображений. Краткие теоретические сведения. Преимущества и недостатки. Особенности обработки информации различного назначения, в том числе медицинской информации.

### **Перечень тем для дискуссии**

1. Сравнение солитонных решений различных уравнений
2. Анализ сценария Фейгенбаума. Построение процедуры Кенигса-Ламерея при различных значениях управляющего параметра
3. Построение и анализ бифуркационной диаграммы Фейгенбаума. Расчет универсальных констант
4. Построение и анализ фрактальных аттракторов Эно и Икеды, аттрактора Лоренца-Рёсслера. Анализ влияния шума на форму и устойчивость аттракторов
5. Вычисление размерности фрактального объекта, вложенного в двумерное пространство, по методу Грассбергера-Прокаччо. Построение случайных и детерминированных фракталов. Вычисление информационной размерности



6. Определение спектральных характеристик хаотических и шумовых временных рядов. Идентификация вида шума. Реконструкция аттрактора по временному ряду. Вычисление фрактальных размерностей временных рядов. Использование программы fractan

7. Определение фрактальных размерностей оптических изображений естественных и искусственных объектов. Определение фрактальных характеристик речевых и телевизионных сигналов. Фрактальное сжатие изображений