

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального конструктора по  
программно-целевому развитию,  
директор научно-образовательного комплекса,  
д.т.н., профессор

В.М. Балашов

«17»

01

2021 г.

Утверждена решением НТС  
№ 01-03/21 от 27.01.2021 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

**МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН И СВЧ-УСТРОЙСТВ**

**Укрупненная группа направлений подготовки и специальностей:** 11.00.00 Электроника, радиотехника и системы связи

**Направление подготовки:** 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи

**Направленность:** Радиолокация и радионавигация

**Уровень высшего образования:** Подготовка научно-педагогических кадров высшей квалификации в аспирантуре

**Квалификация:** Исследователь. Преподаватель-исследователь

**Форма обучения:** Очная

СПб, 2021 г.

## **Аннотация**

Дисциплина «Методы измерений характеристик антенн и СВЧ устройств» является дисциплиной подготовки аспирантов по направлению подготовки 11.06.01 - Электроника, радиотехника и системы связи. Дисциплина реализуется Центром подготовки кадров высшей квалификации - аспирантурой АО «НПП «Радар ммс».

Дисциплина нацелена на формирование следующих компетенций аспиранта:  
**общепрофессиональных:**

- владение методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности (**ОПК-1**);

**профессиональных:**

- готовность применять перспективные методы исследования профессиональных задач с учетом мировых тенденций развития радиолокационных и радионавигационных систем и комплексов (**ПК-1**);

- умение проводить разработку методик проектирования и оптимизации новых принципов и алгоритмов работы радиолокационных и радионавигационных систем, новых методов их проектирования и обеспечения надежности (**ПК-3**).

- способность создавать и исследовать математические и информационные модели явлений, устройств и систем в целом в области радиолокации и радионавигации (**ПК-5**).

Содержание дисциплины охватывает круг вопросов, связанных с формирование устойчивых знаний в области измерений и испытаний антенн, СВЧ устройств и систем на основе применения современных измерительных средств и методов обработки результатов измерений.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, самостоятельная работа студента, консультации.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля: текущий контроль успеваемости в форме приема индивидуальных практических заданий и промежуточный контроль в форме зачета.

Общая трудоемкость освоения дисциплины составляет 3 зачетных единицы, 108 часов. Программой дисциплины предусмотрены лекционные 36 часов, практические 26 часов, 46 часов самостоятельной работы студента.

### **1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине**

#### **1.1 Цели освоения дисциплины**

Целью освоения дисциплины является ознакомление аспирантов с организацией и методами измерений и испытаний характеристик СВЧ систем, которые включают в себя методы и средства экспериментального исследования антенн, методы и средства определения характеристик СВЧ

устройств, методы и средства измерения характеристик рассеяния радиолокационных объектов.

Для достижения поставленной цели выделяются следующие задачи дисциплины:

- знакомство с основными характеристиками СВЧ устройств и антенн и электродинамическими основами определения характеристик антенн и СВЧ устройств;
- изучение теоретических основ экспериментального исследования антенн, СВЧ устройств и СВЧ комплексов;
- изучение особенностей построения и функционирования измерительных комплексов для экспериментального исследования антенн;
- изучение особенностей построения и функционирования измерительных приборов и комплексов для определения характеристик СВЧ устройств;
- изучение методов экспериментального исследования антенн по измерениям в ближней зоне;
- изучение методов и средств измерения характеристик рассеяния радиолокационных объектов.

## **1.2 Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с**

### **планируемыми результатами освоения ОП**

В результате освоения дисциплины аспирант должен:

**Знать:** современные методы и средства измерений характеристик антенн и СВЧ устройств, способы их применения для решения практических задач при отработке режимов функционирования и испытаний радиотехнических систем:

- основные характеристики антенн, СВЧ систем и устройств;
- теоретические основы экспериментального исследования антенн, СВЧ устройств и систем;
- средства обеспечения условий измерений;
- состав, построение и функционирование измерительных комплексов для экспериментального исследования антенн;
- особенности построения, применения и функционирования измерительных приборов и комплексов для определения характеристик СВЧ устройств;
- методы и средства измерения характеристик рассеяния радиолокационных объектов.

**Уметь:** в зависимости от решаемой задачи и с учетом особенностей используемых СВЧ комплексов разрабатывать методику и выбор средств измерений, проводить анализ научных литературных источников, осуществлять анализ полученных результатов испытаний:

- выполнять грамотную постановку задач, возникающих в практической деятельности при организации измерений характеристик и испытаний антенн, СВЧ устройств и систем;
- проводить анализ задачи для выбора наилучших методов и средств измерений, подходящего для конкретной задачи;
- работать со средствами измерений и обработки результатов измерений;

- проводить анализ результатов измерений характеристик и испытаний антенн, СВЧ устройств и систем;
- совершенствовать методы и методики измерений и обработки результатов измерений.

**Владеть:** технологией применения методов и средств измерений характеристик и испытаний антенн, СВЧ устройств и систем, навыками создания методов и методик применения средств измерений и обработки результатов измерений, навыками выполнения анализа результатов измерения и совершенствования методов измерения и обработки результатов измерений.

**Результат обучения** - выполнять комплексные инженерные проекты по созданию технологий применения методов и средств измерений и испытаний СВЧ комплексов, систем и устройств, а также методов и методик применения средств измерений и обработки результатов измерений.

В процессе освоения дисциплины у аспирантов развиваются следующие **компетенции**:

**общепрофессиональные:**

- владение методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности (**ОПК-1**);

**профессиональные:**

- готовность применять перспективные методы исследования профессиональных задач с учетом мировых тенденций развития радиолокационных и радионавигационных систем и комплексов (**ПК-1**);

- умение проводить разработку методик проектирования и оптимизации новых принципов и алгоритмов работы радиолокационных и радионавигационных систем, новых методов их проектирования и обеспечения надежности (**ПК-3**).

- способность создавать и исследовать математические и информационные модели явлений, устройств и систем в целом в области радиолокации и радионавигации (**ПК-5**).

В результате освоения дисциплины аспирант осваивает следующие профессиональные компетенции (Таблица 1).

Таблица 1. Профессиональные компетенции, приобретаемые при изучении дисциплины

Компетенция	Код	Основные признаки освоения (показатели достижения результата)	Формы и методы обучения, способствующие формированию и развитию компетенции
готовность применять перспективные методы исследования профессиональных задач с учетом мировых тенденций развития радиолокационных и радионавигационных систем и комплексов	ПК-1	Знает современные методы анализа и проектирования сложных радиолокационных систем и радионавигационных комплексов Умеет применять на практике перспективные методы проектирования и оптимизации систем радиолокации и радионавигации	Лекции, практические работы, самостоятельная работа

умение проводить разработку методик проектирования и оптимизации новых принципов и алгоритмов работы радиолокационных и радионавигационных систем, новых методов их проектирования и обеспечения надежности	<b>ПК-3</b>	Знает методы анализа и синтеза, оптимизации, технологии изготовления, обеспечения надежности для передачи, приема, извлечения и разрушения информации в средствах радиолокации, радионавигации и радиоуправления Умеет применять современные методы передачи, приема, извлечения и разрушения информации в средствах радиолокации, радионавигации и радиоуправления на практике в соответствии с выбранными критериями	Лекции, практические работы, самостоятельная работа
способность создавать и исследовать математические и информационные модели явлений, устройств и систем в целом в области радиолокации и радионавигации	<b>ПК-5</b>	Знает методы и алгоритмы создания математических моделей радиолокационных и радионавигационных систем Умеет разрабатывать математическое и алгоритмическое обеспечение радиотехнических явлений, новых принципов управления и работы радиолокационных систем	Лекции, практические работы, самостоятельная работа

## 2. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Методы измерений характеристик антенн и СВЧ устройств» является вариативной дисциплиной Блока 1 основной образовательной программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению 11.06.01, направленность - Радиолокация и радионавигация.

Для её успешного усвоения необходимы знания базовых понятий математического анализа, линейной алгебры и аналитической геометрии, теории цепей, теории электромагнитного поля, электродинамики и распространения радиоволн, курсов антенн и СВЧ устройств.

Компетенции, полученные при изучении материала данной дисциплины, направлены для использования при организации, разработке методов и методик измерений характеристик и испытаний СВЧ систем и устройств, включая экспериментальные исследования антенн, измерения параметров СВЧ устройств, измерения радиолокационных характеристик рассеяния и умения применять полученные знания для решения практических задач из области анализа данных и принятия решений.

## 3.Объем дисциплины

Данные об общем объеме дисциплины, трудоемкости отдельных видов учебной работы по дисциплине (и распределение этих трудоемкостей по семестрам) представлены в Таблице 2.

**Таблица 2 - Объем и трудоемкость дисциплины**

Вид учебной работы	Направление 11.06.01, форма обучения - очная	
	Всего	Трудоемкость по семестрам
		6 семестр
<b>Общая трудоемкость дисциплины, ЗЕ/(час)</b>	<b>3/108</b>	3/108
<i>Аудиторные занятия, всего час.</i>		
<i>в том числе:</i>		
лекции (Л), (час)	<b>36</b>	36
Практические/семинарские занятия (ПЗ), (час)	<b>26</b>	26
лабораторные работы (ЛР), (час)	не предусмотрено	
курсовый проект (работа) (КП, КР), (час)	не предусмотрено	
<i>Самостоятельная работа, всего (час)</i>	<b>46</b>	46
<b>Вид итогового контроля:</b>	<b>Зачет</b>	Зачет

## 4. Содержание дисциплины

### 4.1 Содержание разделов дисциплины

**1. Введение.** Понятия антенн, антенных систем и СВЧ устройств. Классификация частотных диапазонов. Классификация СВЧ устройств. Антenna как устройство для излучения и приема электромагнитных волн (ЭМВ). Направленные свойства антенн и их связь с назначением радиотехнических систем. Методы моделирования антенных систем и СВЧ устройств.

**2. Основные понятия электродинамики.** Уравнения Maxwella в интегральной и дифференциальной формах. Электромагнитные волны (ЭМВ). Плоские ЭМВ линейной и круговой поляризации. Фазовая и групповая скорости распространения электромагнитных волн. Границные условия. Взаимодействие электромагнитных волн с проводниками и диэлектриками. Решение волнового уравнения в декартовой, цилиндрической и сферической системах координат. Векторный потенциал. Электрический и магнитный векторы Герца.

**3. Антенны и их основные характеристики.** Классификация антенных устройств по исполнению и назначению. Определение электромагнитного поля (ЭМП) излучения антенн. Электрический диполь. Магнитный диполь. Диаграмма направленности (ДН), КНД, КУ. Уровень боковых лепестков (УБЛ). Направленные свойства антенн и их связь с назначением радиотехнических систем.

**4. Методы измерения характеристик антенн в дальней зоне.** Понятия зоны реактивных полей, ближней зоны, зоны Френеля и дальней зоны.Monoхроматические методы измерений. Непосредственное измерение ДН в главных сечениях. Измерение КУ с помощью эталонной антенны и методом трех антенн. Особенности амплифазометрических измерений слабонаправленных антенн в дальней зоне. Сверхширокополосные измерения в дальней зоне и особенности их реализации. Облетный метод измерения антенн сверхбольших волновых размеров. Измерение ДН, КУ и поляризационных характеристик антенн облетным методом.

**5. Методы измерения характеристик антенн в ближней зоне.** Проблема определения характеристик антенн больших волновых размеров в дальней зоне. Теоретические основы методов ближней зоны. Измерения в ближней зоне на плоской, цилиндрической и сферической поверхностях. Выбор поверхности измерения в зависимости от направленных свойств испытуемых антенн. Различные варианты реализации сканирующих систем. Инструментальные и методические погрешности. Требуемая точность позиционирования антенн-зондов. Учет направленных свойств антенн-зондов при планарном и цилиндрическом сканированиях. Методы определения ДН, КНД и КУ испытуемых антенн по измерениям в ближней зоне. Амплифазометрические и амплитудные методы определения характеристик антенн по измерениям в ближней зоне. Условия реализации измерений в ближней зоне. Экранированные безэховые камеры и свойства радиопоглощающих материалов. Сверхширокополосные измерения в ближней зоне и особенности их реализации. Волновая диагностика апертурных антенн и антенных решеток. Определение дефектных излучателей антенных решеток и аномальных зон реактивных полей апертурных антенн.

**6. Коллиматорные измерения.** Создание искусственного плоского фронта в безэховой камере компактного полигона. Зеркальные коллиматоры. Особенности построения зеркальных коллиматоров. Рабочая область коллиматоров. Требования к допустимым отклонениям амплитуды и фазы в рабочей области. Аттестация коллиматоров. Определение характеристик антенн с помощью коллиматора. Определение характеристик рассеяния радиолокационных объектов с помощью коллиматора. Сверхширокополосные коллиматорные измерения. Линзовые коллиматоры.

**7. Измерение характеристик СВЧ устройств.** Измерение КСВ, коэффициентов передачи СВЧ устройств. СВЧ устройства как четырехполюсники и многополюсники СВЧ цепей. Скалярные и векторные анализаторы СВЧ цепей. Измерение S-параметров СВЧ устройств. Измерение коэффициентов отражения и прохождения материалов антенных устройств. Исследование поляризационных свойств элементов антенн панорамным измерителем.

**4.2 Структура дисциплины по разделам и формам организации обучения приведена в Таблице 3.**

**Таблица 3. Распределение трудоемкости дисциплины по разделам и видам занятий**

Название раздела/темы	Аудиторная работа (час)			СР (час)	Колл, Контр.Р.	<b>Итого</b>
	Лекции	Практ./сем. занятия	Лаб. зан.			
1. Введение	2			4		6
2. Основные понятия электро- динамики	6			6		12
3. Антенны и их основные ха- рактеристики	4	4		6		14
4. Методы измерений характе- ристик антенн в дальней зоне	4	4		6		14
5. Методы измерений характе- ристик антенн в ближней зоне	8	8		8		24
6. Коллиматорные измерения	4	6		8		18
7. Измерение характеристик СВЧ устройств и материалов	8	4		8		20
<b>Итого</b>	<b>36</b>	<b>26</b>		<b>46</b>		<b>108</b>

### **4.3 Практические (семинарские) занятия**

**Таблица 4. Практические (семинарские) занятия и их трудоемкость**

<b>№ п/п</b>	<b>Наименование практических (семинарских) занятий</b>	<b>Трудоем- кость, (час)</b>	<b>Номер раздела дисциплины</b>
<b>Семестр 6</b>			
<b>1</b>	Классификация антенных устройств по исполнению и назначению. Определение ЭМП антенн. Компьютерное проектирование антенн.	<b>2</b>	3. Антенны и их основные характеристики
<b>2</b>	Основные характеристики антенн и их связь с назначением радиотехнических систем	<b>2</b>	3. Антенны и их основные характеристики
<b>3</b>	Узкополосные измерения амплитудных ДН (АДН) и КУ антенн в дальней зоне методом вышки и облетным методом.	<b>2</b>	4. Методы измерений характеристик антенн в дальней зоне
<b>4</b>	Сверхширокополосные измерения АДН, фазовых ДН (ФДН) и КУ антенн в дальней зоне.	<b>2</b>	4. Методы измерений характеристик антенн в дальней зоне
<b>5</b>	Определение характеристик антенн на основе планарных измерений в ближней зоне.	<b>2</b>	5. Методы измерений характеристик антенн в ближней зоне
<b>6</b>	Определение характеристик антенн на основе цилиндрических и сферических измерений в ближней зоне.	<b>2</b>	5. Методы измерений характеристик антенн в ближней зоне
<b>7</b>	Определение характеристик антенн на основе сверхширокополосных измерений в ближней зоне.	<b>2</b>	5. Методы измерений характеристик антенн в ближней зоне

8	Волновая диагностика антенн на основе измерений в ближней зоне.	2	5. Методы измерений характеристик антенн в ближней зоне
9	Коллиматоры, их характеристики и способы реализации.	2	6. Коллиматорные измерения
10	Измерения характеристик антенн с помощью коллиматоров.	2	6. Коллиматорные измерения
11	Коллиматорные методы определение характеристик рассеяния радиолокационных объектов.	2	6. Коллиматорные измерения
12	Принципы построения и работы скалярных анализаторов СВЧ цепей.	2	7. Измерение характеристик СВЧ устройств
13	Принципы построения и работы скалярных анализаторов СВЧ цепей.	2	7. Измерение характеристик СВЧ устройств
Всего:		26	

**4.4 Лабораторные занятия не предусмотрены.**

**4.5 Курсовое проектирование (работа) не предусмотрено.**

**4.6 Самостоятельная работа аспирантов представлена в Таблице 5.**

**Таблица 5. Самостоятельная работа аспирантов**

Вид самостоятельной работы	Всего, час	Семестр 6, час
Изучение теоретического материала дисциплины (ТО)	26	26
Подготовка к текущему контролю (час)	8	8
Домашнее задание (ДЗ)	12	12
<b>ИТОГО</b>	<b>46</b>	<b>46</b>

#### **4.6.1 Содержание самостоятельной работы студентов по дисциплине**

- Сверхширокополосные измерения в дальней зоне антенн сверхбольших волновых размеров;
  - Безфазовые методы определения характеристик антенн по измерениям в ближней зоне;
  - Особенности определения характеристик АФАР по измерениям в ближней зоне;
- Коммутационный метод измерений характеристик ФАР;
- Рефлекторные и линзовье коллиматоры;
  - Сверхширокополосные коллиматорные измерения антенн;
  - Амплитудные измерения в дальней зоне моностатической ЭПР радиолокационных объектов;

- Сверхширокополосные измерения в дальней зоне моностатической ЭПР радиолокационных объектов;
- Коллиматорные амплифазометрические измерения моностатической ЭПР радиолокационных объектов;
- Методы измерения бистатической ЭПР радиолокационных объектов;
- Учет направленных свойств зонда при планарных и цилиндрических измерениях в ближней зоне;
- Анализаторы спектра СВЧ устройств;
- Измерители мощности СВЧ устройств;
- Методы и средства контроля взаимного положения испытуемой антенны (ИА) и зонда при измерении характеристик ИА;
- Позиционеры и опорно-поворотные устройства для измерительных комплексов экспериментального исследования антенн;
- Оценка положения фазового центра антенны.

### **5. Фонд оценочных средств для проведения аттестации обучающихся по дисциплине**

В зависимости от видов промежуточной аттестации при изучении дисциплины предусматриваются следующие перечни оценочных средств, приведенных в **Таблице 6**.

**Таблица 6.** Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине

Вид промежуточной аттестации	Перечень оценочных средств
Зачет	Список вопросов. Практические задания (на дом) Отчеты по домашним заданиям

Общие критерии зачета представлены в **Таблице 7**.

**Таблица 7. Критерии зачета**

Результат оценивания	Критерии оценки
«Зачет»	Продемонстрированы твёрдые и достаточно полные знания материала дисциплины, соответствующие требованиям содержания рабочей программы дисциплины, показаны профессиональные компетенции, соответствующие профилю подготовки 11.06.01. В целом - правильное понимание сущности и взаимосвязи рассматриваемых процессов и явлений, даны последовательные, правильные ответы на поставленные вопросы. В ответах могут быть допущены единичные несущественные неточности.

«Незачет»	Не дано ответа или дан неправильный ответ хотя бы на один вопрос зачета билета, продемонстрировано непонимание сущности предложенных вопросов, допущены грубые ошибки при ответах на дополнительные вопросы, профессиональные компетенции отсутствуют полностью или частично.
-----------	---

## **6. Перечень основной и дополнительной литературы**

### ***Основная литература (локальная сеть Предприятия)***

1. М. Хибель Основы векторного анализа цепей. Пер. с англ. М.С. Смольского, М.: Изд. Дом МЭИ, 2009.
2. Раушер К. Основы спектрального анализа. Пер. с англ. М.С. Смольского, М., 2006.
3. Данилин А.А. Измерения в технике СВЧ. М.: “Радиотехника”, 2008.
4. Штагер Е.А. Рассеяние электромагнитных волн на телах сложной формы. М.: Радио и связь. 1986. -187с.
5. Д.И. Воскресенский, В.Л. Гостюхин, В.М. Максимов, Л.И. Пономарев Устройства СВЧ и антенны. Под. Ред. Д.И. Воскресенского, М.: “Радиотехника”, 2006.-376с.

### ***Дополнительная литература (локальная сеть Предприятия)***

1. Д.М. Сазонов. Антенны и устройства СВЧ: Учеб. Для радиотехнических спец. вузов. - М.:Высшая шк. - 1988-432с.
2. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. М.: “Сов. радио”, 1975.-248с.
3. Панченко Б.А., Нефедов Е.И. Микрополосковые антенны.- М.: Радио и связь, 1986.-144с.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети ИНТЕРНЕТ, необходимых для освоения дисциплины**

1. <http://abc.vvvsu.ru/books/metrologstandarisertif/page0013.asp> - Сайт цифровых учебнометодических материалов ВГУЭС
2. <http://edunano.ru/> - Автономная некоммерческая организация «Электронное образование дляnanoиндустрии»
3. <https://electronics.ru/forum/index.php?showtopic=5428> - форум по СВЧ-технике

## **8. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

- 1) Предметная аудитория, оснащена мультимедийным проектором и экраном, ПК преподавателя - 1 шт.
- 2) Персональные компьютеры (15 шт.), локальная сеть, компьютер с выходом в Интернет - 1 шт.
- 3) Microsoft Windows (№ СТР - 20/01/10 от 20.01.2010)
- 4) Microsoft Office (№ СТР 20/01/10 от 20.01.2010)
- 5) Microsoft Visio (№ СТР 20/01/10 от 20.01.2010)
- 6) CST Studio (№СТР - 20/01/10 от 20.01.2010)