

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
радиотехники и компьютерных  
технологий**

**Д.А. Гаврилов**

|                            |  |
|----------------------------|--|
|                            | <b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>   |
| <b>по дисциплине:</b>      | Радиофизическая лаборатория  |
| <b>по направлению:</b>     | Прикладные математика и физика   |
| <b>профиль подготовки:</b> | Радиотехника и компьютерные технологии<br>Физтех-школа Радиотехники и Компьютерных Технологий<br>центр образовательных программ ФРКТ |
| <b>курс:</b>               | 3  |
| <b>квалификация:</b>       | бакалавр   |

Семестры, формы промежуточной аттестации:

5 (осенний) - Зачет

6 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 60 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составили:

А.В. Леус, канд. техн. наук, доцент

Т.А. Тормагов, старший преподаватель

Программа обсуждена на заседании центра образовательных программ ФРКТ 08.11.2024

## Аннотация

Курс «Радиофизическая лаборатория» направлен на практическое изучение разделов цифровой обработки сигналов, связанных с дискретизацией сигналов, дискретным во времени и дискретным преобразованиями Фурье, основами спектрального анализа детерминированных сигналов. Аудиторные задания по курсу проводятся в виде лабораторных работ, осуществляемых с использованием цифрового осциллографа, компьютерного моделирования с помощью библиотек языка программирования Python.

Курс включает в себя проведение лабораторных экспериментов с последующим обсуждением, обзорных консультаций по темам лабораторных работ, компьютерное моделирование, решение типовых и практических задач.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Целью курса «Радиофизическая лаборатория» является практическое изучение разделов цифровой обработки сигналов, относящихся к вопросам дискретизации и спектрального анализа с применением дискретного преобразования Фурье.

### Задачи дисциплины

- изучение основ цифрового спектрального анализа с проведением компьютерного моделирования с помощью библиотек Numpy, Scipy, Matplotlib, Astropy языка программирования Python;
- приобретение навыков анализа сигналов с помощью цифрового осциллографа;
- овладение алгоритмами расчета дискретного преобразования Фурье;
- получение необходимых базовых знаний для дальнейшего изучения цифрового спектрального анализа и цифровой фильтрации сигналов.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

| Код и наименование компетенции  | Индикаторы достижения компетенции   |
|---|---|
| УК-2 Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений           | УК-2.1 Формулирует совокупность взаимосвязанных задач в рамках поставленной цели работы, обеспечивающих ее достижение. Определяет ожидаемые результаты решения поставленных задач |
| УК-3 Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде  | УК-3.1 Способен устанавливать разные виды коммуникации (учебную, научную, деловую, неформальную и др.)  |
| ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности | ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности   |
| ОПК-3 Способен составлять и оформлять научные и (или) технические (технологические, инновационные) отчеты (публикации, проекты)   | ОПК-3.1 Знает основные правила оформления научных публикаций и научно-технической документации, в том числе с использованием прикладного программного обеспечения                 |
| ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач   | ОПК-4.1 Владеет методами научного поиска и интеллектуального анализа информации при решении задач профессиональной деятельности   |
|   | ОПК-4.4 Владеет навыками работы с компьютером и компьютерными сетями с целью получения, хранения и обработки научной (технической, технологической) информации                    |

|  |  |
|--|--|
| ПК-2 Способен анализировать полученные в ходе научно-исследовательской работы данные и делать научные выводы (заключения)                      | ПК-2.3 Способен представлять научные утверждения, их обоснования и доказательства, научные проблемы и их решения ясно и точно в терминах, понятных для профессиональной аудитории, в письменной и устной форме |
| ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области | ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования  |

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- физические основы работы лазера и интерферометра с большой разностью хода;
- свойства когерентного лазерного излучения;
- механизмы влияния обратного рассеяния на точность лазерных интерферометров;
- фундаментальные основы цифровой обработки информационных сигналов;
- принципы функционирования цифрового осциллографа и цифрового спектроанализатора.

уметь:

- пользоваться своими знаниями для решения прикладных и технологических задач;
- рассчитывать характеристики исследуемых приборов;
- выполнять обработку и анализ результатов измерений;
- применять полученные знания для решения прикладных и технологических задач;
- проводить экспериментальные исследования на современных цифровых приборах, выполнять анализ результатов цифровых измерений;
- проводить компьютерное моделирование сигналов и их спектров.

владеть:

- навыками использования современных методов измерения параметров исследуемых приборов в различных диапазонах длин волн излучения;
- математическим аппаратом для моделирования и расчёта характеристик исследуемых приборов;
- современными методами проведения измерений, навыками работы с прецизионными лазерными приборами;
- математическим аппаратом для моделирования и расчет характеристик исследуемых приборов;
- математическим аппаратом анализа цифровых систем и устройств;
- навыками работы с современными цифровыми устройствами обработки сигналов.

### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

| № | Тема (раздел) дисциплины   | Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час. |          |                 |                |
|---|--|---|----------|-----------------|----------------|
|   |  | Лекции  | Семинары | Лаборат. работы | Самост. работа |
| 1 | Дтскретизация аналоговых сигналов  |   |          | 15              | 7              |
| 2 | Дискретное во времени преобразование Фурье (ДВПФ), дтскретное преобразование Фурье (ДПФ) |   |          | 15              | 8              |
| 3 | Спектральный анализ детерминированных сигналов   |   |          | 15              | 30             |
| 4 | Цифровой осциллограф в режиме анализатора спектра  |   |          | 15              | 30             |

|                       |                     |  |    |    |
|-----------------------|---------------------|--|----|----|
| Итого часов           |                     |  | 60 | 75 |
| Подготовка к экзамену | 0 час.              |  |    |    |
| Общая трудоёмкость    | 135 час., 3 зач.ед. |  |    |    |

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

##### Семестр: 5 (Осенний)

###### 1. Дискретизация аналоговых сигналов

Классификация сигналов: аналоговые, дискретные, цифровые. Преобразование Фурье и его свойства. Спектры импульсных и периодических сигналов. Спектр дискретизованного сигнала. Теорема Котельникова во временной области. Эффект наложения спектров при дискретизации сигналов.

###### 2. Дискретное во времени преобразование Фурье (ДВПФ), дискретное преобразование Фурье (ДПФ)

Оценка спектра сигнала по последовательности его отсчетов. ДВПФ: формулы анализа и синтеза, основные свойства. Формы записи ДПФ. Свойства ДПФ. Матричная форма ДПФ. Алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ) для вычисления ДПФ. Связь между ДВПФ и ДПФ для последовательностей отсчетов конечной длительности и для периодических последовательностей отсчетов. Интерполяционная формула восстановления ДВПФ по коэффициентам ДПФ, интерполяция ДВПФ добавлением нулевых отсчетов в сигнал. Частотная ось ДПФ: связь между номером отсчета ДПФ и частотой в спектре дискретизованного сигнала.

##### Семестр: 6 (Весенний)

###### 3. Спектральный анализ детерминированных сигналов

Вычисление спектра дискретизованного сигнала и оценка спектра исходного сигнала с помощью ДПФ. Эффекты растекания спектральных компонент («leakage») и утечки спектра через боковые лепестки окна. Влияние соседних спектральных компонент. Паразитная амплитудная модуляция спектра. Примеры оконных функций и их характеристики: прямоугольное окно, окна Бартлетта, Ханна, Хэмминга, Блэкмана, Кайзера, Чебышева, окно с плоской вершиной. Кратковременное дискретное преобразование Фурье (STFT): формулы анализа, разрешение по времени и по частоте, выбор параметров.

###### 4. Цифровой осциллограф в режиме анализатора спектра

Работа с цифровым осциллографом в режиме анализатора спектра. Выбор частоты дискретизации, размерности ДПФ, оконной функции для осуществления цифрового спектрального анализа. Шумы квантования n-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Исследование спектров тестовых сигналов (отрезка синусоиды, конечной последовательности прямоугольных импульсов) и процессов субдискретизации с помощью цифрового осциллографа.

#### 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебные аудитории для проведения лабораторных занятий, проектор, компьютерные классы с доступом в сеть «Интернет», цифровые осциллографы Signal-PV65.

Программное обеспечение: дистрибутив Anaconda для языка программирования Python 3, пакет прикладных программ MATLAB либо GNU Octave.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Основы теории и расчета цифровых фильтров, Электронная версия печатной публикации / В. П. Васильев, Э. Л. Муро, С. М. Смольский. — Москва, Инфра-М, 2020

### Дополнительная литература

1. Цифровая обработка сигналов [Текст] = Discrete-Time Signal Processing : [учеб. пособие для вузов] / А. Оппенгейм, Р. Шафер ; пер. с англ. под ред. С. Ф. Боева .— 3-е изд., испр. — М. : Техносфера, 2012 .— 1048 с.
2. Основы цифровой обработки сигналов [Текст] : в 3 ч. : учеб. пособие для вузов / Ю. Романюк ; М-во образования и науки РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— 2-е изд., перераб. — М. : МФТИ, 2007 .— Ч. 1 : Свойства и преобразования дискретных сигналов. - 2007. - 332 с.
3. Дискретное преобразование Фурье в цифровом спектральном анализе [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. А. Романюк ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Фед. агентство по образованию, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 2007 .— 120 с.

## 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. Видеолекции на сайте МФТИ <http://lectoriy.mipt.ru>  
Романюк Ю.А. «Основы цифровой обработки сигналов» в 2014г.  
Романюк Ю.А. «Цифровая обработка сигналов» в 2015г.
1. <http://frtk.ru/forstudents/study/studyMaterials/DSP/>.
2. FRTK.FIZTEH.RU (разделы: студентам – учёба – цифровая обработка сигналов).
3. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/187pdj>

## 8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

### Программное обеспечение:

дистрибутив Anaconda для языка программирования Python 3,  
пакет прикладных программ MATLAB либо GNU Octave.

### Онлайн-сервисы для компьютерного моделирования:

Google Colaboratory <http://colab.research.google.com/>.

### Системы дистанционного обучения:

LMS Google Classroom (Система управления обучением),

Google Hangouts Meet (сервис видеоконференцсвязи).

## 9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Самостоятельная работа включает в себя чтение рекомендованной литературы, решение типовых задач, подготовка ответов на контрольные вопросы, ознакомление ресурсами сети «Интернет» по тематике лабораторных работ.

Лабораторные работы по моделированию на языках Python 3 либо Matlab выполняются на компьютерах аудитории, в случае дистанционного обучения рекомендуется использование онлайн-сервисов Google Colaboratory и MATLAB Online.

Для организации учебного процесса преподавателем может использоваться система управления обучением LMS Google Classroom, доступ осуществляется с помощью Google аккаунта в домене @phystech.edu.

Обучающимся рекомендуется ознакомиться с учебными материалами на сайте кафедры <http://kprf.mipt.ru/> (разделы «Материалы / Лабораторные работы», «Учебные курсы / Дискретные преобразования сигналов»)

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

|                            |  |
|----------------------------|--|
| <b>по направлению:</b>     | Прикладные математика и физика   |
| <b>профиль подготовки:</b> | Радиотехника и компьютерные технологии<br>Физтех-школа Радиотехники и Компьютерных Технологий<br>центр образовательных программ ФРКТ |
| <b>курс:</b>               | <u>3</u>   |
| <b>квалификация:</b>       | бакалавр   |

Семестры, формы промежуточной аттестации:

5 (осенний) - Зачет

6 (весенний) - Дифференцированный зачет

**Разработчики:**

А.В. Леус, канд. техн. наук, доцент

Т.А. Тормагов, старший преподаватель

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

| Код и наименование компетенции  | Индикаторы достижения компетенции  |
|---|--|
| УК-2 Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений           | УК-2.1 Формулирует совокупность взаимосвязанных задач в рамках поставленной цели работы, обеспечивающих ее достижение. Определяет ожидаемые результаты решения поставленных задач                              |
| УК-3 Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде  | УК-3.1 Способен устанавливать разные виды коммуникации (учебную, научную, деловую, неформальную и др.)   |
| ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности | ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности  |
| ОПК-3 Способен составлять и оформлять научные и (или) технические (технологические, инновационные) отчеты (публикации, проекты)   | ОПК-3.1 Знает основные правила оформления научных публикаций и научно-технической документации, в том числе с использованием прикладного программного обеспечения  |
| ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач   | ОПК-4.1 Владеет методами научного поиска и интеллектуального анализа информации при решении задач профессиональной деятельности  |
|   | ОПК-4.4 Владеет навыками работы с компьютером и компьютерными сетями с целью получения, хранения и обработки научной (технической, технологической) информации   |
| ПК-2 Способен анализировать полученные в ходе научно-исследовательской работы данные и делать научные выводы (заключения)   | ПК-2.3 Способен представлять научные утверждения, их обоснования и доказательства, научные проблемы и их решения ясно и точно в терминах, понятных для профессиональной аудитории, в письменной и устной форме |
| ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области  | ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования  |

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Радиофизическая лаборатория» обучающийся должен:

### знать:

- физические основы работы лазера и интерферометра с большой разностью хода;
- свойства когерентного лазерного излучения;
- механизмы влияния обратного рассеяния на точность лазерных интерферометров;
- фундаментальные основы цифровой обработки информационных сигналов;
- принципы функционирования цифрового осциллографа и цифрового спектроанализатора.

### уметь:

- пользоваться своими знаниями для решения прикладных и технологических задач;
- рассчитывать характеристики исследуемых приборов;
- выполнять обработку и анализ результатов измерений;
- применять полученные знания для решения прикладных и технологических задач;
- проводить экспериментальные исследования на современных цифровых приборах, выполнять анализ результатов цифровых измерений;
- проводить компьютерное моделирование сигналов и их спектров.

### владеть:

- навыками использования современных методов измерения параметров исследуемых приборов в различных диапазонах длин волн излучения;
- математическим аппаратом для моделирования и расчёта характеристик исследуемых приборов;
- современными методами проведения измерений, навыками работы с прецизионными лазерными приборами;
- математическим аппаратом для моделирования и расчёт характеристик исследуемых приборов;
- математическим аппаратом анализа цифровых систем и устройств;
- навыками работы с современными цифровыми устройствами обработки сигналов.

### **3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

Текущий контроль проводится по итогам выполнения лабораторных работ. Каждая лабораторная работа включает в себя сдачу задания к допуску, выполнение и защиту эксперимента.

Перечень заданий (лабораторных работ).

1. Дискретизация аналоговых сигналов.
2. Спектры импульсных сигналов.
3. Дискретное во времени преобразование Фурье (ДВПФ) и дискретное преобразование Фурье (ДПФ).
4. Спектральный анализ детерминированных сигналов.
5. Работа с цифровым осциллографом в режиме анализатора спектра.

Перечень типовых (примерных) вопросов для проведения текущего контроля.

1. В чём заключается эффект наложения спектров при дискретизации сигналов?
2. В чём заключается условие Найквиста правильной дискретизации сигналов? Каковы последствия нарушения этого условия при дискретизации синусоидальных и полосовых сигналов?
3. В чём заключается метод дискретизации с недостаточной выборкой для сигналов с целочисленной полосой?
4. В чём заключается метод субдискретизации полосовых сигналов? Рассмотреть случай нецелочисленной полосы.
5. Что показывает цифровой осциллограф в режиме анализатора спектра? Почему в спектрограммах отсутствует дискретная структура?
6. Как зависят наблюдаемые спектры от количества отсчётов, записываемых в буфер?
7. Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) и его особенности.
8. Соответствие между ДПФ и непрерывным преобразованием Фурье.
10. Соответствие между ДПФ и рядом Фурье.
11. Особенности спектрального анализа методом ДПФ.
12. Для чего при ДПФ анализе используются окна?
13. Особенности применения окон при спектральном анализе методом ДПФ.
14. Понятие о быстром преобразовании Фурье.
15. Как зависят наблюдаемые спектры от размерности БПФ?
16. Получить выражение для спектра отрезка синусоиды. Как влияет длительность отрезка на спектр синусоиды?
17. Получить выражение для спектра периодической последовательности прямоугольных импульсов. Изобразить амплитудный спектр такой последовательности. На этом же чертеже изобразить спектр логически инвертированной последовательности.
18. Получить выражение для спектра конечной последовательности из  $N$  прямоугольных импульсов. Изобразить амплитудный спектр такой последовательности.

### **4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

1. Классификация сигналов: аналоговые, дискретные и цифровые.
2. Преобразование Фурье и его свойства.



3. Спектры импульсных сигналов: прямоугольного, треугольного и косинусоидального импульса.
4. Спектр периодически повторяющихся импульсов.
5. Спектры гармонических сигналов.
6. Дельта-функция и ее спектр.
7. Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) и его свойства.
8. Соответствие между рядом Фурье, преобразованием Фурье и дискретным преобразованием Фурье (ДПФ).
9. Понятия дискретизации и квантования.
10. Спектр дискретизованного сигнала.
11. Эффект наложения спектров при дискретизации.
12. Теорема Котельникова для сигнала с финитным спектром и выбор частоты дискретизации.
13. Дискретное во времени преобразование Фурье (ДВПФ) и его свойства.
14. Связь ДВПФ и ДПФ для периодических последовательностей отсчетов сигнала и последовательностей конечной длительности, интерполяция добавлением нулевых отсчетов в сигнал.
15. Окна в цифровом спектральном анализе, эффект растекания спектральных компонент из-за ограничения длительности сигнала.
16. Интерполяция сигнала с ограниченной спектральной полосой с помощью ДПФ.
17. Эффект наложения при прореживании дискретного сигнала.
18. Алгоритм Быстрого преобразования Фурье (БПФ) для эффективного вычисления ДПФ.

#### Критерии оценивания

Оценка "отлично (10)" выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка "отлично (9)" выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка "отлично (8)" выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка "хорошо (7)" выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка "хорошо (6)" выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка "хорошо (5)" выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка "удовлетворительно (4)" выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка "удовлетворительно (3)" выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка "неудовлетворительно (2)" выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка "неудовлетворительно (1)" выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Во время сдачи зачетов обучающиеся могут пользоваться результатами эксперимента, перечнем контрольных вопросов, а также справочной литературой, вычислительной техникой.

Зачет в 5 семестре и дифференцированный зачёт в 6 семестре проводятся в устной форме по результатам выполнения лабораторных работ.