

**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>	Лаборатория цифровой обработки сигналов
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Космические технологии
	Физтех-школа Аэрокосмических Технологий
	центр образовательных программ ФРКТ
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Дифференцированный зачет

2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 60 час.

Самостоятельная работа: 120 час.

Всего часов: 180, всего зач. ед.: 4

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 «Лаборатория цифровой обработки сигналов» направлен на практическое изучение основ цифровой обработки сигналов. В курсе главным образом рассматриваются вопросы цифровой фильтрации и цифрового спектрального анализа. Аудиторные задания по курсу проводятся в виде лабораторных работ. В ходе лабораторных работ обучающиеся на практике изучают возможности аппаратной реализации цифровых фильтров на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) и проводят компьютерное моделирование процессов, изучаемых в цифровой обработке сигналов, с помощью среды MATLAB и библиотек языка программирования Python.

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

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Целью курса «Лаборатория цифровой обработки сигналов» является ознакомление с различными научно-техническими направлениями в области цифровой обработки сигналов, главным образом с цифровой фильтрацией и с цифровым спектральным анализом.

### Задачи дисциплины

- овладение базовыми практическими навыками аппаратной реализации цифровых фильтров на ПЛИС;
- изучение основ цифрового спектрального анализа с проведением компьютерного моделирования с помощью MATLAB и библиотек Numpy, Scipy, Matplotlib, Astropy языка программирования Python;
- овладение навыками расчета и интерпретации основных дискретных преобразований сигналов: дискретного по времени преобразования Фурье (ДВПФ), дискретного преобразования Фурье (ДПФ), кратковременного дискретного преобразования Фурье (STFT), Z-преобразования.
- исследование сигналов с помощью цифрового осциллографа;
- приобретение практических навыков по использованию алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ) в цифровом спектральном анализе.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основные дискретные преобразования сигналов (дискретизация по времени и по частоте, ДВПФ, дискретный во времени ряд Фурье, ДПФ);
- эффекты наложения и растекания спектральных компонент при дискретизации сигнала и ограничении его длительности;
- основы цифровой фильтрации, цифрового спектрального анализа и корреляционного анализа радиосигналов.

уметь:

- вычислять основные дискретные преобразования при цифровой обработке сигналов;
- использовать непараметрические методы цифрового спектрального анализа сигналов;
- определять основные характеристики цифровых фильтров (передаточная функция, импульсная и переходная характеристики, амплитудно-частная и фазочастотная характеристики).

владеть:

- базовыми навыками аппаратной реализации цифровых фильтров на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС);
- навыками компьютерного моделирования цифровых фильтров и проведения цифрового спектрального анализа;
- эффективным алгоритмом вычисления дискретного преобразования Фурье – быстрым преобразованием Фурье (БПФ).

#### 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	Дискретные преобразования сигналов			10	20
2	Цифровые фильтры			10	20
3	Интерфейс ввода-вывода систем ЦОС реального времени			10	20
4	Цифровой спектральный анализ и корреляционная обработка радиосигналов			20	35
5	Многоскоростная обработка сигналов			10	25
Итого часов				60	120
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		180 час., 4 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

###### 1. Дискретные преобразования сигналов

## 1. Дискретные преобразования сигналов.

Преобразование Фурье. Свойства спектральной плотности. Дельта-функция и ее спектр. Спектры импульсных и периодических сигналов: прямоугольного и треугольного импульса, периодически повторяющихся импульсов, гармонических сигналов. Дискретизация аналоговых сигналов взятие отсчетов. Теорема Котельникова. Оценка спектра дискретизованного сигнала. Дискретное во времени преобразование Фурье (ДВПФ). Свойства ДВПФ. Дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Свойства ДПФ, связь ДПФ и ДВПФ для периодических последовательностей и для последовательностей конечной длительности. Интерполяция спектра добавлением нулевых отсчетов в сигнал. Алгоритм Быстрого преобразования Фурье (БПФ) для эффективного вычисления ДПФ. Кратковременное дискретное преобразование Фурье (STFT), анализ аудиофайла с применением ДПФ и STFT. Интерполяция сигналов с ограниченной спектральной полосой с помощью ДПФ, эффект наложения при прореживании дискретного сигнала. Представление сигналов ортогональными рядами. Общий метод дискретизации.

## 2. Цифровые фильтры

### 2. Цифровые фильтры.

Линейные дискретные фильтры. Переход от преобразования Лапласа к z-преобразованию. Свойства z-преобразования. Вычисление обратного z-преобразования. Уравнение цифрового фильтра в терминах z-преобразования. Импульсная и передаточная характеристики цифрового фильтра. Рекурсивные фильтры нижних частот первого и второго порядка. Фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтры). Разностные уравнения, передаточные функции и структурные схемы цифровых фильтров. Реализация в виде Verilog модулей с последующей записью на ПЛИС.

## 3. Интерфейс ввода-вывода систем ЦОС реального времени

### 3. Интерфейс ввода-вывода систем ЦОС реального времени.

Цифровая обработка сигналов в системах реального времени. Типовая блок-схема устройства обработки сигналов в радиолокации, цифровой радиосвязи, телекоммуникационных системах. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП), цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Апертурная погрешность АЦП. Устройство выборки-хранения. Шум квантования n-разрядного АЦП. Восстановление сигналов по их отсчетам путем интерполяции. ЦАП как интерполятор нулевого порядка. Методы преобразования узкополосных радиосигналов из аналоговой формы в цифровую.

## Семестр: 2 (Весенний)

### 4. Цифровой спектральный анализ и корреляционная обработка радиосигналов

### 4. Цифровой спектральный анализ и корреляционная обработка радиосигналов.

Дискретный случайный процесс. Понятие спектральной плотности мощности (СПМ). Спектральный анализ случайных последовательностей методом ДПФ. Метод периодограмм оценки СПМ. Методы сглаживания оценок СПМ (Бартлетта, Уэлча). Особенности цифрового спектрального анализа (ЦСА) методом ДПФ: эффекты наложения, растекания спектральных компонент, паразитной амплитудной модуляции. Оконные функции. Примеры окон. Прямоугольное окно, окна Ханна и Хэмминга. Выбор оконных функций при цифровом спектральном анализе. Конструирование оконной функции. Корреляционная функция, ковариационная функция случайного процесса. Расчет взаимокорреляционной функции. Теорема Винера-Хинчина. Корреляционная обработка сигнала с помехой. Оценка времени корреляции узкополосного гауссова случайного процесса.

## 5. Многоскоростная обработка сигналов

### 5. Многоскоростная обработка сигналов.

Децимация и интерполяция. Система однократной интерполяции. Интерпретация процедуры интерполяции во временной и в частотной области. Система однократной децимации. Интерпретация процедуры децимации в частотной и во временной области. Система однократной передискретизации. Иллюстрация интерполяции с рациональным шагом.

## 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, лабораторные макеты Digilent Nexys-2 Board.

Программное обеспечение: пакет прикладных программ MATLAB, дистрибутив Anaconda для языка программирования Python 3, пакет GNU Octave, среда разработки Xilinx ISE Design Suite.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная 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. Начала цифровой обработки сигналов [Текст] : для студентов-физиков с упражнениями в MATLAB : учеб. пособие для вузов / Е. В. Воронов ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 2010 .— 160 с.

### Дополнительная литература

1. 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.
2. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А. Б. Сергиенко - СПб. Питер, 2006, 2007
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)

Сайт кафедры Радиоэлектроники и прикладной информатики МФТИ: <http://kprf.mipt.ru/>, Google Classroom: LMS: <https://classroom.google.com/>, Google Colaboratory: Онлайн-сервис: <http://colab.research.google.com/>, MATLAB Online: Онлайн-сервис: <https://www.mathworks.com/>.

## **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:

пакет прикладных программ MATLAB,  
дистрибутив Anaconda для языка программирования Python 3,  
среда разработки Xilinx ISE Design Suite,  
пакет GNU Octave.

Онлайн-сервисы для компьютерного моделирования:

Google Colaboratory <http://colab.research.google.com/>,  
MATLAB Online <https://www.mathworks.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 Matlab и Python 3 выполняются на компьютерах аудитории, в случае дистанционного обучения рекомендуется использование онлайн-сервисов Google Colaboratory и MATLAB Online.

Для организации учебного процесса используется 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», «Учебные курсы / Основы цифровой обработки сигналов»)

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Космические технологии Физтех-школа Аэрокосмических Технологий центр образовательных программ ФРКТ
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (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-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Лаборатория цифровой обработки сигналов» обучающийся должен:

### знать:

- основные дискретные преобразования сигналов (дискретизация по времени и по частоте, ДВПФ, дискретный во времени ряд Фурье, ДПФ);
- эффекты наложения и растекания спектральных компонент при дискретизации сигнала и ограничении его длительности;
- основы цифровой фильтрации, цифрового спектрального анализа и корреляционного анализа радиосигналов.

### уметь:

- вычислять основные дискретные преобразования при цифровой обработке сигналов;
- использовать непараметрические методы цифрового спектрального анализа сигналов;
- определять основные характеристики цифровых фильтров (передаточная функция, импульсная и переходная характеристики, амплитудно-частная и фазочастотная характеристики).

### владеть:

- базовыми навыками аппаратной реализации цифровых фильтров на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС);
- навыками компьютерного моделирования цифровых фильтров и проведения цифрового спектрального анализа;
- эффективным алгоритмом вычисления дискретного преобразования Фурье – быстрым преобразованием Фурье (БПФ).

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

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлого занятия.

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

Промежуточный контроль в 9 семестре и в 10 семестре проводится в виде дифференцированного зачета на основании результатов выполнения лабораторных работ.

Перечень тем лабораторных работ и примеров контрольных вопросов.

9-й семестр

Тема «Дискретные преобразования сигналов».

1. Записать формулы анализа и синтеза для преобразования Фурье, дискретного во времени преобразования Фурье (ДВПФ), дискретного преобразования Фурье (ДПФ).
2. Объяснить связь между ДПФ и ДВПФ для периодических последовательностей и для последовательностей конечной длительности.
3. Определить границы для выбора частоты дискретизации для периодического сигнала исходя из теоремы отсчетов Котельникова.
4. Пояснить, в чем заключается алгоритм вычисления ДВПФ на конечном наборе точек оси частот с помощью быстрого преобразования Фурье.

Тема «Цифровые фильтры».

1. Записать в общем виде разностное уравнение фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтра), рекурсивного фильтра N-го порядка.
2. Привести примеры структурных схем для реализации КИХ фильтра, рекурсивных фильтров первого и второго порядка.
3. Определить передаточную функцию цифрового фильтра по его импульсной характеристике. Провести анализ устойчивости фильтра.

Тема «Интерфейс ввода-вывода систем ЦОС реального времени».

1. Привести типовую блок-схему устройства обработки сигналов в радиолокации, цифровой радиосвязи, телекоммуникационных системах
2. Объяснить, как относительный уровень шума квантования n-разрядного АЦП зависит от числа разрядов.
3. Пояснить, в чем заключается использование ЦАП как интерполятора нулевого порядка.

10-й семестр

Тема «Цифровой спектральный анализ и корреляционная обработка радиосигналов».

1. Дать определения стационарного случайного процесса, спектральной плотности мощности стационарного случайного процесса
2. Сформулировать алгоритм оценки спектральной плотности мощности методом периодограмм.
3. Привести основные методы сглаживания оценок спектральной плотности мощности по методу периодограмм.
4. Объяснить влияние выбора оконных функций на результат спектрального анализа гармонического сигнала.
5. Дать определения функции корреляции, функции ковариации, коэффициента корреляции, объяснить физический смысл коэффициента корреляции.
6. Указать связь спектральной плотности мощности с функцией корреляции случайного процесса.

Тема «Многоскоростная обработка сигналов».

1. Привести интерпретацию процедуры интерполяции во временной и в частотной области.
2. Объяснить возникающие при интерполяции и децимации эффекты в спектральной области.
3. Привести пример реализации интерполяции с рациональным шагом.

## 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

Проверка практических навыков, теоретических знаний и умений должна осуществляться по результатам текущего и промежуточного контроля без специальных опросов в конце семестра. Если отдельным студентам требуется дополнительная проверка, то она проводится с помощью индивидуальных теоретических и практических заданий и лабораторных работ, аналогичных тем, которые используются в текущем и промежуточном контроле.