

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

УТВЕРЖДЕНО

**Директор передовой инженерной
школы радиолокации,
радионавигации и программной
инженерии**

М.А. Кудров

Рабочая программа дисциплины (модуля)

по дисциплине:	Цифровая обработка сигнала
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Беспилотные авиационные системы Физтех-школа авиационных и цифровых технологий кафедра технологий проектирования сложных технических систем
курс:	3
квалификация:	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 6 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: А.Л. Делицын, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры технологий проектирования сложных технических систем
11.03.2024

Аннотация

Курс ЦОС посвящен вопросам применения цифровых методов к анализу, обработке и распознаванию сигналов. В нем рассмотрен анализ сигналов и линейных систем на основе рядов и преобразования Фурье, вопросы формирования сигналов для многоканальных линий связи и их цифрового разделения. На основе преобразования Фурье и Лапласа представлен метод анализа линейных систем. Рассмотрены вопросы применения дискретного преобразования Фурье и Z-преобразования. Изложен алгоритм быстрого преобразования Фурье и его применения для вычисления операции свертки. В качестве примера приложений ЦОС рассмотрена задача восстановления сигнала в линейной волоконно-оптической линии связи с дисперсией. Изучены основные типы фильтров и их свойства. Изложены алгоритмы проектирования бих- и ких- фильтров. Приведены способы улучшения характеристик фильтров. Рассмотрены алгоритмы детектирования сигналов на фоне шума и их приложения.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- знакомство студентов кафедры Технологии проектирования сложных технических систем с основами классической теории управления, статистической теории управления и цифровой обработки сигналов, а также пополнение багажа знаний и умений студентов теоретическими и вычислительными методами обозначенных разделов теории управления.

Задачи дисциплины

- укрепление фундаментальных знаний студентов, полученных на общефакультетских курсах по математике и физике,

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
ОПК-5 Способен участвовать в проведении фундаментальных и прикладных исследований и разработок, самостоятельно осваивать новые теоретические, в том числе, математические методы исследований, и работать на современной экспериментальной научно-исследовательской, измерительно-аналитической и технологической аппаратуре	ОПК-5.1 Способен решать поставленные задачи в области теоретических и экспериментальных исследований и разработок
	ОПК-5.2 Обладает способностью к освоению новых знаний на основе изучения литературы, научных статей и других источников
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.3 Владеет культурой постановки научной задачи и моделирования естественнонаучных объектов и систем
	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.2 Имеет глубокое знание и понимание базовых математических дисциплин
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
	ПК-1.5 Владеет навыками безопасной работы с современными научными приборами и другим экспериментальным оборудованием
	ПК-1.6 Знает основные правила поведения и работы в современной научной лаборатории

	ПК-1.7 Способен оценивать требуемые ресурсы (материальные и временные) для планирования и проведения научного эксперимента
	ПК-1.8 Владеет навыками работы с современными языками программирования и программными пакетами для научных расчетов
	ПК-1.9 Знает перечень ведущих периодических научных изданий и способен выделять актуальные научные публикации в профессиональной области
ПК-2 Способен анализировать полученные в ходе научно-исследовательской работы данные и делать научные выводы (заключения)	ПК-2.1 Владеет методами статистической обработки и анализа научных данных
	ПК-2.2 Умеет находить ключевые параметры, определяющие изучаемое явление, и производить численные оценки по порядку величины
	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
	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений
	ПК-3.3 Умеет производить оценку точности численных методов, используемых на ЭВМ, вычислительной сложности используемых алгоритмов и объема требуемых вычислительных ресурсов
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области
	ПК-4.2 Знает источники происхождения и умеет производить оценку погрешности измерений и достоверности экспериментальных результатов
	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- язык классической и статистической теорий управления; роль физико-математического моделирования в задачах анализа и проектирования управляемых технических систем; место цифровой обработки сигналов в задачах управления.

уметь:

- составлять математические динамические модели технических систем, анализировать их теоретическими и численными методами, проектировать фильтры и регуляторы.

владеть:

- средствами численного моделирования динамических систем, анализа и синтеза фильтров и регуляторов.

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	Сигналы и их спектральные характеристики.	2	2		2
2	Примеры разложения функций в ряд Фурье. Свойства рядов Фурье. Базисные функции обобщенных рядов Фурье.	2	2		2
3	Преобразование Фурье и его применения для анализа линейных систем.	2	2		2
4	Дискретное преобразование Фурье.	2	2		2
5	Алгоритмы и применение БПФ.	2	2		2
6	Операция свертки и применение БПФ к ее вычислению. Связь между длительностью импульса и шириной его спектра.	2	2		2
7	Импульсные воздействия в линейных системах. Применения метода преобразования Фурье и преобразования Лапласа для задачи распространения сигнала в волноводной линии.	2	2		2
8	Восстановление сигналов по их отсчетам.	2	2		2
9	Модуляция и демодуляция.	2	2		2
10	Основы цифровой фильтрации.	2	2		2
11	Z-преобразование. Свойства Z-преобразования.	2	2		2
12	Примеры применения Z-преобразования. Обратное Z-преобразование.	2	2		2
13	Цифровые фильтры с конечной импульсной характеристикой (ких-фильтры).	2	2		2
14	Детектирование зашумленного сигнала.	2	2		2
15	Вычисление матрицы дальность-скорость.	2	2		2
Итого часов		30	30		30
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 6 (Весенний)

1. Сигналы и их спектральные характеристики.

Дискретизация сигнала. Основные функциональные пространства и метрики, используемые для описания сигналов. Элементы теории ортогональных рядов и их применение для спектрального разложения сигнала. Тригонометрические и другие системы базисных функций. Примеры базисов, используемых в общих рядах Фурье. Основные свойства рядов Фурье. Полнота базисных функций. Равенство Парсеваля.

2. Примеры разложения функций в ряд Фурье. Свойства рядов Фурье. Базисные функции обобщенных рядов Фурье.

Примеры разложения сигнала в ряд Фурье. Ступенчатый сигнал. Сходимость ряда Фурье для ступенчатого сигнала. Осцилляции ряда Фурье вблизи границы ступенки. Пилообразный сигнал. Последовательность треугольных импульсов. Скорость сходимости ряда Фурье и свойства рядов Фурье. Связь скорости сходимости и гладкости функции. Способы улучшения сходимости ряда Фурье. Неравенство Бесселя. Равенство Парсеваля. Некоторые базисы. Импульсные базисные функции. Комплексные базисы. Дискретные экспоненты. Двумерные базисные функции. Функции Уолша. Функции Радемахера. Представление Пэли функций Уолша через функции Радемахера. Двумерные функции Уолша. Функции Уолша-Адамара. Функции Хаара. Дискретные базисные функции. Система единичных импульсов. Дискретные экспоненты. Их свойства. Ряды по системе дискретных экспоненциальных функций и их связь с дискретным преобразованием Фурье.

Двумерные дискретные экспоненты.

3. Преобразование Фурье и его применения для анализа линейных систем.

Преобразование Фурье и его основные свойства: понятие спектральной плотности и ее свойства, теорема запаздывания, формула Парсеваля, преобразование Фурье произведения функций, преобразование Фурье свертки. Примеры спектров сигналов: спектр ступенчатого, треугольного, гауссова колокола и других сигналов. Преобразование Хартли. Основные теоремы и примеры применения для преобразования Хартли.

4. Дискретное преобразование Фурье.

Интегральное преобразование Фурье и дискретное преобразование Фурье. Аппроксимация интеграла Фурье по схеме прямоугольников. Особенность задачи аппроксимации интеграла от периодической функции. Сколь угодно высокий порядок аппроксимации интеграла от периодической бесконечно гладкой функции при применении Прямое и обратное дискретное преобразование Фурье. Экспоненциальная и тригонометрическая форма ДПФ. Проверка обратимости дискретного преобразования Фурье. Примеры применения дискретного преобразования Фурье. Дискретное преобразование Фурье для одного и нескольких ступенчатых импульсов. Аналитическая формула при применении прямого ДПФ. ДПФ дискретного \cos . Свойства ДПФ. Симметрия ДПФ при преобразовании вещественного сигнала. Линейность ДПФ. Теорема о сдвиге. Дискретное Фурье преобразование и задача вычисления полинома на единичной окружности. Связь сеток и дискретных параметров для искомой функции и ее дискретного преобразования Фурье. Частота Найквиста. Прямоугольное окно и боковые лепестки спектра. Использование различных окон (Хэннинга и Хемминга) для уменьшения боковых лепестков. Особенности практического применения ДПФ для аппроксимации интегрального преобразования Фурье. Операция сдвига и выравнивания фазы для применения алгоритма вычисления полинома на окружности к вычислению преобразования Фурье. Демонстрация применения для Гауссова колокола. Матричная форма ДПФ. Временная сложность $O(N^2)$ при непосредственном вычислении дискретного преобразования Фурье. Основная идея БПФ. Сведение двойных сумм к повторным с уменьшением числа операций. Временная сложность $O(1/2 N \log N)$ БПФ.

5. Алгоритмы и применение БПФ.

Подготовка сигнала к преобразованию Фурье. Использование информации о ширине спектра и выбор частоты дискретизации сигнала не менее, чем в два раза больше ширины спектра сигнала. Применение окон для взвешивания сигнала. Алгоритм БПФ по основанию 2. Формула ДПФ. Разбиение входной последовательности на две - с четными и нечетными индексами. Представление исходной суммы ДПФ в виде двух сумм, соответствующих четным и нечетным индексам входной последовательности. Экспонента с постоянным показателем степени – постоянный множитель второй суммы. Возможность ее выноса за знак второй суммы – ключевой момент алгоритма. Сведение вычисления ДПФ для сигнала, имеющего N отсчетов к вычислению двух Фурье преобразований для сигналов, имеющих $N/2$ отсчетов.

Сведение вычисления ДПФ в N отсчетах в спектральной области к комбинации ДПФ для $N/2$ значений в спектральной области для сигналов, имеющих $N/2$ отсчетов. Метод основанный на изменении поворачивающего множителя. Рекурсивное применение алгоритма. Оценка временной сложности алгоритма. Вычислительная сложность $O(1/2 N \log N)$ операций БПФ при временной сложности ДПФ $O(N^2)$. Практическая организация вычислений в БПФ.

Алгоритм бабочки. Пример сигнального графа для сигнала, имеющего 8 отсчетов. Графическое изображение алгоритма. Варианты организации вычислений в БП. Понятие об алгоритмах прореживания по времени и по частоте. Численный пример. Перестановка входных и выходных данных при применении БПФ. Перемешивание входных отсчетов на выходе БПФ из-за разбиения исходной последовательности на четные и нечетные части.

Бит-реверсивность перемешивания выходных отсчетов. Восстановление правильного порядка следования выходных отсчетов

6. Операция свертки и применение БПФ к ее вычислению. Связь между длительностью импульса и шириной его спектра.

Оператор свертки как линейный отклик системы на воздействие. Нелинейные системы.

Сверточный характер линейных операторов, описывающих отклик линейной системы на внешнее воздействие при независимости отклика от начального времени воздействия.

Определение дельта-функции. Дельта-функция как линейный функционал. Дельта-образные последовательности. Функция неопределенности. Примеры. Спектры периодических сигналов. Формула Пуассона. Определение операции дифференцирования как свертки.

Обобщенные операции дифференцирования и интегрирования произвольного порядка. Операции дробного дифференцирования и интегрирования. Нелинейные системы. Нелинейный характер современных волоконно-оптических систем дальней связи. Ряды Вольтерра и их аппроксимации. Ряды Вольтерра как обобщение оператора свертки для линейной системы на нелинейные. Проблема вычислительной сложности ряда Вольтерра. Экспоненциальный рост запросов к памяти и временной сложности алгоритма в зависимости от порядка ряда Вольтерра. Понятие о малоранговых аппроксимациях тензора. Сингулярное разложение и малоранговая аппроксимация матрицы. Каноническое разложение тензора. Разложение Таккера. Тензорный поезд и обобщенное разложение Таккера для многомерных тензоров. Сведение задачи вычисления ряда Вольтерра для тензоров высокого порядка к вычислению одномерных сверток. Применение БПФ к вычислению свертки. Применение прямого преобразования Фурье для свертываемых сигналов. Перемножение Фурье-образов свертываемых сигналов. Обратное преобразование Фурье свертки в спектральной области. Оценка временной сложности исходной операции свертки $O(N^2)$. Оценка временной сложности операции свертки с помощью БПФ $O(N \log N)$ операций умножения.

7. Импульсные воздействия в линейных системах. Применения метода преобразования Фурье и преобразования Лапласа для задачи распространения сигнала в волноводной линии.

Метод интеграла Фурье (спектральный). Приложение преобразования Фурье для решения задачи компенсации искажений в волоконно-оптической линии связи как пример практического метода ЦОС. Линейное уравнение Шредингера для огибающей оптического сигнала как базовая модель передачи сигнала в волоконной линии. Сведение уравнения Шредингера к обыкновенному дифференциальному уравнению прямым преобразованием Фурье. Эволюция сигнала в спектральной области. Понятие фильтра. Фильтр для линейного уравнения Шредингера. Решение искомой задачи с помощью обратного преобразования Фурье. Анализ решения. Частные случаи задачи. Начальные условия в виде плоской волны и импульса в виде Гауссова колокола. Эволюция начальных данных. Предварительная оценка временной сложности алгоритма определения сигнала на основе метода Фурье. Операторный метод (Метод интеграла Лапласа). Преобразование Лапласа для функций с не более чем экспоненциальным ростом на бесконечности. Примеры прямого преобразования Лапласа. Основные свойства преобразования Лапласа. Аналоги свойств преобразования Фурье. Обратное преобразование Лапласа. Применение формулы Коши для вычисления интеграла по вычетам. Рассмотрение волноводной линии с гармоническим источником волн на основе волнового уравнения. Применение преобразования Лапласа для сведения эволюционной начально-краевой задачи к краевой. Применение метода Фурье-преобразования для решения краевой задачи. Применение обратного преобразования Лапласа для вычисления решения эволюционной первоначальной задачи. Анализ решения. Представление решения в виде бегущих волн, переносящих сигнал и затухающих.

8. Восстановление сигналов по их отсчетам.

Спектр дискретного сигнала. Построение функции по последовательности отсчетов. Частотно-временная двойственность преобразования Фурье – дискретный сигнал – периодический спектр, дискретный спектр – периодический сигнал. Влияние формы дискретизирующих импульсов на спектр. Мультипликативное искажение спектра дискретного сигнала. Восстановление сигнала в частотной области. Выделение полосы частот. Использование фильтра низких частот. Применение обратного преобразования Фурье и восстановление сигнала. Восстановление сигнала во временной области. Теорема Котельникова. Представление сигнала с конечным спектром в виде интеграла Фурье.

Разложение Фурье-образа сигнала в ряд Фурье в спектральной области. Представление искомой функции в виде ряда по функциям sinc. Интерполяционный тригонометрический ряд. Связь частоты следования точек отсчета с шириной спектра исходного сигнала. Возможность полного восстановления сигнала по дискретному набору частот. Идеальная интерполяция и реальные фильтры. Фильтры ИФНЧ. Восстановление сигнала с помощью интерполяционного полинома. Интерполяция нулевого порядка. Частотная характеристика оператора интерполяции нулевого порядка. Фазовая и амплитудная характеристики. Наличие высокочастотных пульсаций фазовой характеристики. Отличие частотной характеристики интерполяционного оператора от частотной характеристики идеального фильтра низких частот. Интерполяционный полином первого порядка. Частотная характеристика оператора интерполяции. Уменьшение амплитуды высокочастотных пульсаций фазовой характеристики.

9. Модуляция и демодуляция.

Частотное разделение каналов. Многоканальная передача сигнала. Переход в частотную область. Применение теоремы о сдвиге для преобразования Фурье. Алгоритм построения многочастотного сигнала. Разделение по частотам и тонам. Слепая передача по частотам при известных тонах. Амплитудная модуляция. Одночастотная амплитудная модуляция. Несущая частота и огибающая. Энергетические соотношения в амплитудно-модулированном сигнале.

Демодуляция амплитудно-модулированного сигнала. Синхронное детектирование. Умножение на опорное колебание с несущей частотой. Разделение результата на два слагаемых – требуемый амплитудный сигнал и высокочастотный амплитудно-модулированный сигнал, который удаляется фильтром низких частот. Варианты амплитудной модуляции. Однополосная амплитудная модуляция. Демодуляция однополосного сигнала. Фазовая и частотная модуляция. Фазовая модуляция. Частотная модуляция. Гармоническая угловая модуляция. Спектр сигнала. Ширина спектра сигнала с гармонической угловой модуляцией. Демодуляция фазовой и угловой модуляции. Квадратурная или амплитудно-фазовая модуляция. Задание сигнала в виде суммы двух амплитудно-модулированных сигналов со сдвигом несущей частоты. Понятие сигнального созвездия. Примеры созвездий QAM 4, QAM 8, QAM 16, QAM 64. Прореживание сигнала. Свертка с фильтром, выделяющим конечную полосу. Спектр сигнала с квадратурной модуляцией. Демодуляция. Восстановление символов по сигнальному созвездию методом наименьших квадратов. Графическое представление сигнального созвездия. Глазковая диаграмма. Примеры.

10. Основы цифровой фильтрации.

Назначение и основные понятия цифровой фильтрации. Линейные дискретные фильтры.

Подавление нежелательных частот и выделение сигнала на фоне шума. Рекурсивные и нерекурсивные фильтры. Графическая схема фильтра на примере операции усреднения. Элементы задержки входной последовательности на интервал дискретизации. Линейные фильтры. Симметричные фильтры. Память фильтра. Графическая схема нерекурсивного фильтра. Графическая схема рекурсивного фильтра. Импульсная характеристика нерекурсивного цифрового фильтра. Операция фильтрации как свертка. Применение интегральных преобразований к анализу фильтров. Частотная характеристика фильтра.

Операция фильтрации в спектральной области как операция умножения преобразований Фурье или Лапласа фильтра и сигнала. Обращение свертки. Формы реализации дискретных фильтров. Каноническая форма. Графическая схема на примере сумматора. Транспонированная форма. Последовательная или каскадная схема. Параллельная форма.

Адаптивные фильтры. Основные понятия адаптивных фильтров. Обучение с учителем. Обучение без учителя. Линейные и нелинейные адаптивные системы. Линейные адаптивные системы с нерекурсивным фильтром. Устойчивость нерекурсивных фильтров. Общая структура адаптивных фильтров. Алгоритмы LMS – метод наименьших квадратов и RLMS – рекуррентный метод наименьших квадратов для вычисления коэффициентов линейных параметров, но не сигналу, фильтрам.

11. Z-преобразование. Свойства Z-преобразования.

Определение Z-преобразования. Z-преобразование как дискретный аналог преобразования Лапласа. Линейность Z-преобразования. Z-преобразование последовательности с задержкой.

Z-преобразование свертки сигналов. Z-преобразование знакопеременного сигнала.

Z-преобразование последовательности чередующейся во времени. Z-преобразование сигнала, измененного вставкой нулей. Разностные уравнения. Функция передачи.

Описание оператора свертки, задающего фильтр, как разностного уравнения. Конечные разности сеточных функций. Разности высокого порядка. Пример. Применение разделенных разностей к вычислению сумм степеней натуральных чисел. Свойства разностных уравнений. Линейные разностные уравнения. Решение однородных линейных разностных уравнений. Характеристическое уравнение. Примеры. Применение Z –преобразования к решению разностного уравнения. Сведение разностного уравнения к алгебраическому в пространстве образов в результате применения преобразования. Аналогия с преобразованием Лапласа для дифференциальных уравнений. Единообразное применение метода для однородных и неоднородных уравнений. Учет начальных условий. Определение функции передачи. Частотная характеристика функции передачи. Нули и полюсы функции передачи. Связь расположения нулей и полюсов функции передачи с поведением амплитудно-частотной характеристики системы. Наличие провалов у амплитудно-частотной характеристики вблизи нулей и подъемов вблизи полюсов. Примеры применения Z-преобразования к решению разностных уравнений. Определение оригинала по образу.

12. Примеры применения Z-преобразования. Обратное Z-преобразование.

Примеры вычисления Z-преобразования. Суммирование рядов по отрицательным степеням. Точно вычисляемые суммы. Единичная импульсная функция, Ступенчатая функция. Действительная и комплексная экспонента. Дискретные синусоида и косинусоида. Вычисление обратного Z-преобразования. Z-преобразование как ряд Лорана. Применение интеграла Коши от степени z , умноженный на прямое преобразование для определения коэффициентов ряда Лорана. Формула вычисления обратного Z-преобразования.

Разложение дробно-рациональной функции на простейшие дроби. Вычисление обратного Z-преобразования сведением исходной задачи к применению формулы Коши для элементарных дробей. Бих-фильтры. Обратная связь и разностные уравнения для бих-фильтров. Применение Z-преобразование и передаточная функция бих-фильтров.

Полюсы и нули передаточной функции в комплексной плоскости и условие устойчивости.
Структура бих-фильтра. Прямая форма I. Передаточная функция бих-фильтра M-го порядка в z-области. Частотная характеристика бих-фильтра M-го порядка в экспоненциальной форме.
Частотная характеристика бих-фильтра M-го порядка в алгебраической форме. Другие структуры бих-фильтров. Методы проектирования бих-фильтров. Метод инвариантного преобразования импульсной характеристики. Примеры применения к проектированию бих-фильтров. Метод проектирования бих-фильтров с помощью билинейного преобразования. Пример проектирования бих-фильтра с помощью метода билинейного преобразования. Оптимизационный метод проектирования бих-фильтров.

13. Цифровые фильтры с конечной импульсной характеристикой (ких-фильтры).

Способы реализации. Свертка в ких-фильтрах. Проектирование ких-фильтра нижних частот. Проектирование с помощью окон, т.е. метод разложения в ряд Фурье. Пример. Выбор начальной идеальной частотной характеристики в виде функции ступеньки в спектральной области, подавляющей все частоты выше заданной. Вычисление обратного Фурье-преобразования для определения характеристической функции во временной области. Практическая реализация Фурье-преобразования с помощью БПФ. Качество фильтра и методы улучшения его характеристик. Связь качества фильтра с количеством используемых отсчетов. Наличие пульсаций амплитудно-частотной характеристики для идеального фильтра в виде ступеньки в спектральной области. Явление Гиббса для разложения в ряд Фурье разрывной функции. Применение окон для уменьшения пульсаций. Примеры. Окно Хемминга. Окно Блэкмана. Задача регулирования соотношения между шириной главного лепестка и размером боковых лепестков. Окна Чебышева и окно Кайзера. Их амплитудные спектры. Проектирование фильтров высоких частот. Проектирование ких-фильтров оптимальным методом - метод замен Ремеза. Задание параметров фильтра - границы полосы пропускания и частоты, на которой начинается полоса задерживания. Задание параметров, определяющих неравномерность амплитудно-частотной характеристики в полосе пропускания и подавление в зоне задержки. Алгоритм оптимизации введенных параметров.

14. Детектирование зашумленного сигнала.

Оптимальная оценка параметров сигнала. Обнаружение сигнала. Смесь сигнал и шума на входе приемника. Предположения о том, что известен вид сигнала, распределение вероятности шума, априорное распределение вероятностей параметра, задающего отношение сигнал-шум. Апостериорная плотность вероятности параметра отношения сигнал-шум. Формула Байеса. Функция правдоподобия параметра. Критерий максимума апостериорной вероятности. Выражение для функции правдоподобия при условии, что шум является нормально распределенным и белым. Функция правдоподобия при обработке N отсчетов принимаемого колебания. Функция правдоподобия при обработке непрерывной реализации принимаемого колебания. Оптимальный корреляционный приемник. Корреляционный приемник импульсного сигнала. Структурная схема оптимального приемника. Отношение сигнал-шум на выходе коррелятора. Сигнальная и шумовая функции. Вычисление максимума сигнальной функции. Вычисление дисперсии. Оптимальный обнаружитель полностью известного сигнала. Характеристика оптимального обнаружителя. График зависимости вероятности обнаружения от отношения сигнал-шум. Оптимальный обнаружитель сигнала с неизвестной начальной фазой. Характеристики оптимального обнаружителя со случайной начальной фазой. Оптимальное различение начальных сигналов. Вероятность ошибки при оптимальном различении двух известных сигналов. Оптимальная обработка сигналов с использованием согласованных фильтров. Согласованный фильтр. Схема оптимального приемника для различения двух равновероятных импульсов одинаковой длительности с различной частотой и случайной начальной фазой.

15. Вычисление матрицы дальность-скорость.

Импульсно-доплеровский принцип обработки радиолокационной информации. Доплеровская частота как основной источник информации. Согласованная фильтрация сигналов методом быстрой свертки с помощью БПФ. Доплеровская фильтрация. Преобразование сигнала в амплитудно-частотный спектр. Передача доплеровских частот на блок сопровождения.

Определение скорости цели на основе последовательности доплеровских частот. Построение дальностно-скоростного портрета цели. Использование модели движения цели для ее сопровождения и предсказания поведения. Формирование информации для блока сопровождения. Методы подавления помех. Основная опасность состоит в помехах, искажающих доплеровскую частоту. Блок-схема метода. Оценка качества характеристик метода. Оценки дальности и устойчивой работы метода. Разрешения различных целей. Возможности сопровождения группы целей. Уровень шума, допускающий выделение цели.

Оценка числа итераций при определении скорости как функции частоты Доплера. Временная сложность алгоритма. Задача организации высокопроизводительных вычислений в ЦОС для обнаружения подвижных объектов в координатах дальность-скорость. Применение целочисленной арифметики для увеличения скорости вычислений.

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

Учебная аудитория, оснащенная мультимедийным оборудованием (проектор или плазменная панель), доской.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Цифровая обработка сигналов и её применение [Текст], [сборник статей]/отв. ред. Л. П. Ярославский, Акад. наук СССР, Ин-т проблем передачи информации, -М., Наука, 1981
2. Цифровая обработка сигналов, Discrete-Time Signal Processing, Электронная версия печатной публикации / . — Москва, Техносфера, 2012
3. Цифровая обработка сигналов [Текст] : учеб. пособие для вузов / Л. М. Гольденберг, Б. Д. Матюшкин, М. Н. Поляк. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Радио и связь, 1990. — 256 с.

Дополнительная литература

1. Цифровая обработка сигналов [Текст] : тексты лекций / В. А. Морозов, В. В. Поспелов ; под ред. О. Б. Арушаняна ; Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова ; Научно-исследовательский ВЦ. — М. : МГУ, 1986. — 81 с.

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

<http://www.dsplib.ru/>

http://www.mathworks.com/help/toolbox/comm/ug/comm_ug_collection.html

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

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

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

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общими понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные понятия и утверждения теории передачи сигналов, основные методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов.

Успешное освоение курса требует напряженной самостоятельной работы студента. В программе курса отведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам занятий, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенные для самостоятельного изучения, решение задач;
- подготовка к дифференцированному зачёту.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов следует обращаться за консультациями к лектору.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению: Прикладные математика и физика
профиль подготовки: Беспилотные авиационные системы
Физтех-школа авиационных и цифровых технологий
кафедра технологий проектирования сложных технических систем
курс: 3
квалификация: бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 6 (весенний) - Дифференцированный зачет

Разработчик: А.Л. Делицын, д-р физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
ОПК-5 Способен участвовать в проведении фундаментальных и прикладных исследований и разработок, самостоятельно осваивать новые теоретические, в том числе, математические методы исследований, и работать на современной экспериментальной научно-исследовательской, измерительно-аналитической и технологической аппаратуре	ОПК-5.1 Способен решать поставленные задачи в области теоретических и экспериментальных исследований и разработок
	ОПК-5.2 Обладает способностью к освоению новых знаний на основе изучения литературы, научных статей и других источников
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.3 Владеет культурой постановки научной задачи и моделирования естественнонаучных объектов и систем
	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.2 Имеет глубокое знание и понимание базовых математических дисциплин
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
	ПК-1.5 Владеет навыками безопасной работы с современными научными приборами и другим экспериментальным оборудованием
	ПК-1.6 Знает основные правила поведения и работы в современной научной лаборатории
	ПК-1.7 Способен оценивать требуемые ресурсы (материальные и временные) для планирования и проведения научного эксперимента
	ПК-1.8 Владеет навыками работы с современными языками программирования и программными пакетами для научных расчетов
	ПК-1.9 Знает перечень ведущих периодических научных изданий и способен выделять актуальные научные публикации в профессиональной области
ПК-2 Способен анализировать полученные в ходе научно-исследовательской работы данные и делать научные выводы (заключения)	ПК-2.1 Владеет методами статистической обработки и анализа научных данных
	ПК-2.2 Умеет находить ключевые параметры, определяющие изучаемое явление, и производить численные оценки по порядку величины
	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	ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования
	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений

избранной предметной области	ПК-3.3 Умеет производить оценку точности численных методов, используемых на ЭВМ, вычислительной сложности используемых алгоритмов и объема требуемых вычислительных ресурсов
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области
	ПК-4.2 Знает источники происхождения и умеет производить оценку погрешности измерений и достоверности экспериментальных результатов
	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Цифровая обработка сигнала» обучающийся должен:

знать:

- язык классической и статистической теорий управления; роль физико-математического моделирования в задачах анализа и проектирования управляемых технических систем; место цифровой обработки сигналов в задачах управления.

уметь:

- составлять математические динамические модели технических систем, анализировать их теоретическими и численными методами, проектировать фильтры и регуляторы.

владеть:

- средствами численного моделирования динамических систем, анализа и синтеза фильтров и регуляторов.

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

1. Свойства тригонометрических и обобщенных рядов Фурье.
2. Прямое и обратное преобразование Фурье.
3. Оператор свертки. Применение преобразования Фурье к вычислению операции свертки.
4. Преобразование Лапласа. Применение преобразования Лапласа к анализу линейных систем.
5. Дискретное преобразование Фурье. Его свойства
6. Быстрое преобразование Фурье. Алгоритмы БПФ.
7. Восстановление сигналов по отсчетам. Теорема Котельникова.
8. Частотное разделение каналов. Теорема о сдвиге.
9. Амплитудно-фазовая модуляция.
10. Подавление нежелательных частот и выделение сигнала на фоне шума.
11. Рекурсивные и нерекурсивные фильтры. Графическая схема фильтра на примере операции усреднения.
12. Z-преобразование и его свойства.
13. Линейные разностные уравнения, их свойства.
14. Применение Z-преобразования к разностным уравнениям. Частотная характеристика функции передачи.
15. Связь расположения нулей и полюсов функции передачи с поведением частотно-амплитудной характеристики системы.
16. Вычисление обратного Z-преобразования.
17. Бих-фильтры. Разностные уравнения.
18. Методы проектирования бих-фильтров.
19. Ких-фильтры. Способы реализации.
20. Качество фильтра, методы улучшения его характеристик. Окно Хемминга, Чебышева.

21. Проектирование КИХ-фильтров.
22. Адаптивные фильтры. Основные понятия.
23. Алгоритмы вычисления коэффициентов нелинейных по сигналу и линейных по параметрам фильтров.

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

1. Тригонометрические ряды Фурье, и их свойства. Модуляции сигнала. Квадратурная и амплитудно-фазовая модуляция.
2. Обобщенные ряды Фурье. Линейные дискретные фильтры. Графические схемы.
3. Преобразование Фурье. Основные свойства. Операция фильтрации как свертка. Частотная характеристика фильтра.
4. Оператор свертки. Применение преобразования Фурье к вычислению свертки. Формы реализации фильтров.
5. Применение преобразования Фурье к анализу линейных систем. Адаптивные фильтры.
6. Многочастотная линия связи. Применение теоремы о сдвиге при формировании многочастотного сигнала. Z-преобразование. Его свойства.
7. Преобразование Лапласа и его свойства. Применение к анализу линейных систем. Разностные уравнения. Применения Z-преобразования к решению разностных уравнений.
8. Обратное преобразование Лапласа. Применение теоремы Коши. Линеаризация уравнений бокового движения.
9. Дискретное преобразование Фурье и его свойства. Функция передачи. Частотная характеристика. Нули и полюса функции.
10. Быстрое преобразование Фурье. Алгоритм бабочки. Вычисление обратного Z-преобразования.
11. Восстановление сигналов по их отсчетам. Теорема Котельникова. Бих-фильтры. Разностные уравнения и обратная связь.

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 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 проведения дифференцированного зачета обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, вычислительной техникой, конспектами лекций.

Дифференцированный зачет может проводиться по итогам текущей успеваемости и сдачи заданий, или путем организации специального опроса, проводимого в устной форме.