

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания
по выполнению лабораторных работ
по дисциплине «Методы обработки сигналов»
для студентов направления подготовки
09.03.02 «Информационные системы и технологии»
Профиль «Прикладное программирование и интернет-
технологии»

Ставрополь, 2026

Содержание

Лабораторная работа 1. Исследование характеристик простейших КИХ-фильтров.....	3
Лабораторная работа 2. Исследование и применение дискретного преобразования Фурье.....	10
Лабораторная работа 3. Исследование свойств различных видов окон	16
Лабораторная работа 4. Синтез и исследование КИХ-фильтров.....	23
Лабораторная работа 5. Синтез и исследование БИХ-фильтров	30
Лабораторная работа 6. Исследование эффектов конечной разрядности чисел	38
Лабораторная работа 7. Исследование алгоритмов изменения частоты дискретизации	44

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОСТЕЙШИХ КИХ-ФИЛЬТРОВ

Цель работы: получение основных понятий о работе цифровых КИХ-фильтров и приобретение практических навыков их исследования на ЭВМ.

Организационная форма занятий: решение проблемных задач, разбор конкретных ситуаций.

Вопросы для обсуждения на лабораторном занятии: фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтра), характеристики простейших КИХ-фильтров

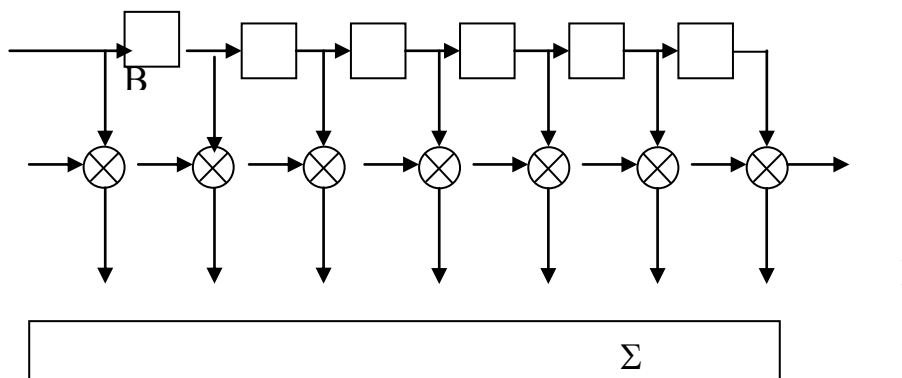
Формируемые компетенции: ПК-2, ПК-11.

Теоретическое обоснование

Работу простейшего фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтра) можно пояснить на элементарном примере. Предположим, что имеется некоторый набор экспериментальных данных в виде таблицы входных отсчетов, например, ежедневные замеры температуры воздуха. Для того, чтобы уяснить общие тенденции в изменении данных, без учета отклонений, вызванных случайными факторами, рассчитывается среднее арифметическое за некоторый период, например за последние 7 дней. Каждый новый выходной отсчет получается путем сдвига усредняемой выборки на один день. При этом выходной отсчет соответствует по

времени середине усредняемой выборки, то есть задержан относительно последнего входного отсчета на $(7-1)/2=3$ дня.

Устройство, реализующее указанную последовательность действий можно реализовать в виде набора логических и арифметических модулей :



На рисунке обозначено:

- τ – элемент задержки на время τ ;
- X – умножитель;
- Σ – сумматор;
- $x(n)$, $n = 0, \dots, \infty$ – входные отсчеты;
- $y(n)$, $n = 0, \dots, \infty$ – выходные отсчеты;
- $h(n)$, $n = 0, \dots, N-1$ коэффициенты;

Приведенная схема является типичной схемой КИХ-фильтра порядка N . В нашем случае $N = 7$, а все $h(n)$ равны между собой и равны $1/7$. Если

на вход такого фильтра подать один отсчет с амплитудой, равной 1, на выходе получим последовательность из 7 отсчетов с амплитудой 1/7, – импульсную характеристику фильтра. Заметим, что импульсная характеристика имеет конечную длину, что и определяет название данного типа фильтра, а ее отсчеты совпадают с коэффициентами фильтра. В рассмотренном примере импульсная характеристика имеет прямоугольную форму.

С точки зрения теории цифровых фильтров это означает, что частотная характеристика такого фильтра определяется выражением:

$$H(f) = \frac{\sin(N\frac{\omega\tau}{2})}{N\sin(\frac{\omega\tau}{2})} \times e^{-j\omega\tau\frac{N-1}{2}} \quad (1)$$

Согласно этой формуле рассмотренный фильтр (назовем его усредняющим) является фильтром нижних частот (ФНЧ) с линейной фазочастотной характеристикой (ФЧХ). На частотах $\omega_k = 2\pi k/(N\tau)$ при $k=1, \dots, \infty$, $H(\omega)=0$. Это видно и из схемы фильтра. Действительно, при частоте гармонического сигнала ω_k , в линии задержки фильтра укладывается целое количество периодов, и усреднение приводит к нулевому выходу.

Если коэффициенты КИХ-фильтра подчиняются синусоидальному закону: $h(n)=\sin(\omega_0 n\tau)$ то, как очевидно следует из схемы на рисунке, максимальный выходной сигнал будет наблюдаться при воздействии на вход фильтра гармонического сигнала с частотой ω_0 . АЧХ такого фильтра представляет собой наложение двух АЧХ предыдущего фильтра, сдвинутых на $\pm\omega_0$ относительно нулевой частоты. Таким образом, рассматриваемый фильтр из ФНЧ преобразуется в полосовой. Однако ФЧХ такого фильтра необязательно будет линейной. Условием линейности ФЧХ является симметрия (или антисимметрия) импульсной характеристики фильтра.

Примечание: если ω_0 расположена близко к нулю, то максимум АЧХ может иметь незначительное смещение относительно ω_0 за счет наложения отрицательной и положительной частей АЧХ.

Групповое время задержки (ГВЗ) $d(\omega)$ рассчитывается как производная по частоте от ФЧХ: $d(\omega) = \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega}$. При линейной ФЧХ ГВЗ не зависит от частоты.

Задания к лабораторной работе

1. Построить частотные характеристики (АЧХ, ФЧХ, ГВЗ) усредняющего КИХ-фильтра.
2. Задать входной сигнал в виде суммы двух синусоидальных колебаний и шума. Построить спектр сигнала до, и после фильтрации.
3. Получить экспериментальным путем зависимость ГВЗ от порядка фильтра.
4. Изменить импульсную характеристику фильтра так, чтобы он выделял верхнюю по частоте гармоническую составляющую входного сигнала. Построить частотные характеристики (АЧХ, ФЧХ, ГВЗ), импульсную характеристику и спектр выходного сигнала.
5. Если ФЧХ получилась нелинейной и ГВЗ зависит от частоты, измените импульсную характеристику фильтра так, чтобы добиться линейности ФЧХ и постоянства ГВЗ.

Методика выполнения работы

1. Задать коэффициенты КИХ-фильтра М-ного порядка, равными $1/M$ – усредняющий фильтр ($M=\# + 10$), где $\#$ – номер варианта.
2. Найти комплексную частотную характеристику фильтра с помощью процедуры

$$[H, F] = \text{freqz}(B, A, N, 'whole', Fs),$$

где H – комплексная ЧХ из которой с помощью $20 \cdot \log_{10}(\text{abs}(H))$ и **unwrap** (ANGLE(H)) получают АЧХ в дБ и ФЧХ. N – количество точек ЧХ ($N=2^{12}$), B – вектор коэффициентов КИХ-фильтра, $A=1$ для КИХ-фильтров, Fs – частота дискретизации ($Fs=1.2288 \cdot 4 \text{ МГц}$), F – частотная ось абсцисс для вывода ЧХ на графике, процедура **unwrap** устраняет скачки на 2π в ФЧХ, параметр ‘whole’ означает вывод ЧХ в пределах от 0 до Fs .

3. Найти ГВЗ фильтра с помощью процедуры

$$[Gd, F] = \text{grpdelay}(B, A, N, 'whole', Fs),$$

где Gd – ГВЗ в отсчетах. (Для получения ГВЗ в секундах необходимо умножить Gd на τ).

4. Построить графики АЧХ: **abs**(H), ФЧХ и ГВЗ в одних осях с помощью процедуры **plot**.

5. Задать входной сигнал в виде:

$$s = s1 + s2 + 0.1 \cdot \text{Noise};$$

$$s1(n) = \sin(2 \cdot \pi \cdot f1 \cdot n \cdot \tau)$$

$$s2(n) = \sin(2 \cdot \pi \cdot f2 \cdot n \cdot \tau);$$

$n = 0, \dots, N-1$, $N=2^{12}$ $\tau = 1/Fs$; $\text{Noise} = \text{randn}(1, N)$ – процедура генерации нормально распределенного белого шума с длиной выборки N , $f1 = (700 + \# \cdot 10) \text{ кГц}$, $f2 = 1200 \text{ кГц}$;

6. Найти спектр входного сигнала с помощью процедуры **fft**.

7. Профильтровать входной сигнал с помощью процедуры $Y = \text{filter}(B, A, X)$, где Y , X – выходной и входной процессы, B , A – коэффициенты фильтра.

8. Найти спектр выходного сигнала с помощью процедуры **fft**.

9. Построить графики амплитудных спектров входного и выходного сигнала (**abs(fft)**) один над другим с помощью процедуры **subplot**. В качестве частотной оси можно использовать последовательность F из п.2.2.

10. Изменяя порядок фильтра M экспериментально найти зависимость ГВЗ от его порядка M .

11. Умножить вектор коэффициентов B на $\sin(2\pi f_1 n\tau)$, $n=0, \dots, M-1$, для своего M .

12. Повторить пп. 2.2 и 2.3.

13. Найти импульсную характеристику фильтра с помощью процедуры

$$[I, T] = \text{impz}(B, A),$$

где I – искомая импульсная характеристика, T – ось времени.

14. Построить график импульсной характеристики с помощью процедуры **stem**(T, I);

15. Изменяя фазу $\sin(2\pi f_1 n\tau)$, добиться симметрии импульсной характеристики относительно центра. При четном M центр располагается между отсчетами.

16. Убедиться в линейности ФЧХ и постоянстве ГВЗ.

Вопросы для защиты работы

1. Как зависит ГВЗ от порядка фильтра?
2. При каких условиях ГВЗ не зависит от частоты?.
3. Что надо сделать для преобразования КИХ-фильтра из ФНЧ в полосовой?

Содержание отчета и его форма

Отчет должен быть представлен в виде файла с именем ***lab1_#.m***, содержащим текст программы с подробными комментариями и файла с именем ***фамилия_лаб1_вариант#.doc***, с ответами на контрольные вопросы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

Цель работы: приобретение практических навыков работы с дискретным преобразованием Фурье (ДПФ).

Организационная форма занятий: решение проблемных задач, разбор конкретных ситуаций.

Вопросы для обсуждения на лабораторном занятии: дискретное преобразование Фурье (ДПФ)

Формируемые компетенции: ПК-2, ПК-11.

Теоретическое обоснование

Дискретное преобразование Фурье применяется для дискретизированных во времени периодических процессов. Допустим, имеется некоторая выборка из n временных отсчетов $x(n)$, $n = 0, \dots, N-1$. Причем, предполагается, что за пределами указанного интервала данная выборка периодически повторяется. Тогда ДПФ вычисляется по формуле:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j 2\pi n k / N}$$

(1)

и представляет собой последовательность комплексных дискретных спектральных отсчетов равномерно распределенных на отрезке частотной оси от 0 до частоты дискретизации F_s . За пределами указанного интервала эта последовательность также периодически повторяется.

Обратное ДПФ (ОДПФ) вычисляется по формуле:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{-j2\pi k n / N}$$

(2)

Таким образом, существует взаимно однозначное соответствие между периодическим дискретным процессом и его периодическим дискретным спектром. Причем как во временной, так и в спектральной области длина периода составляет N отсчетов.

Из формул (1) и (2) видно, что ДПФ и ОДПФ требует N^2 арифметических операций. Однако, если $N=2^m$, где m – любое натуральное число возможно применение быстрого преобразования Фурье (БПФ), и обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ), для выполнения которых требуется приблизительно $\frac{N}{2} \cdot \log_2 N$ операций. Если $N=2^{10}$, то БПФ работает приблизительно в 200 раз быстрее по сравнению с ДПФ. И этот выигрыш возрастает с ростом N . При этом результаты ДПФ и БПФ полностью совпадают.

Важным практическим применением преобразования Фурье является спектральный анализ аддитивной смеси сигнала и помех. Если ширина спектра и амплитуда полезного сигнала и помехи заметно различаются, это может быть использовано для подавления помех. Предположим, что имеется узкополосная, большая по амплитуде помеха на фоне широкополосного сигнала. В этом случае подавление помехи может осуществляться методом режекции спектральных составляющих, превышающих некоторый порог.

На границах временной выборки функция $x(n)$, как правило, испытывает разрыв. Это приводит к расширению основания спектра и за-

трудняет подавление помех. Эффект расширения спектра можно ослабить путем плавного уменьшения отсчетов выборки при движении от ее центра к краям, что осуществляется за счет умножения отсчетов временной выборки на отсчеты функции окна. Более подробно свойства различных функций окон будут исследованы в следующей лабораторной работе.

В MATLAB вычисление спектра выполняется с помощью процедуры FFT (Fast Fourier Transform): $X = \text{FFT}(x)$. $\text{FFT}(x)$ вычисляет ДПФ от последовательности $x(n)$.

Если длина $x(n)$ равна 2^m , где m – целое, то для вычисления спектра процедура FFT использует более быстрый алгоритм – быстрое преобразование Фурье (БПФ).

Если длина $X(k)$ равна 2^m , где m – целое, то для вычисления спектра процедура IFFT использует обратное быстрое преобразование Фурье (ОБПФ).

Функция окна Хэмминга вычисляются в виде вектора-столбца с помощью процедуры $W = \text{hamming}(n)$, где n – длина последовательности. При умножении на последовательность $x(n)$ необходимо использовать транспонированный вектор окна W' .

Задания к лабораторной работе

1. Задайте входной процесс в виде суммы полезного ЧМ сигнала и АМ помехи.
2. Найдите спектр входного процесса и спектр помехи.
3. Исключите помеху методом непосредственной обработки спектра.
4. Перейдите обратно во временную область.
5. Найдите разность полезного и выходного сигнала.

6. Сравните временные диаграммы исходного процесса, полученного выходного сигнала, исходного полезного сигнала (без помехи) и разности полезного и выходного сигнала.

7 Рассматривая вышеприведенную разность как аддитивную помеху, вычислить отношение сигнал/помеха в децибелах до и после подавления помехи.

8. Умножьте входной процесс на окно Хэмминга и повторите п.п. 1.2 – 1.7

9. Сравните результаты подавления помехи с применением и без применения окна.

Методика выполнения работы

1. Задайте входной процесс $s_{\text{inp}}(n)$ в виде суммы полезного ЧМ сигнала:

$$\text{signal} = \sin(w_0 * ts * n + (w_d/w_m) * \sin(w_m * ts * n) + 1),$$

и помехи:

interference

$$= A * (1 + 0.5 * \sin(2 * \pi * 0.01 * F_s * ts * n)) * \sin((w_0 + 0.7 * w_d) * ts * n),$$

где $w_0 = 2 * \pi * (0.1 + \# * 0.005) * F_s$, $w_d = (0.07 + \# * 0.003) * F_s$, $A = 2.5 + \# * 0.05$, $\#$ - номер варианта, $w_m = 2 * \pi * 0.001 * F_s$, $F_s = 4 \text{ МГц}$ – частота дискретизации, $ts = 1/F_s$, $n = 0, \dots, 10000$,

2. Найдите спектр входного процесса и спектр помехи с помощью процедуры **fft** и построить график его модуля: **abs(fft(...))**

3. Проанализируйте полученный спектр и определить наименьший пороговый уровень, выше которого располагаются только спектральные составляющие помехи. С помощью процедуры **find** обнулить все спек-

тральные составляющие, лежащие выше порога. (Графики спектров входного процесса, помехи и процесса с подавленной помехой построить в одном окне с использованием функции **subplot(3,1,*)**).

4. Перейдите от спектра к временному процессу с помощью процедуры **ifft**.

5. Найдите разность исходного полезного сигнала и полученного процесса с подавленной помехой (при идеальном подавлении помехи эта разность оказалась бы нулевой). Построить в одном окне графики исходного процесса, полезного сигнала, процесса с подавленной помехой и найденной разности.

6. Найдите отношение сигнал/помеха до и после подавления помехи в децибелах: $(S/I) = 10 \log_{10}(S/I)$, где S – энергия полезного сигнала, рассчитанная как сумма квадратов временных отсчетов сигнала по формуле **sum(signal.^2)**, I – энергия помехи. (После подавления помехи в качестве I рассчитывается энергия разности сигнала и процесса с подавленной помехой).

7. Умножьте сигнал и помеху на окно Хэмминга после чего повторите п.п. 2.1 – 2.5. При выполнении п.2.4 и п.2.5 использовать полезный сигнал и помеху, умноженные на окно.

8. Сравните спектры, временные диаграммы и значения (S/I) до и после применения окна.

Вопросы для защиты работы

1. Почему разность сигнала и процесса с подавленной помехой не равна нулю?

2. Каким образом можно автоматизировать вычисление порога для подавления помехи, если заранее известно, что спектр сигнала значительно шире спектра помехи, а амплитуда помехи больше амплитуды сигнала?
3. По какой причине пороговый уровень следует минимизировать?
4. За счет чего улучшается подавление помехи при использовании окна?

Содержание отчета и его форма

Отчет должен быть представлен в виде файла с именем ***lab2_#.m***, содержащим текст программы с подробными комментариями и файла с именем ***фамилия_лаб2_вариант#.doc***, с ответами на контрольные вопросы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ОКОН

Цель работы: приобретение практических навыков применения различных видов окон при исследовании спектров сигналов.

Организационная форма занятий: решение проблемных задач, разбор конкретных ситуаций.

Вопросы для обсуждения на лабораторном занятии: дискретное преобразование Фурье (ДПФ), спектры сигналов.

Формируемые компетенции: ПК-2, ПК-11.

Теоретическое обоснование

Известно, что для нахождения спектра сигнала используется преобразование Фурье (для дискретизированных сигналов это Дискретное Преобразование Фурье или ДПФ). Как правило, преобразование Фурье берется от конечных временных выборок сигнала, что приводит к искажению спектра. Причина в том, что взятие конечной временной выборки от длительного сигнала эквивалентно умножению его на прямоугольную функцию – функцию окна, равную единице в пределах выборки и равную нулю за ее пределами.

При умножении двух функций во временной области из спектр находится как свертка спектров исходных функций. Поэтому на спектр длительного процесса накладывается функция $\sin(x)/x$ – спектр прямоугольного окна, боковые выбросы которой затухают достаточно медленно, со скоростью 6 дБ на октаву. Образно говоря, резкое ограничение времен-

ной выборки приводит к звону в спектре, что затрудняет различение близко лежащих спектральных компонент.

Исключение составляет тот случай, когда в выборке, взятой из периодического процесса, укладывается целое количество периодов от периодического процесса.

Для того, чтобы ослабить искажения спектра, при формировании временных выборок применяются другие оконные функции, плавно затухающие по краям. В спектре таких функций боковые выбросы малы по сравнению с главным (центральным лепестком) и быстро затухают при удалении от центра.

Таблица 3.1 Виды окон и соответствующие им стандартные процедуры MATLAB

Название окна	Процедура MATLAB
Прямоугольное	$w = \text{boxcar}(n)$
Треугольное	$w = \text{triang}(n)$
Cos^2 (фон Ханна)	$w = \text{hanning}(n)$
Хэмминга	$w = \text{hamming}(n)$
Блэкмана	$w = \text{blackman}(n)$
Кайзера	$w = \text{kaiser}(n, \text{beta})$

1. Параметр beta ($\text{beta} > 1$) в окне Кайзера определяет высоту боковых выбросов. С ростом beta боковые выбросы уменьшаются, а главный лепесток расширяется.

2. Окна задаются в виде столбца из n элементов, поэтому перед умножением на сигнал w необходимо транспонировать.

Таблица 3.2. Сравнительные характеристики окон

Окно:	<i>П</i> прямо- уголь- ное	<i>Тр</i> еуголь- ное	<i>ф</i> он Ханна	<i>Хэ</i> мминга	<i>Б</i> лэк- мэна	<i>К</i> айзера α = 3.0
Ширина главного лепест- ка по уровню 6дБ	0. 0242	0. 0356	0 .04	0.0 36	0 .047	0 .0478
Полная ширина главного лепестка	0. 04	0. 08	0 .08	0.1	0 .14	0 .14 - 70дБ
Высота наибольшего бо- кового выброса (дБ)	- 13	- 27	- 32	- 43	- 58	- 69
Скорость затухания боко- вых лепестков (дБ/окт)	- 6	- 12	- 18	-6	- 18	- 6

Примечание: ширина главного лепестка приводится в относительных частотах (при $F_s = 1$).

Для окна фон Ханна существует экономичный способ нахождения спектра методом свертки спектра окна со спектром не взвешенной (с прямоугольным окном) последовательности по формуле:

$$Y_w(k) = \frac{1}{2} \left\{ Y(k) - \frac{1}{2} [Y(k-1) + Y(k+1)] \right\}, \quad (1)$$

где $Y_w(k)$ – искомый спектр с окном фон Ханна, $Y(k)$ – спектр невзвешенной последовательности.

Таким образом, вместо n операций умножения исходной выборки на окно выполняется сложение смещенных на один отсчет спектров и два деления на 2, которые в цифровой обработке выполняются простым сдвигом на один разряд влево.

Задания к лабораторной работе

1. Найдите спектры перечисленных во введении видов окон
2. Постройте графики спектров всех окон в дБ. Сравните параметры окон с табличными (Табл.2).
3. Постройте в одних осях спектры окна Кайзера для нескольких β . Найдите β , при котором высота первого бокового выброса не превышает -66дБ относительно главного лепестка.
4. Задайте входной процесс в виде суммы АМ сигнала, тонального сигнала и шума.
5. Найдите спектры для входного процесса, применяя все перечисленные окна. Постройте графики спектров в одном окне и сравните спектры между собой. Обратите внимание на соотношение уровней сигнала и наличие боковых составляющих АМ сигнала.
6. Найдите спектр процесса с окном фон Ханна по формуле (1), построить его в одних осях со спектром, найденным обычным способом и сравнить.
7. Повторите п.п.1.4, 1.5 для $\# = 0$.

Методика выполнения работы

1. Задайте временные последовательности окон **w**, приведенных в таблице 1. Длина окна **n=50**. Транспонировать полученные последовательности и дополнить их последовательностью из 500 нулей: **[w' z(1,500)]**. При дополнении временной последовательности нулями форма ее спектра не меняется. Увеличивается только количество точек в спектре, что позволяет более подробно отобразить форму спектра.

2. Найдите спектры всех графиков с помощью **fft**. Постройте графики всех спектров в дБ в одном окне с использованием оператора **subplot(3,2,k)**. Озаглавьте каждый график, используя оператор **title**. Для удобства сравнения все графики построите в одинаковом масштабе по оси ординат, используя оператор **axis**. Масштаб по оси абсцисс задать в относительных частотах (от 0 до 1). Для того, чтобы главный лепесток спектра окна располагался в центре графика, примените оператор **fftshift(fft(...))**. Сравните параметры окон с табличными (Табл.2).

3. Постройте в одних осях спектры окна Кайзера для нескольких **beta**. Найдите **beta**, при котором высота первого бокового выброса не превышает -66дБ относительно главного лепестка. При анализе спектров использовать оператор **zoom**.

4. Задайте входной процесс в виде суммы АМ сигнала, тонального сигнала и нормально распределенного белого шума: частота дискретизации: $F_s = 2\text{МГц}$, частота АМ сигнала $f_1 = (100+\#)\text{кГц}$, частота модуляции АМ сигнала $f_m = 0.01F_s$, глубина модуляции АМ сигнала 30%, средняя амплитуда АМ сигнала $A_1=1$, частота тонального сигнала $f_2=(160+\#)$, амплитуда тонального сигнала $A_2=0.01$, амплитуда шума (СКО) $A_n=0.0005$, количество отсчетов процесса $N=300$, $\#$ - номер варианта.

5. Перейдите к относительным частотам f/F_s . Найдите спектры для входного процесса, применяя все перечисленные окна. Постройте графики спектров в одном окне, используя операторы **subplot(3,2,k)**. Озаглавьте каждый график, используя оператор **title**. Сравните спектры между собой. Для удобства сравнения все графики постройте в одинаковом масштабе по оси ординат, используя оператор **axis**. Ось абсцисс взять в относительных частотах.

6. Найдите спектр процесса с окном фон Ханна по формуле (1), постройте его в одних осях со спектром, найденным обычным способом и сравните. В качестве $Y(k)$ выберите спектр с прямоугольным окном. При сложении со смещенными спектрами недостающие крайние отсчеты считать нулевыми.

7. Повторить п.п.1.4, 1.5 для $\# \neq 0$. Сопоставить спектры с прямоугольным окном и графики временных процессов для $\# \neq 0$ и вашего $\#$.

Вопросы для защиты работы

1. С каким из окон наблюдается наилучшее разделение сигналов?
2. С каким из окон наблюдается наилучшее разделение несущей и боковых составляющих АМ сигнала? В чем причина?
3. Выберите окно с которым достигается компромисс между разделением двух сигналов и выявлением структуры АМ сигнала.
4. В чем причина медленного спада боковых выбросов окна Хэмминга?
5. В каком из окон быстрый спад боковых выбросов сочетается с узким центральным лепестком? В чем недостаток этого окна?
6. В чем причина резкого улучшения разрешающей способности в спектре с прямоугольным окном при $\# \neq 0$?

Содержание отчета и его форма

Отчет должен быть представлен в виде файла с именем ***lab3_#.m***, содержащим текст программы с подробными комментариями и файла с именем ***фамилия_лаб3_вариант#.doc***, с ответами на контрольные вопросы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4. СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ КИХ-ФИЛЬТРОВ

Цель работы: приобретение практических навыков разработки КИХ-фильтров.

Организационная форма занятий: решение проблемных задач, разбор конкретных ситуаций.

Вопросы для обсуждения на лабораторном занятии: метод окон, синтез и исследование КИХ-фильтров.

Формируемые компетенции: ПК-2, ПК-11.

Теоретическое обоснование

Наиболее простым и наглядным методом разработки КИХ-фильтров является метод окна. Известно, что отсчеты импульсной характеристики цифрового фильтра $h(n)$ связаны с его частотной характеристикой $H(\omega)$ соотношением дискретного ряда Фурье:

$$h(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H(\omega) e^{j\omega n} d\omega,$$

(1)

Для фильтра нижних частот с идеально прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) и частотой среза ω_0 получаем:

$$h(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_0}^{\omega_0} e^{j\omega n} d\omega = \frac{\omega_0}{\pi} \text{Sinc}\left(\frac{\omega_0}{\pi} n\right),$$

(2)

где n изменяется от $-\infty$ до $+\infty$.

Очевидно, что реализация КИХ-фильтра с такой характеристикой невозможна. Для построения реального КИХ-фильтра необходимо ограничить $h(n)$ конечным числом отсчетов N , где N – порядок фильтра. При этом линейность фазочастотной характеристики (ФЧХ) обеспечивается за счет симметрии отсчетов импульсной характеристики $h(n)$ относительно центра, а максимум огибающей $h(n)$ определяет групповую задержку фильтра.

Импульсная характеристика, полученная таким образом, имеет резкие спады по краям, что приводит к появлению выбросов в АЧХ. Для сглаживания этих выбросов необходимо перемножить вектор его коэффициентов $h(n)$ с одним из окон.

Более точное отображение желаемой АЧХ достигается оптимизационными методами: методом Чебышевской аппроксимации, использующим алгоритм Ремеза и методом наименьших квадратов.

Алгоритм Ремеза основан на теории наилучшей равномерной аппроксимации Чебышева и позволяет проектировать оптимальные фильтры. Фильтры оптимальны в том смысле, что минимизируются максимальные отклонения действительной АЧХ от желаемой. При этом все максимальные отклонения оказываются равными между собой. Соотношение ошибок аппроксимации в полосе пропускания и полосе подавления задается с помощью весовой функции. Например, если в полосе пропускания значение весовой функции равно 1, а в полосе подавления равно 10, то точность аппроксимации в полосе подавления будет в 10 раз выше.

Метод наименьших квадратов, в отличие от алгоритма Ремеза, минимизирует суммарное среднеквадратичное отклонение желаемой АЧХ от действительной и в этом смысле является оптимальным. Это означает, что отдельные отклонения АЧХ, полученной по методу наименьших квадратов

могут оказаться больше, чем в АЧХ, полученной по алгоритму Ремеза. Но общее среднеквадратичное отклонение будет наименьшим.

Среди перечисленных методов метод Ремеза обеспечивает наибольшую крутизну спада АЧХ при прочих равных условиях. Групповая задержка D всех видов КИХ-фильтров с линейной ФЧХ зависит только от порядка N и определяется по формуле:

$$D = (N-1)/2. \quad (3)$$

При выполнении рабочего задания потребуются следующие стандартные процедуры MATLAB.

Процедура `fir2` рассчитывает коэффициенты фильтра методом окна.

Например, последовательность операторов:

$N = 30;$

$F = [0 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.5];$

$A = [1 \ 1 \ 0 \ 0];$

$H = \text{fir2}(N-1, f*2, a, \text{hanning}(N));$

позволяет рассчитать коэффициенты фильтра h 30 порядка, желаемая АЧХ которого равна 1 при частотах от 0 до $0.2*F_s$ (полоса пропускания), и 0 при частотах от $0.3*F_s$ до $0.5*F_s$ (полоса подавления). В полосе от $0.2*F_s$ до $0.3*F_s$ на АЧХ не накладывается ограничений. F_s – частота дискретизации в Гц.

В процедуре `fir2`, как и в других подобных процедурах MATLAB все частоты пронумерованы относительно частоты Найквиста: $F_n = F_s/2$. Поэтому в качестве аргумента частот в `fir2` подставляется не f , а $2*f$. Кроме того, вместо порядка фильтра N , равного длине импульсной характеристики, подставляется номер ее максимального отсчета при нумерации от 0 до $N-1$.

Процедура *firls* рассчитывает коэффициенты фильтра методом наименьших квадратов.

Например, последовательность операторов:

$N=30;$

$F = [0 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.5];$

$A = [1 \ 1 \ 0 \ 0];$

$Weight = [5, 1];$

$H = \text{fir2}(N-1, f*2, a, \text{weight});$

позволяет рассчитать коэффициенты фильтра h 30 порядка, желаемая АЧХ которого равна 1 при частотах от 0 до $0.2*F_s$, и 0 при частотах от $0.3*F_s$ до $0.5*F_s$. Причем точность аппроксимации в полосе пропускания в 5 раз выше, чем в полосе подавления за счет применения весовой функции *weight*. При отсутствии весовой функции среди аргументов процедуры **firls** точность аппроксимации одинакова во всех полосах.

Процедура *remez* рассчитывает коэффициенты фильтра методом чебышевской аппроксимации по алгоритму Ремеза.

Например, последовательность операторов:

$N = 30;$

$F = [0 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.5];$

$A = [1 \ 1 \ 0 \ 0];$

$Weight = [5, 1];$

$H = \text{remez}(N-1, f*2, a, \text{weight});$

позволяет рассчитать коэффициенты фильтра h 30 порядка, требуемая АЧХ которого равна 1 при частотах от 0 до $0.2*F_s$, и 0 при частотах от $0.3*F_s$ до $0.5*F_s$.

Во всех перечисленных процедурах может быть задана и более сложная АЧХ за счет соответствующих векторов f и a .

Процедура $[h, n] = \text{impz}(b, a)$; позволяет находить отсчеты импульсной характеристики h и их номера n для цифровых фильтров по их коэффициентам b и a . Для КИХ-фильтров $a = 1$, а $h = b$.

Задания к лабораторной работе

1. Рассчитайте коэффициенты КИХ-фильтра нижних частот заданного порядка, с помощью формулами (1) и (2) с использованием окна и без него. Постройте частотные и импульсные характеристики для обоих случаев.

2. Синтезируйте три фильтра нижних частот с одинаковой частотой среза, используя методом окна, Ремеза и наименьших квадратов и построить их АЧХ и импульсные характеристики.

3. Увеличьте порядок фильтров синтезированных по методу окна и методу наименьших квадратов таким образом, чтобы крутизна спада АЧХ сравнялась с крутизной фильтра Ремеза. Постройте импульсные характеристики трех фильтров. По импульсным характеристикам определите задержки для трех фильтров и сравните их с расчетными, полученными из формулы (3).

4. Для фильтров, синтезированных по методу Ремеза и наименьших квадратов, ввести некоторую весовую функцию. Проанализируйте ее влияние на АЧХ.

Методика выполнения работы

1. Рассчитайте коэффициенты $h(n)$ фильтра порядка $N = 60 - \#$, где $\#$ – номер варианта, и частотой среза $F = 0.12 + \#/100$, пользуясь формулой (2). Постройте график импульсной характеристики фильтра. Она должна быть симметричной. Для достижения симметрии при четном N использовать

сдвиг n на $\frac{1}{2}$. Постройте АЧХ фильтра. Для сглаживания выбросов АЧХ применить одно из окон. Постройте импульсную характеристику и АЧХ на тех же графиках, что и для предыдущего случая. Оцените, как влияет форма импульсной характеристики на форму АЧХ.

2. Синтезируйте три ФНЧ: методом окна (по процедуре **fir2**), методом наименьших квадратов (по процедуре **firls**) и методом чебышевской аппроксимации (по процедуре **remez**). Полоса пропускания всех ФНЧ - от 0 до F , полоса подавления - от $F+0.025$ до 0.5. Постройте АЧХ трех фильтров на одном графике и сравните их между собой.

3. Увеличьте порядок фильтров синтезированных по методу окна и методу наименьших квадратов таким образом, чтобы крутизна спада АЧХ сравнялась с крутизной фильтра Ремеза. Постройте АЧХ и импульсные характеристики трех фильтров. По импульсным характеристикам определите задержки для трех фильтров и сравните их с расчетными, полученными из формулы (3).

4. Для фильтров, синтезированных по методу Ремеза и наименьших квадратов, введите некоторую весовую функцию. Проанализируйте ее влияние на АЧХ. Постройте графики АЧХ.

Вопросы для защиты работы

1. Чем отличаются КИХ-фильтры I и II типов. В чем отличие их АЧХ?

2. Какова связь между величиной выбросов АЧХ и формой импульсной характеристики фильтра?

3. Убедитесь в том, что фильтр Ремеза действительно обеспечивает наименьшие абсолютные отклонения АЧХ от заданной по сравнению с фильтром наименьших квадратов при одинаковом порядке. Оцените,

насколько максимальное отклонение АЧХ фильтра по методу наименьших квадратов больше, чем у фильтра Ремеза в вашем случае.

4. Как влияет весовая функция на форму АЧХ?

Содержание отчета и его форма

Отчет должен быть представлен в виде файла с именем *lab4_#.m*, содержащим текст программы с подробными комментариями и файла с именем *фамилия_лаб4_вариант#.doc*, с ответами на контрольные вопросы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5. СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ БИХ-ФИЛЬТРОВ

Цель работы: приобретение практических навыков разработки БИХ-фильтров на базе их аналоговых прототипов.

Организационная форма занятий: решение проблемных задач, разбор конкретных ситуаций.

Вопросы для обсуждения на лабораторном занятии: аналоговые прототипы, синтез и исследование БИХ-фильтров.

Формируемые компетенции: ПК-2, ПК-11.

Теоретическое обоснование

Основное преимущество фильтров с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтров) состоит в том, что при тех же требованиях к амплитудно-частотной характеристике их порядок оказывается значительно меньше, чем у КИХ-фильтров. Однако фазо-частотная характеристика БИХ-фильтров - нелинейна.

Распространенный метод расчета БИХ-фильтров основан на преобразовании аналоговых фильтров в цифровые. Это связано с тем, что методы расчета аналоговых фильтров хорошо известны, просты и эффективно программируются.

Последовательность действий расчета БИХ-фильтров по их аналоговым прототипам.

1. Расчет аналогового ФНЧ заданного порядка типа Баттерворта, Чебышева I или II типа, или эллиптического с единичной частотой среза.

2. Пересчет фильтра на реальную частоту и преобразование ФНЧ в ФВЧ, полосовой или режекторный фильтр, если это требуется.

3. Дискретизация аналогового прототипа методом инвариантного преобразования импульсных характеристик или методом билинейного преобразования.

Метод инвариантного преобразования импульсных характеристик основан на непосредственной дискретизации импульсных характеристик аналоговых фильтров. Если аналоговая цепь описывается импульсной характеристикой вида

$$h_a(t) = e^{-at},$$

и передаточной функцией

$$H(p) = \frac{1}{p + a},$$

то после дискретизации имеем:

$$h(n) = e^{-an},$$

где τ - период дискретизации, и

$$H(z) = \frac{1}{1 - e^{-a\tau} z^{-1}}$$

В общем случае передаточную функцию аналогового устройства (фильтра), методом разложения на простые дроби, можно представить в виде

$$H(p) = \sum_{i=1}^M \frac{A_i}{p + p_i}.$$

Тогда, по аналогии с предыдущими формулами, переходим к передаточной функции цифрового БИХ-фильтра:

$$H(z) = \sum_{i=1}^M \frac{A_i}{1 - e^{-p_i\tau} z^{-1}}.$$

В результате такого перехода участок мнимой оси на p -плоскости, ограниченный частотами $\pm f_s/2$ ($f_s=1/\tau$ - частота дискретизации), отображается на единичную окружность z -плоскости. Это означает, что частотные характеристики аналогового прототипа после его дискретизации периодически повторяются с перекрытием на частотах, кратных $f_s/2$. Если АЧХ аналогового прототипа имеет достаточно большое значение за пределами $f_s/2$, то применение данного метода дискретизации приводит к значительным искажениям характеристик БИХ-фильтра по сравнению с прототипом.

От указанного недостатка свободен метод билинейного преобразования, который основан на математическом отображении p -плоскости на z -плоскость по следующим правилам:

$$H(z) = H(p) \Big|_{p=2f_s \frac{z-1}{z+1}}.$$

Такое преобразование отображает ось $j\Omega$ (от $\Omega = \infty$ до $\Omega = -\infty$) на p -плоскости в единичную окружность $e^{j\omega}$ (от $\omega = -\pi$ до $\omega = \pi$) на z -плоскости. (За пределами интервала от $-\pi$ до π частотные характеристики цифрового фильтра периодически повторяются.) При этом

$$\omega = 2 \arctg\left(\frac{\Omega}{2f_s}\right).$$

Таким образом, частотная ось Ω аналогового фильтра отображается на частотную ось ω цифрового фильтра по нелинейному закону – с ростом частоты ось ω сжимается. Для ФНЧ, например, это приводит к более крутому спаду АЧХ цифрового фильтра по сравнению с аналоговым прототипом.

Иногда, при использовании метода билинейных преобразований, в АЧХ аналогового прототипа вводятся предискажения для получения заданных частот среза в цифровом фильтре:

$$\Omega_a = 2*F_s*\tan(\pi*F_d/F_s), (1)$$

где Ω_a – частота (частоты) на АЧХ аналогового прототипа с учетом предискажений, F_d – требуемая частота (частоты) цифрового фильтра, F_s – частота дискретизации.

При использовании языка MATLAB расчет аналоговых прототипов на этапе (1) выполняется с помощью стандартных процедур **buttap**, **cheb1ap**, **cheb2ap**, **ellipap**. Затем, на этапе (2), с помощью процедур **lp2lp**, **lp2hp**, **lp2bp**, **lp2bs**, осуществляется пересчет частоты и преобразование типа фильтра. И на этапе (3), с помощью процедур **impinvar** и **bilinear** аналоговые фильтры преобразуются в цифровые.

Процедуры **butter**, **cheby1**, **cheby2**, **ellip** выполняют все три этапа в комплексе, объединяя вышеприведенные процедуры. Причем преобразование в цифровые фильтры выполняется методом билинейного преобразования (**bilinear**) с предискажением АЧХ аналогового прототипа. В большинстве практических случаев пользуются именно этими процедурами. Если в параметрах указанных процедур присутствует указатель 's', то этап (3) не выполняется, и по ним рассчитываются аналоговые фильтры.

Процедура butter рассчитывает коэффициенты передаточной функции $H(z)$ цифрового БИХ-фильтра Баттерворта.

Например, последовательность операторов:

`N = 6; % Порядок фильтра`

`F = 0.25; % Частота среза.`

`[b, a] = butter(N-1, F*2);`

позволяет рассчитать коэффициенты ФНЧ порядка $N=6$ с относительной частотой среза на уровне -3дБ (0,707), равной F .

В процедуре `butter`, как и в других подобных процедурах MATLAB все частоты пронормированы относительно частоты Найквиста: $F_n = F_s/2$. Поэтому в качестве аргумента частот в `fir2` подставляется не f , а $2*f$. Кроме того, вместо порядка фильтра N подставляется максимальный номер коэффициента при нумерации от 0 до $N-1$.

Процедура `cheby1` рассчитывает коэффициенты передаточной функции $H(z)$ цифрового БИХ-фильтра Чебышева типа 1.

Например, последовательность операторов:

`N = 6;` % Порядок фильтра

`Rp = 3;` %Неравномерность в полосе пропускания

`F = 0.25;` %Частота среза.

`[b, a] = cheby1(N-1, Rs, F*2);`

позволяет рассчитать коэффициенты ФНЧ порядка N с относительной частотой среза F на уровне -3дБ (0,707).

Процедура `cheby2` рассчитывает коэффициенты передаточной функции $H(z)$ цифрового БИХ-фильтра Чебышева типа 2.

Например, последовательность операторов:

`N = 6;` % Порядок фильтра

`Rs = 20;` %Неравномерность в полосе подавления

`F = 0.25;` %Частота среза.

`[b,a] = cheby2(N-1, Rp, F*2);`

позволяет рассчитать коэффициенты ФНЧ порядка N с относительной частотой среза F на уровне -20дБ (0,1).

Процедура **ellip** рассчитывает коэффициенты передаточной функции $H(z)$ цифрового эллиптического БИХ-фильтра.

Например, последовательность операторов:

$N = 6;$

$R_p = 3;$ %Неравномерность в полосе пропускания

$R_s = 20;$ %Неравномерность в полосе подавления

$F = 0.25;$

$[b, a] = \text{ellip}(N-1, R_p, R_s, F*2);$

позволяет рассчитать коэффициенты ФНЧ порядка N с относительной частотой среза F на уровне -3дБ (0,707).

Для расчета полосовых фильтров параметр F должен быть вектором из 2-х элементов. При расчете ФВЧ или режекторных фильтров вводятся параметры «high» и «stop».

Все перечисленные процедуры могут быть использованы для расчета передаточных функций $H(p)$ соответствующих аналоговых фильтров. Для этого вводится параметр 's'. Например, процедура

$[b, a] = \text{ellip}(N-1, R_p, R_s, 2*\pi*F, 's')$

рассчитывает параметры аналогового эллиптического ФНЧ.

Причем частота среза в аналоговом фильтре должна быть задана в виде круговой частоты $\Omega=2*\pi*f$.

Процедура **bilinear** пересчитывает коэффициенты аналогового фильтра в коэффициенты цифрового фильтра:

$[bz, az] = \text{bilinear}(b, a, F_s).$

Аналогично действует и процедура **impinvar**:

$[bz, az] = \text{impinvar}(b, a, F_s).$

Процедура расчета частотных характеристик аналоговых фильтров $[H, \Omega] = \text{freqs}(\mathbf{b}, \mathbf{a}, 512)$ действует аналогично процедуре **freqz**. При этом вектор частот Ω состоит из отсчетов круговой частоты.

Процедура **zplane(b, a)** отображает на графике нули и полюса.

Задания к лабораторной работе

1. Рассчитайте коэффициенты четырех видов цифровых БИХ-фильтров нижних частот: Баттерворта, Чебышева типа 1 и 2, и эллиптического. Построить АЧХ, ФЧХ, диаграммы нулей и полюсов.

2. Рассчитайте цифровой полосовой фильтр Баттерворта по его аналоговому прототипу методом инвариантного преобразования импульсной характеристики и методом билинейного преобразования. Постройте график АЧХ аналогового прототипа и цифровых фильтров, рассчитанных двумя способами.

3. Введите предыскажения в частоты аналогового прототипа, после чего вновь перейти к цифровому фильтру по методу билинейного преобразования.

Методика и порядок выполнения

1. Рассчитайте коэффициенты четырех видов цифровых БИХ-фильтров нижних частот: Баттерворта, Чебышева типа 1 и 2, и эллиптического, порядка $N = 5$ и частотой среза $F = 0.12 + \#/100$, где $\#$ – номер варианта. Используйте процедуры MATLAB: **butter**, **cheby1**, **cheby2**, **ellip**. Постройте в одних осях АЧХ и ФЧХ для четырех видов фильтров. Сравните полученные характеристики. Постройте диаграммы нулей и полюсов для четырех видов фильтров. Сопоставьте расположение нулей и полюсов с видом АЧХ. Обратите внимание на те места, где нули соседствуют с полюсами.

2. Рассчитайте аналоговый полосовой фильтр Баттерворта с частотами среза $F_1 = 0.12 \pm \#/100 - 0.05$ и $F_2 = 0.12 \pm \#/100 + 0.05$, используя процедуру **butter** с параметром 's'. Вместо линейных частот F при этом необходимо подставлять круговые частоты $\Omega = 2\pi F$. Постройте АЧХ аналогового прототипа с помощью процедуры **freqs**, но в зависимости от линейной частоты F . Используя процедуры **bilinear** и **impinvar**, преобразовать аналоговый фильтр в цифровые. Постройте АЧХ этих фильтров на одном графике и сравните между собой и с АЧХ аналогового фильтра.

3. Используя формулы (1), ввести предсказания частот аналогового фильтра после чего повторить п.2.2.

Вопросы для защиты работы

1. Сравните частотные характеристики фильтра Баттерворта и эллиптического фильтра. В чем их сильные и слабые стороны?
2. Как по виду диаграммы нулей полюсов эллиптического фильтра определить его частоту среза?
3. Каким образом по результатам п.2.1 можно построить схемы цифровых фильтров?
4. Для п. 2.2 опишите характер и причины искажений АЧХ цифровых фильтров в том и другом случае по сравнению с аналоговым прототипом?

Содержание отчета и его форма

Отчет должен быть представлен в виде файла с именем **lab5_#.m**, содержащим текст программы с подробными комментариями и файла с именем **фамилия_лаб5_вариант#.doc**, с ответами на контрольные вопросы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ КОНЕЧНОЙ РАЗРЯДНОСТИ ЧИСЕЛ

Цель работы: практическое ознакомление с эффектами квантования в цифровой обработке.

Организационная форма занятий: решение проблемных задач, разбор конкретных ситуаций.

Вопросы для обсуждения на лабораторном занятии: цифровая обработка, эффект квантования.

Формируемые компетенции: ПК-2, ПК-11.

Теоретическое обоснование

Принципиальным свойством цифровых систем является наличие ошибок квантования как отсчетов обрабатываемого сигнала, так и коэффициентов системы. Квантование, то есть представление числа с помощью конечного количества разрядов, вносит в представление квантуемого числа A ошибку

$$e = F(\tilde{A}) - \tilde{A},$$

где $\tilde{A}$ - число до квантования, $F(\tilde{A})$ - число после квантования. Операция F является нелинейной.

Шагом квантования Q называется расстояние между двумя соседними уровнями квантования: $Q = 2^{-b}$, где b – количество разрядов, не считая знакового.

Используются два способа квантования – округление и усечение. При округлении $Q/2 \leq e \leq Q/2$, а при усечении $Q \leq e \leq 0$. Считается, что значения ошибок квантования e равновероятны в указанных диапазонах.

Для анализа процессов квантования используются *линейная и нелинейная* модели. Нелинейная модель используется при моделировании на ЭВМ и точно описывает процессы до и после квантования. В линейной модели к квантованному процессу добавляется аддитивный дискретный шум, который аналогичен по статистическим свойствам реальному шуму квантования. Математическое ожидание μ_e и дисперсия σ_e^2 шума квантования определяются по формулам:

$$\mu_e = 0, \quad \text{при округлении}$$

$$\mu_e = -0.5Q, \quad \text{при усечении} \quad (1)$$

$$\sigma_e^2 = \frac{Q^2}{12} = \frac{2^{-2b}}{12} = \frac{2^{-2m}}{3},$$

где $m = b + 1$ – разрядность с учетом знака.

В процессе цифровой обработки, как правило, приходится прибегать к уменьшению разрядности промежуточных и конечных результатов. Причина заключается в том, что при выполнении арифметических операций над числами их разрядность возрастает. Например, перемножение двоичных сомножителей приводит к удвоению разрядности. Когда произведение из регистра умножителя переписывается в память, происходит уменьшение разрядности методом усечения или методом округления. При усечении часть младших разрядов просто отбрасывается ($0.1101101 \approx 0.110$). При округлении число большей разрядности заменяется на ближайшее число меньшей разрядности ($0.1101101 \approx 0.111$).

Анализ ошибок округления можно выполнять двумя способами: линейным и нелинейным. При нелинейном способе методом моделирования на компьютере находится разность процесса $s(n)$, $n = 1, \dots, N$ на выходе идеального цифрового устройства, в котором не производится никаких округлений и процесса $sq(n)$ на выходе реального цифрового устройства, в определенных точках которого осуществляется округление или усечение промежуточных результатов. Найденная разность

$$e(n) = s(n) - sq(n) \quad (2)$$

и является шумом квантования. Математическое ожидание μ экспериментально полученного шума квантования $e(n)$ рассчитывается по формуле:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e(n) \quad (3)$$

Дисперсия рассчитывается по формуле:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (e - \mu)^2 \quad (4)$$

В линейной модели на вход цифрового устройства, а также в те его точки, где осуществляется округление или усечение промежуточных результатов, подключаются источники равномерно распределенного белого шума с математическим ожиданием и дисперсией, рассчитанными по формулам (1). Каждый из этих источников создает шум на выходе устройства с дисперсией

$$\sigma_{i_{вых.}}^2 = \sigma_{i_{вх.}}^2 \sum_{k=1}^{\infty} h_{i,k}^2, \quad (5)$$

где $h_{i,k}$ – импульсная характеристика i -й части цифрового устройства, через которую шумовой сигнал проходит на выход. Общий выходной шум получается путем сложения реакций цифрового устройства на воздействие указанных источников шума.

Для БИХ-фильтра 2 порядка с передаточной функцией вида

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1}}, \quad (6)$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} h_k^2 = (b_0^2 - 2b_0 b_1 a_1 + b_1^2) / (1 - a_1^2), \quad (7)$$

при включении источника на вход фильтра.

Для выполнения рабочего задания потребуется применение процедуры **round** из MATLAB, которая осуществляет округление числа до ближайшего целого. Чтобы округлить число, меньшее 1, необходимо сначала умножить его на масштабирующий множитель. Например, для того, чтобы округлить семиразрядное двоичное число $a_7 = 0.1101101$ (0.8515625 в десятичном виде) до трехразрядного $a_3 = 0.111$ (0.875 десятичным виде), необходимо выполнить следующее:

$$a_3 = \text{round}(a_7 * 2^3) / 2^3. \quad (8)$$

Задания к лабораторной работе

1. Постройте АЧХ для фильтра с передаточной функцией (6) для точных и округленных значений коэффициентов.
2. Задайте входной синусоидальный процесс с точными и квантованными отсчетами. Найдите шум квантования его математическое ожидание и дисперсию.
3. Найдите шум квантования на выходе фильтра, обусловленный квантованием входного сигнала.

4. Найдите шум на выходе фильтра, обусловленный квантованием промежуточных результатов в процессе фильтрации.

Методика выполнения работы

1. Создайте в виде отдельного файла функцию квантования по формуле (8), выходным параметром которой является квантованный процесс, а входными параметрами – исходный процесс и разрядность квантования. Правила оформления функций смотрите в **help function**. Постройте АЧХ для фильтра с передаточной функцией (6) и коэффициентами $a = [1 - \#/20]$, $b = [0.05 \ 0.05]$, где $\#$ – номер варианта. Постройте на том же графике АЧХ для фильтра с коэффициентами, округленными с до трех и до шестнадцати двоичных разрядов.

2. Задайте входной процесс в виде $s = \sin(2*\pi*f*n)$; $n = (0 \dots 2000)$. Частоту f задайте таким образом, чтобы сигнал попал в полосу пропускания фильтра. Выполните квантование сигнала s до b разрядов для $b = 3$ и для $b = 8$. Таким образом, из дискретизированного сигнала s получается цифровой sq . Постройте на одном графике s , sq , $e = s - sq$ для $b = 3$. Найдите математическое ожидание и дисперсию шума e (для $b = 8$) по формулам (3) и (4)

3. Подайте сигналы s и sq ($b = 8$) на вход исследуемого фильтра с 16-разрядными коэффициентами. Используя процедурой **filter**, найти шум квантования на выходе фильтра обусловленный квантованием входного сигнала по формуле (2), его математическое ожидание и дисперсию.

4. Найдите шум квантования за счет округления промежуточных результатов фильтрации. Для этого запрограммируйте алгоритм фильтрации в виде разностного уравнения, соответствующего передаточной функции (7) для прямой (неканонической) схемы реализации фильтра. Программу

выполните в виде цикла. После нахождения очередного отсчета делайте округление результата до $b=16$ – разрядность памяти вычислителя. Шум обусловленный квантованием входного сигнала на данном этапе расчета учитывать не следует. Поэтому отсчеты входного сигнала необходимо округлить до разрядности памяти. По формулам (3) и (4) найдите математическое ожидание и дисперсию шума округления вычислителя.

Вопросы для защиты работы

1. Рассчитайте дисперсию эквивалентного шума квантования АЦП на входе по формуле (1) и сравните с результатом пункта 2.5 в абсолютных значениях и дБ.
2. Рассчитайте параметры шума квантования АЦП на выходе фильтра для линейной модели, пользуясь формулами (5), (6) и (8) и сравните с результатом пункта 2.8 в абсолютных значениях и дБ.
3. Рассчитайте параметры шума квантования за счет округления промежуточных результатов фильтрации на выходе фильтра для линейной модели, пользуясь формулами (1), (5) и (7) и сравните с результатом пункта 2.4 в абсолютных значениях и дБ.

Содержание отчета и его форма

Отчет должен быть представлен в виде файла с именем **lab6_#.m**, содержащим текст программы с подробными комментариями и файла с именем **фамилия_лаб6_вариант#.doc**, с ответами на контрольные вопросы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7. ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ ДИСКРЕТИЗАЦИИ

Цель работы: приобретение практических навыков применения алгоритмов изменения частоты дискретизации цифровых сигналов.

Организационная форма занятий: решение проблемных задач, разбор конкретных ситуаций.

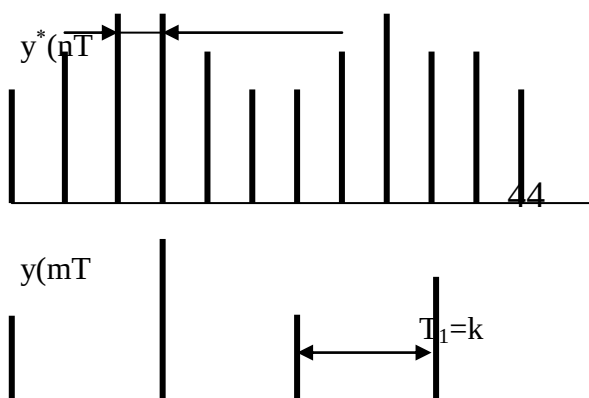
Вопросы для обсуждения на лабораторном занятии: цифровые сигналы, алгоритмы изменения частоты дискретизации.

Формируемые компетенции: ПК-2, ПК-11.

Теоретическое обоснование

Алгоритмы изменения частоты дискретизации первоначально применялись для сопряжения цифровых систем с различной тактовой частотой. В дальнейшем они стали использоваться для снижения вычислительных затрат при реализации алгоритмов ЦОС. Процесс понижения частоты дискретизации называют децимацией, а процесс повышения частоты дискретизации – интерполяцией.

Децимация выполняется с помощью операции прореживания: Процесс с пониженной частотой дискретизации (децимированный процесс) формируется путем выборки каждого k -го отсчета из процесса с высокой частотой дискретизации. Коэффициент k называется коэффициентом децимации.



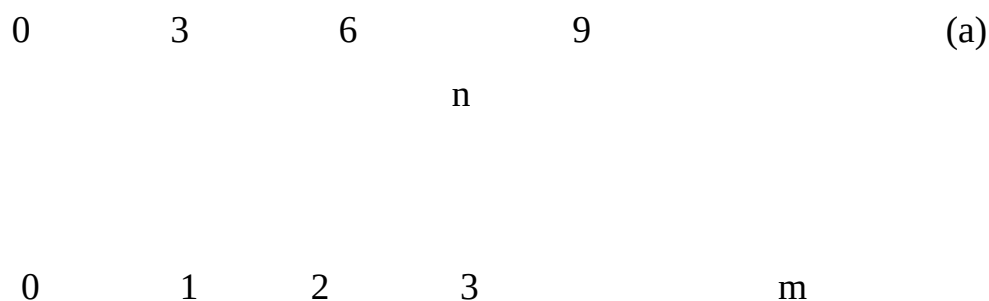


Рис. 7.1

На рис.7.1 показан пример децимации при $k=3$ в результате чего процесс $y^*(nT)$, рис.7.1а, преобразуется к процессу $y(mT_1)$, рис.7.1б. Следует учитывать, что процесс должен соответствовать теореме Котельникова, как до понижения частоты дискретизации, так и после нее. Таким образом, перед выполнением децимации необходимо убедиться в том, что наивысшая частота в спектре процесса не превышает половины новой (пониженной) частоты дискретизации. Если это условие не выполняется, необходимо ограничить спектр процесса с помощью фильтрации. В противном случае децимация приведет к искажению сигнала за счет перекрытия спектров.

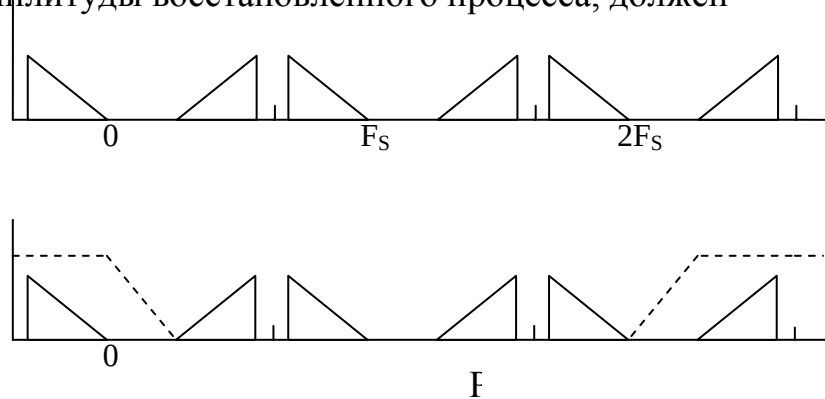
При интерполяции прореженные отсчеты должны быть восстановлены. Существует множество способов интерполяции. Наиболее распространены способы повышения частоты дискретизации: за счет добавления нулевых отсчетов; за счет повторения отсчетов.

При первом способе для повышения частоты дискретизации достигается за счет добавления нулевых отсчетов между отсчетами исходного процесса. Например, при интерполяции в три раза между отсчетами исходного процесса добавляется по два нулевых отсчета. Частота дискретизации при этом увеличивается, однако фактическая реализация процесса не меня-

ется. Поэтому и вид спектра процесса с добавленными нулевыми отсчетами остается тем же самым.

На рис. 7.2 показаны спектры процесса при интерполяции в три раза до, и после добавления нулевых отсчетов. $F_{Si} = 3F_S$ – новая частота дискретизации.

Для полного восстановления отсчетов интерполированного процесса необходимо отфильтровать “лишние” спектральные составляющие. АЧХ фильтра показана на рис.7.2б пунктиром. При этом фильтр, для сохранения амплитуды восстановленного процесса, должен



иметь коэффициент передачи в полосе пропускания, равный коэффициенту интерполяции. Выполняя указанные действия можно, например, перейти от процесса на рис.7.1б к процессу на рис.7.1а.

При втором способе интерполяции вместо добавления нулевых отсчетов повторяют k раз отсчеты исходного процесса. По сути это эквивалентно фильтрации исходного процесса КИХ-фильтром порядка k с единичными коэффициентами. Поэтому при втором способе на спектр рис.7.2б накладывается АЧХ однородного фильтра вида: $\sin(k\omega t_s/2)/\sin(\omega t_s/2)$. Для полного восстановления формы процесса необходимо, как и в первом случае, отфильтровать ненужные спектральные составляющие. Масштабировать коэффициент передачи фильтра не требуется.

Задания к лабораторной работе

1. Сформируйте исходный процесс в виде аддитивной смеси ЧМ-сигнала и тонального сигнала с частотой дискретизации F_s .
2. Постройте графики спектров исходного процесса в реальных и относительных частотах.
3. Выполните децимацию процесса с коэффициентом децимации $k=2$. Постройте график спектра процесса после децимации.
4. Ограничьте спектр исходного процесса с помощью КИХ-фильтра таким образом, чтобы после децимации не было искажений ЧМ-сигнала. АЧХ фильтра постройте на графике спектра исходного процесса в относительных частотах. Вновь выполнить децимацию, постройте спектр и сравните его с предыдущим.
5. Выполните интерполяцию процесса, полученного в п.1.4 методом добавления нулевых отсчетов. Постройте спектр процесса.
6. Синтезируйте фильтр для подавления ненужных спектральных составляющих и построить его АЧХ на одном графике со спектром.
7. Выполните фильтрацию процесса и построить график спектра после фильтрации.
8. Выполните интерполяцию процесса методом повторения отсчетов и повторить п.п.1.5-1.8.

Методика выполнения работы

1. Сформировать исходный процесс в виде аддитивной смеси ЧМ-сигнала и тонального сигнала:

$$\text{process} = \sin(w_0*t + (w_d/w_m)*\sin(w_m*t)) + 2*\sin(w_i*t),$$

где $w_0 = 2\pi(0.2 + \# \cdot 0.02)$ МГц, $d = 2\pi(0.15 + \# \cdot 0.0025)$ МГц,
 $w_m = 2\pi \cdot 0.005$ МГц, $w_i = 2\pi(F_s/2 - 0.8 \cdot f_0)$ МГц,
 $F_s = 4 \cdot 1.2288$ МГц - частота дискретизации, $\#$ - номер варианта

2. Постройте графики спектров исходного процесса в реальных и относительных частотах.

3. Выполните децимацию процесса с коэффициентом децимации $k=2$, для чего из исходного процесса взять каждый второй отсчет. Постройте график спектра процесса после децимации.

4. Используя спектр исходного процесса, синтезируйте КИХ-фильтр и отфильтруйте частотные составляющие исходного процесса, выходящие за половину новой частоты дискретизации. АЧХ фильтры постройте на графике спектра исходного процесса в относительных частотах. При этом, для соответствия масштабов АЧХ и спектра следует умножить отсчеты АЧХ на масштабирующий коэффициент. Отсчеты АЧХ рассчитать с помощью оператора **freqz** с параметром 'whole'. Выполните децимацию фильтрованного процесса и постройте его спектр. Сравните спектр с предыдущим. Порядок фильтра следует выбирать минимальным, добиваясь при этом, чтобы в спектре ЧМ-сигнала после децимации не было видимых искажений и следов тонального сигнала.

5. Проведите интерполяцию процесса, полученного в предыдущем пункте методом добавления нулевых отсчетов с коэффициентом интерполяции $k=2$. Выполните это с помощью оператора цикла, присвоив нечетным отсчетам нулевые значения, а четным – значения отсчетов децимированного процесса. Постройте спектр процесса.

6. По виду полученного спектра синтезируйте КИХ-фильтр, отфильтровав ненужные спектральные составляющие и приблизьте, таким обра-

зом, спектр интерполированного процесса к виду исходного ЧМ сигнала. После фильтрации необходимо умножить отсчеты интерполированного процесса на $k=2$, для восстановления амплитуды исходного ЧМ сигнала. АЧХ фильтра построить на одном графике со спектром из п. 2.5. Для синтеза фильтра применить процедуру **remez** или **firls**, определяя зону подавления в соответствии с частотами ненужных спектральных составляющих. Порядок фильтра должен быть минимальным.

6. Проведите интерполяцию процесса, полученного в п.2.4, методом повторения отсчетов. Как и в п.2.5 можно выполнить это в цикле. Затем повторить действия п.2.6.

Вопросы для защиты работы

1. Объясните, в каком случае и для чего нужна фильтрация перед выполнением децимации?
2. Какой должна быть частота среза фильтра при переходе от частоты дискретизации $F_{S1} = \#*100\text{кГц}$ до частоты дискретизации $F_{S2} = \#*25\text{кГц}$?
3. Докажите с помощью формул для ДПФ что при добавлении нулевых отсчетов при интерполяции форма спектра остается неизменной.
4. В чем заключаются преимущества и недостатки двух рассмотренных способов интерполяции?

Содержание отчета и его форма

Отчет должен быть представлен в виде файла с именем **lab7_#.m**, содержащим текст программы с подробными комментариями и файла с именем **фамилия_лаб7_вариант#.doc**, с ответами на контрольные вопросы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. Воскобойников, Ю.Е. Основы вычислений и программирования в пакете MathCAD PRIME [Электронный ресурс]: учебное пособие / Ю.Е. Воскобойников, А.Ф. Задорожный. – Электрон. дан. – СПб. : Лань, 2016. – 224 с. – Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=72977
2. Цифровая обработка сигналов и MATLAB : учеб.пособие для вузов / А.И. Солонина, Д.М. Клионский, Т.В. Меркучева, С.Н. Перов. - Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2013. - 512 с. : ил. ; 24 + 1 электрон.опт. диск (CD-ROM). - Гриф: Рек. УМО. (электронный каталог библиотеки СКФУ)
3. Джиган, В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы / В.И. Джиган. - М. : Техносфера, 2013. - 528 с. - (Мир цифровой обработки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=233460>
4. Солонина, А. И. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в Simulink : учеб.пособие для вузов / А. И. Солонина. - Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2012. - 425 с. - (Учебное пособие). (электронный каталог библиотеки СКФУ)
5. Оппенгейм, А. Цифровая обработка сигналов [Электронный ресурс] / А. Оппенгейм, Р. Шафер. - 3-е изд., испр. - М. :Техносфера, 2012. - 1048 с. Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=233730>
6. Шкундин, С.З. Теория информационных процессов и систем : учебное пособие / С.З. Шкундин, В.Ш. Берикашвили. - М. : Горная книга, 2012. - 475 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=229031>

7. Умняшкин, С.В. Теоретические основы цифровой обработки и представления сигналов : учебное пособие / С.В. Умняшкин. - 2-е изд., испр. и доп. - М. : Техносфера, 2012. - 368 с. - (Мир цифровой обработки). - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=233733>

Дополнительная литература

1. Щетинин, Ю.И. Анализ и обработка сигналов в среде MATLAB : учебное пособие / Ю.И. Щетинин. - Новосибирск : НГТУ, 2011. - 115 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=229142>

2. Смоленцев, Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н.К. Смоленцев. - 3-е изд., доп. и перераб. - М. : ДМК Пресс, 2009. - 448 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=231893>.

3. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов : учеб. пособие для вузов / А. Б. Сергиенко. - 2-е изд. - М. [и др.] : Питер, 2007. (электронный каталог библиотеки СКФУ)

4. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях / В.Ф. Кравченко, А.А. Зеленский, О.В. Горячкин и др. - М. : Физматлит, 2007. - 544 с. - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=82181>

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙ-
СКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к самостоятельной работе по дисциплине
«Основы цифровой обработки сигналов»
для студентов направления
09.03.02 «Информационные системы и технологии»

Ставрополь 2025

ВВЕДЕНИЕ

Целями изучения дисциплины «Основы цифровой обработки сигналов» являются формирование набора общепрофессиональной компетенции бакалавра по направлению 09.03.02 «Информационные системы и технологии», четких представлений о фундаментальных положениях теории цифровой обработки сигналов; обучение основам аналитических и численных методов расчета и анализа цифровых преобразователей измерительных сигналов; развитие навыков проектирования цифровых измерительных преобразователей, обработки экспериментальных результатов и их анализа.

Задачи изучения дисциплины «Основы цифровой обработки сигналов» - создание оптимальных условий обучения дисциплине с учетом уровня подготовки студентов в области математики, физики и электроники.

2. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина «Основы цифровой обработки сигналов» относится к дисциплинам блока Б1 части, формируемая участниками образовательных отношений – Б1.В.02. Ее освоение происходит в 7 семестре.

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора
ПК-1 – способен разрабатывать программное обеспечение интеллектуальных информационных систем	ПК-1 _{ИД-1.1} Демонстрирует знания в области применения алгоритмов и их адаптации к практическим задачам
	ПК-1 _{ИД-1.2} Разрабатывает приложения на языке высокого уровня в том числе с использованием интеллектуальных технологий
	ПК-1 _{ИД-1.3} Применяет современные автоматизированные технологии тестирования и отладки программного обеспечения

	ПК-1 _{ИД-1.4} Применяет современные технологии непрерывного развертывания и доставки программного обеспечения
	ПК-1 _{ИД-1.5} Разрабатывает приложения для различных целевых платформ (мобильные, серверные, встраиваемые, оконные)
ПК-3 Способен использовать интеллектуальные модели при решении задач профессиональной деятельности	ПК-3 _{ИД-3.1} Демонстрирует знания теоретических основ функционирования интеллектуальных моделей и особенности их обучения и оптимизации
	ПК-3 _{ИД-3.2} Анализирует и применяет интеллектуальные методы согласно решаемой задаче
	ПК-3 _{ИД-3.3} Применяет инструментальные средства визуализации данных, в том числе больших данных
	ПК-3 _{ИД-3.4} Умеет настраивать параметры и гиперпараметры интеллектуальных моделей для достижения высокой эффективности обучения и функционирования
	ПК-3 _{ИД-3.5} Применяет инструментальные средства интеллектуальной обработки данных различной природы (текстовые, изображения, видео, аудио)

Содержание дисциплины

Раздел 1. Цифровые фильтры и цифровая фильтрация сигналов.

Тема 1. Введение в цифровую обработку сигналов.

Тема 2. Цифровые фильтры обработки одномерных сигналов.

Тема 3. Фильтры сглаживания. Метод наименьших квадратов.

Тема 4. Фильтрация случайных сигналов.

Тема 5. Нерекурсивные частотные цифровые фильтры.

Тема 6. Рекурсивные цифровые фильтры.

Тема 7. Рекурсивные частотные цифровые фильтры.

Раздел 2. Специальные методы обработки сигналов.

Тема 8. Адаптивная фильтрация цифровых данных.

Тема 9. Основы вейвлет-преобразования сигналов.

1. ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Самостоятельная работа студентов является важнейшим условием формирования научного способа познания. Она проводится накануне каждого семинарского (практического, лабораторного) занятия и включает подготовку реферата или сообщения, а также выполнения лабораторного задания.

Подготовленный материал, практическое задание оформляются в конспекте.

Самостоятельные занятия (СЗ) являются одной из активных форм обучения.

Самостоятельные занятия по дисциплине «Основы цифровой обработки сигналов» имеют целью:

- закрепить и углубить знания, полученные студентами на лекциях и в процессе лабораторных занятий;
- сформировать практические навыки при работе с инструментальными средствами для обработки цифровых сигналов.

Самостоятельные занятия проводятся в лабораториях, оборудованных современными средствами вычислительной техники и возможностью выхода в сеть Internet, в библиотеке.

Предлагаемые методические рекомендации содержат информацию для студентов, необходимую при подготовке и проведении лабораторных занятий по дисциплине «Основы цифровой обработки сигналов».

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Методические указания должны включать следующие разделы:

- цель работы;
- задание, которое должно быть выполнено студентом в результате проведения самостоятельной работы;
- варианты индивидуальных заданий;
- основные теоретические положения, необходимые для выполнения задания, они должны быть краткими и содержать ссылки на литературу, в которой эти положения изложены в объеме, достаточном для выполнения самостоятельной работы;
- этапы выполнения задания с указанием конкретных сроков выполнения каждого из этапов и всего задания в целом;
- требования к оформлению графической и текстовой части самостоятельной работы;
- пример выполнения одного из вариантов задания и оформления отчета;
- библиографический список использованных источников.

3. СОДЕРЖАНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

3.1 Самостоятельное изучение тем лекционного курса

Раздел 1. Цифровые фильтры и цифровая фильтрация сигналов.

Тема 7. Рекурсивные цифровые фильтры

1. Согласованное z -преобразование.
2. Билинейное z -преобразование.
3. Режекторные и селекторные фильтры.
4. Комплексная z -плоскость.
5. Режекторный фильтр постоянной составляющей сигнала.
6. Режекторный фильтр произвольной частоты.
7. Селекторные фильтры.

Раздел 2. Специальные методы обработки сигналов.

Тема 8. Адаптивная фильтрация цифровых данных

1. Основы статистической группировки информации. Предпосылки метода.
2. Статистическая регуляризация данных. Проверка теоретических положений метода.
3. Оценка сохранения разрешающей способности. Статистическая оценка регуляризации данных

Тема 9. Основы вейвлет-преобразования сигналов

1. Частотно-временная локализация вейвлет-анализа.
2. Образное представление преобразования.
3. Достоинства и недостатки вейвлетных преобразований.
4. Практическое использование.

В процессе самостоятельного изучения тем лекционного курса студент изучает предложенные им по рекомендуемому преподавателем списку литературы и предоставляет преподавателю краткий конспект, по которому в дальнейшем проводится индивидуальное собеседование.

4. План-график выполнения СРС

№	Форма самостоятельной работы	Срок ее сдачи
	Собеседование по результатам самостоятельного изучения тем лекций	по итогам изучения соответствующего раздела лекционного курса

5. ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ

5.1. *Формы контроля знаний студентов*

Контроль и оценка знаний, умений и навыков студентов осуществляется на лабораторных занятиях, консультациях, при сдаче экзамена. В ходе контроля знаний преподаватель оценивает понимание студентом содержания дисциплины «Основы цифровой обработки сигналов», его способность использовать современные информационные технологии для задач обработки и преобразования сигналов.

Контроль знаний студентов может осуществляться в следующих формах:

- текущий контроль знаний;
- итоговый контроль знаний.

Текущий контроль знаний студентов имеет целью:

- дать оценку работы каждого студента по усвоению им учебного материала, выявить недостатки в его подготовке и оказать практическую помощь в их устранении;

Основными формами текущего контроля знаний студентов являются:

- устный контрольный опрос;
- письменный контрольный блиц-опрос;
- защита лабораторной работы;

- проверка конспектов лекций.

Устный контрольный опрос студентов проводится на лекциях (и лабораторных занятиях). По его результатам преподаватель оценивает качество подготовки студента к занятию.

Письменный контрольный блиц-опрос студентов проводится в течение пяти минут на лабораторных занятиях путем письменного ответа их на пять вопросов, заданных преподавателем. Результаты его проведения отмечаются в журнале. На лабораторных занятиях знания и практические навыки студентов оцениваются по 5-балльной системе. Полученные оценки выставляются в журнале.

При проверке конспектов лекций дается анализ качества их ведения. Отмечаются допущенные ошибки, в рецензии преподавателя оценивается качество конспектирования учебного материала, даются рекомендации по улучшению качества конспектирования лекционного материала.

5.2. Рекомендации по подготовке к дифференцированному зачету

Для получения допуска к зачету с оценкой необходимо посещать все лекции и лабораторные занятия, а так же предоставить отчеты о выполнении лабораторных работ, выполненную и защищенную контрольную работу.

6. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАБОТЕ С ЛИТЕРАТУРОЙ И ИСТОЧНИКАМИ

6.1. Рекомендации студентам по организации работы с литературой и источниками

Изучение литературы и источников необходимо начинать с прочтения соответствующих глав учебных изданий, учебных пособий или литера-

туры, рекомендованной в качестве основной или дополнительной по дисциплине «Основы цифровой обработки сигналов», которые прямо или косвенно относятся к изучаемой теме.

Изучая литературу и источники, студенту рекомендуется вести краткий конспект. Однако не следует переписывать все содержание изучаемой темы, нужно выписывать лишь основные идеи и главные на ваш взгляд мысли. В отдельных случаях, когда встречаются важные определения, понятия, необходимый фактический материал и примеры, статистическая информация, имеющие отношение к изучаемой теме, студенту следует выписать их в виде цитат с полным указанием библиографических источников.

Конспектирование рекомендуемой литературы и источников необходимо вести с распределением собранных материалов по отдельным главам и параграфам согласно учебно-тематическому плану. Необходимо выписывать все выходные данные по используемой литературе и источникам.

Основой технологии интенсификации обучения на платформе цифровых образовательных технологий являются учебно-иллюстрационные материалы (опорный конспект) по дисциплине ««Основы цифровой обработки сигналов»».

Работа с учебно-иллюстрационными материалами имеет следующие этапы.

1. Изучение теоретических основ учебного материала в аудитории: изложение преподавателем изучаемого материала студентам с объяснением по опорному конспекту;

2. Самостоятельная работа: индивидуальная работа студентов по опорному конспекту; фронтальное закрепление по блокам опорного конспекта.

3. Первое повторение - воспроизведение содержания заданной темы опорного конспекта по памяти.

4. Устное проговаривание материала опорного конспекта - необходимый этап внешнеречевой деятельности при усвоении учебного материала.

5. Второе повторение - взаимопрос и взаимопомощь студентов друг другу.

Применение учебно-иллюстрационных материалов позволяет обобщить сложный по содержанию материал, активизировать мыслительную деятельность студентов.

Необходимо помнить, что главное для студента в самостоятельной работе с рекомендуемой литературой и источниками - это формирование своего индивидуального стиля, который может стать основой в будущей профессиональной деятельности.

6.2. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Воскобойников, Ю.Е. Основы вычислений и программирования в пакете MathCAD PRIME [Электронный ресурс]: учебное пособие / Ю.Е. Воскобойников, А.Ф. Задорожный. – Электрон. дан. – СПб. : Лань, 2016. – 224 с. – Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=72977

2. Цифровая обработка сигналов и MATLAB : учеб.пособие для вузов / А.И. Солонина, Д.М. Клионский, Т.В. Меркучева, С.Н. Перов. - Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2013. - 512 с. : ил. ; 24 + 1 электрон.опт. диск (CD-ROM). - Гриф: Рек. УМО. (электронный каталог библиотеки СКФУ)

3. Джиган, В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы / В.И. Джиган. - М. : Техносфера, 2013. - 528 с. - (Мир цифровой обработки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=233460>

4. Солонина, А. И. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в Simulink : учеб.пособие для вузов / А. И. Солонина. - Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2012. - 425 с. - (Учебное пособие). (электронный каталог библиотеки СКФУ)

5. Оппенгейм, А. Цифровая обработка сигналов [Электронный ресурс] / А. Оппенгейм, Р. Шафер. - 3-е изд., испр. - М. :Техносфера, 2012. - 1048 с. Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=233730>

6. Шкундин, С.З. Теория информационных процессов и систем : учебное пособие / С.З. Шкундин, В.Ш. Берикашвили. - М. : Горная книга, 2012. - 475 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=229031>

7. Умняшкин, С.В. Теоретические основы цифровой обработки и представления сигналов : учебное пособие / С.В. Умняшкин. - 2-е изд., испр. и доп. - М. : Техносфера, 2012. - 368 с. - (Мир цифровой обработки). - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=233733>

Дополнительная литература

1. Щетинин, Ю.И. Анализ и обработка сигналов в среде MATLAB : учебное пособие / Ю.И. Щетинин. - Новосибирск : НГТУ, 2011. - 115 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=229142>

2. Смоленцев, Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н.К. Смоленцев. - 3-е изд., доп. и перераб. - М. : ДМК Пресс, 2009. - 448 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=231893>.

3. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов : учеб. пособие для вузов / А. Б. Сергиенко. - 2-е изд. - М. [и др.] : Питер, 2007. (электронный каталог библиотеки СКФУ)

4. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях / В.Ф. Кравченко, А.А. Зеленский, О.В. Горячкин и др. - М. : Физматлит, 2007. - 544 с. - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=82181>

6.3 Internet-ресурсы

- 1) <http://exponenta.ru> – образовательный математический сайт;
- 2) <http://www.intuit.ru> – Национальный открытый университет «ИНТУИТ»;
- 3) <http://www.window.edu.ru> – Единое окно доступа к образовательным ресурсам.
- 4) <http://biblioclub.ru> – ЭБС «Университетская библиотека on-line»
- 5) <http://www.prodav.narod.ru/dsp/index.html> - Давыдов А.В. Цифровая обработка сигналов. Тематические лекции: Учебное пособие в электронной форме. – Екатеринбург, УГГУ

6.4 Материально-техническое обеспечение дисциплины

К материально-техническому уровню освоения содержания дисциплины «Основы цифровой обработки сигналов» можно отнести:

- индивидуальное взаимодействие со студентами в процессе проведе-

ния лекционных и лабораторных занятий;

- использование на лекциях и лабораторных занятиях мультимедийного оборудования;

- включение в лабораторные работы индивидуального поиска, систематизации и анализа информации через Internet;

- авторские презентации к лекциям;

- лекционная аудитория должна быть оборудована мультимедиа проектором;

- Microsoft Office - Word,

- пакеты автоматизации математических вычислений – MathCAD; MatLab;

- ОС Windows;

- компьютерный класс с предустановленным программным обеспечением.