

## Рекомендуемая литература

№ п/п	Наименование	Кол-во в библ. ЧГУ
1.	Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов: [учебное пособие для вузов по направлению "Информатика и вычислительная техника"] / Сергиенко А. Б. 2-е изд. СПб: Питер, 2007. 750 с. (и др. года изд.) 3-изд., 2013	167 Э
2.	Основы цифровой обработки сигналов: [учебное пособие для вузов] / А. И. Солонина, Д. А. Улахович, С. М. Арбузов, Е. Б. Соловьева. 2-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 753 с.	40 Э
3.	Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов / пер. с англ. М.: Мир, 1989. 448 с.	4 Э
4.	Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / пер. с англ. М.: Мир, 1990. 584 с.	3
5.	Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. 3-е изд. /пер. с англ. М: Техносфера, 2025. 1048 с.	Э
6.	Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978. 848 с.	1 Э
7.	Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов. Практический подход. 2-е изд. М.: Вильямс, 2018. 992 с	
8.	Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников. М.: ДМК Пресс, 2018. 718 с.	
9.	Дауни А. Цифровая обработка сигналов на языке Python. М.: ДМК Пресс, 2017. 160 с.	

10.	Солонина А. Цифровая обработка сигналов в зеркале MATLAB: учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2018. 560 с.	
11.	Дьяконов В., Абраменкова И. MATLAB. Обработка сигналов и изображений: Спец. справочник. СПб.: Питер, 2006. 608 с. (и др. года изд.)	43
12.	Умняшкин С.В. Основы теории цифровой обработки сигналов, 8-е издание, исправленное. М: Техносфера, 2025. 550 с.	

### Методические пособия и указания

№ п/п	Наименование	Количество в библиотеке ЧГУ
1.	Андреева А. А. Цифровая обработка сигналов: практикум [для 4 курса направления "Информатика и вычислительная техника"] / Андреева А. А.; Чуваш. гос. ун-т им. И. Н. Ульянова. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. 126 с.: - ISBN 978-5-7677-2250-1.	115
2.	Теория цифровой обработки сигналов: методические указания к расчетно-графической работе / Чуваш. гос. ун-т им. И. Н. Ульянова; [сост. А. А. Андреева]. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. 27 с.	115

## Программное обеспечение

№ п/п	Наименование	Условия доступа/скачивания
1.	Octave – свободная система для математических вычислений, использующая совместимый с MATLAB язык высокого уровня >> pkg load signal	<a href="http://www.gnu.org/software/octave/install">http://www.gnu.org/software/octave/install</a> <a href="http://octave-online.net">http://octave-online.net</a>
2.	Программа математического и имитационного моделирования для ЭВМ «РИТМ. Engee»	<p>Доступ к «РИТМ. Engee» могут получить сотрудники и обучающиеся ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Для начала использования среды моделирования «РИТМ. Engee» необходимо зарегистрироваться в личном кабинете пользователя на сайте <a href="https://engee.com/">https://engee.com/</a>, обязательно указав при регистрации ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова». Подтверждение получения доступа необходимо получать у заведующего научно-исследовательской лаборатории «Цифровые тени и двойники в электроэнергетике» Еремеева Дмитрия Григорьевича по адресу: г. Чебоксары, ул. Спиридона Михайлова, д. 3, ауд. Т-217, контактный телефон: 8960-308-13-36.</p> <a href="https://exponenta.ru/academy/download">https://exponenta.ru/academy/download</a>
3.	MATLAB Signal Processing Toolbox; Symbolic Math Toolbox; DSP System Toolbox	
4.	Visual Studio Community	<a href="http://www.visualstudio.com/ru/vs/community">http://www.visualstudio.com/ru/vs/community</a>

## Рекомендуемые интернет-ресурсы и открытые онлайн курсы

№ п/п	Наименование интернет ресурса	Режим доступа
1.	Открытое образование. Основы цифровой обработки сигналов	URL: <a href="https://openedu.ru/course/urfu/SIGPROC/">https://openedu.ru/course/urfu/SIGPROC/</a>

## Перечень и график выполнения лабораторных работ

№	Тема	Неделя семестра
1	Базовые операции ЦОС ([1], работа 1)	1-3
2	Проектирование и исследование характеристик цифрового фильтра с использованием системы MATLAB (Octave) ([1], работа 2):	
2.1	Проектирование ЦФ	4-6
2.2	Моделирование ЦФ на языке высокого уровня	7-9
3	Дискретные спектральные преобразования и методы их вычисления ([1], работа 3)	10-12
4	Классические методы спектрального анализа ([1], работа 4)	13-16
	Расчетно-графическая работа по теме «Основы теории линейных дискретных систем» [2]	1-8
	Всего	

## **Контрольные работы**

1. Z-преобразование
2. Формула свертки. Структурные схемы линейных дискретных систем
3. Быстрое преобразование Фурье
4. Спектральный анализ

## Сигналы

*Сигналом* называется физический процесс, параметры которого изменяются в соответствии с передаваемым сообщением. Сигнал является материальным носителем информации. По способу представления сигналы разделяются на две группы – *случайные* и *детерминированные*. Их описывают математической моделью или функцией, характеризующей изменение параметров сигнала.

*Случайным* сигналом называют функцию времени, значения которой заранее неизвестны и могут быть предсказаны лишь с некоторой *вероятностью*. К основным характеристикам случайных сигналов относятся:

- закон распределения (относительное время пребывания значения сигнала в определенном интервале),
- спектральное распределение мощности.

*Детерминированные* сигналы описываются аналитической функцией (задаются аналитически), и их поведение полностью известно в любой момент времени. Детерминированные сигналы в свою очередь бывают *периодическими* и *непериодическими*. Непериодические сигналы, как правило, ограничены во времени.

*Периодический* сигнал - сигнал, который повторяется во времени с определенным периодом, то есть для которого выполняется условие:

$$s(t) = s(t + kT),$$

где  $k$  – любое целое число,  $T$  – период повторения.

Пример *периодического* сигнала – гармоническое колебание, описываемое следующим выражением:

$$s(t) = A \cos(2\pi t/T + \varphi),$$

где  $A$  – амплитуда колебания,  $\varphi$  – начальная фаза.

Известно, что любой сложный периодический сигнал может быть представлен в виде суммы гармонических колебаний с частотами, кратными основной частоте  $\omega = 2\pi/T$ .

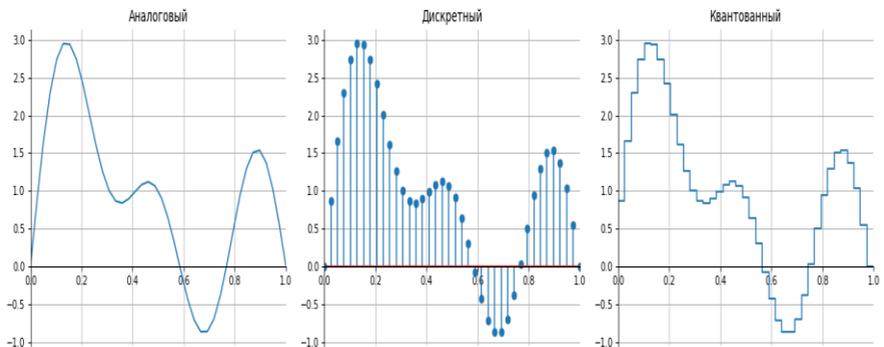
## Цифровые сигналы

Все сигналы можно разделить на четыре группы:

- аналоговые,
- дискретные,
- квантованные,
- цифровые.

**Аналоговый** сигнал – описывается непрерывной функцией времени. Аналоговый сигнал обеспечивает передачу данных путем непрерывного изменения во времени амплитуды, частоты или фазы. Практически все физические процессы описываются непрерывными функциями времени, поэтому представляют собой аналоговые сигналы. Для аналогового сигнала область значений и определения описывается *непрерывным множеством*.

Для **дискретного** сигнала свойственно прерывистое (дискретное) изменение сигнала во времени. То есть изменения в сигнале происходят скачкообразно через некоторые промежутки времени, называемые интервалом дискретизации –  $\Delta t$  или  $T_d$ . Дискретизация *аналогового сигнала* состоит в том, что сигнал представляется в виде последовательности значений, взятых в дискретные моменты времени, которые называются *отсчётами*.



**Квантованные** сигналы принимают ряд конечных значений из диапазона непрерывных или дискретных величин. Как правило, сигналы квантуются по уровню, то есть по амплитуде.

**Цифровые** сигналы получаются из аналоговых с помощью операций **дискретизации** и **квантования** по уровню. Значениям цифрового сигнала присваивается кодовое слово или набор символов (зачастую двоичных).

Для правильного восстановления аналогового сигнала из цифрового без искажений и потерь используется теорема отсчетов, известная как **теорема Котельникова (Найквиста-Шеннона)**.

Любой непрерывный сигнал с ограниченным спектром может быть восстановлен однозначно и без потерь по своим дискретным отсчетам, взятым с частотой строго больше удвоенной верхней частоты спектра непрерывного сигнала.

Формула теоремы Котельникова:

$$F_d = 1/T_d > 2 F_a,$$

где  $F_d$  - частота дискретизации сигнала,  $F_a$  - верхняя частота спектра аналогового сигнала.

Такое определение относится к функциям времени, которые состоят из частот от нуля до  $F_a$ .

В реальных задачах в радиотехнике спектр сигнала может лежать в любом диапазоне частот, начинаться и заканчиваться на любой частоте, в связи с этим определение теоремы Котельникова правильно рассматривать относительно ширины спектра такого сигнала:

Любой непрерывный сигнал с ограниченным спектром может быть восстановлен однозначно и без потерь по своим дискретным отсчетам, взятым с частотой строго больше удвоенной ширины полосы частот, занимаемой спектром непрерывного сигнала.

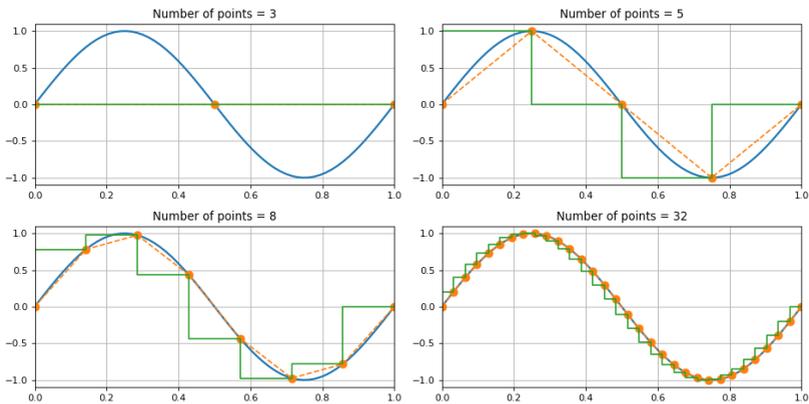
$$F_d = 1/T_d > 2 \Delta f,$$

где  $\Delta f$  - ширина спектра непрерывного сигнала.

Устройства, осуществляющие дискретизацию по времени и квантование по уровню, называются **аналого-цифровыми преобразователями (АЦП)**. Устройства, переводящие цифровой сигнал в аналоговый, называются **цифро-аналоговыми преобразователями (ЦАП)**.

Если шаг квантования и дискретизации выбраны неправильно, преобразование сигнала из аналоговой формы в дискретную будет происходить с искажениями. Покажем на примере неграмотный выбор шага дискретизации и шага квантования.

Зададим график синуса. Длина сигнала  $n = 64$  отсчетов, на которых укладывается один период гармонического сигнала. Установим шаг квантования таким образом, чтобы иметь выборку из  $d = 3, 5, 8$  и  $32$  отсчетов.



Ошибка квантования  $\leq$  половине веса младшего разряда.

**Цифровая обработка сигналов** производится с помощью средств электронной вычислительной техники.

**Цифровая обработка имеет ряд преимуществ по сравнению с аналоговой:**

- Гарантированная точность. Точность определяется только числом задействованных битов в представлении сигналов и характеристик систем.

- Совершенная воспроизводимость. Цифровые записи можно копировать или воспроизводить многократно без ухудшения качества сигнала.

- Большая гибкость. Системы ЦОС можно запрограммировать и перепрограммировать на выполнение различных функций без изменения оборудования. Это важнейшая особенность ЦОС.

- Практически отсутствует зависимость характеристик от температуры и старения.

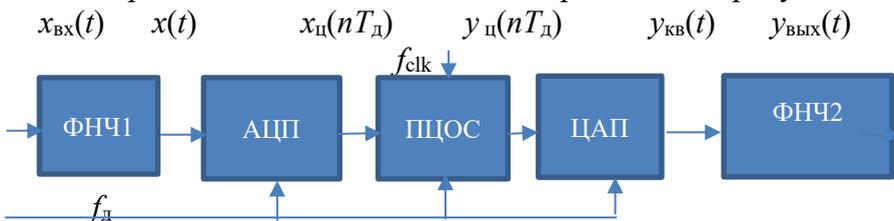
**В ЦОС есть и свои недостатки:**

- Скорость и затраты. Системы ЦОС реального времени (например, РЛС - радиолокационные станции) могут быть дорогими, особенно при большой ширине спектра сигнала. В настоящее время скоростные АЦП/ЦАП (аналого-цифровые/цифро-аналоговые преобразователи) либо слишком дороги, либо не обладают достаточным разрешением для большой ширины спектра обрабатываемого сигнала.

- Проблемы конечной разрядности.

## Общая структура системы цифровой обработки аналоговых сигналов

Обработка аналоговых сигналов является наиболее общей задачей ЦОС. Она включает преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму, их алгоритмическую обработку и при необходимости обратное преобразование цифрового сигнала в аналоговый. Общая структурная схема системы цифровой обработки аналоговых сигналов приведена на рисунке.



Входной аналоговый сигнал  $x_{вх}(t)$  в этой схеме поступает на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) через аналоговый фильтр нижних частот ФНЧ1 с частотой среза  $f_c$ . Фильтр обеспечивает ограничение полосы частот входного сигнала (включая и сопутствующие сигналу шумы и помехи) максимальной частотой  $f_{max} \approx f_c$ , соответствующей используемой в АЦП частоте дискретизации сигнала по времени  $f_d > 2f_{max}$ . Он ослабляет искажения наложения при дискретизации сигналов с неограниченным по частоте спектром.

Аналого-цифровое преобразование включает дискретизацию сигнала по времени, квантование по уровню и цифровое кодирование.

В результате образуется цифровой сигнал  $x_{ц}(nT_d)$  в виде последовательности цифровых двоичных кодов с числом разрядов, соответствующим разрядности АЦП.

Процессором ЦОС (цифровое вычислительное устройство) в соответствии с заданным алгоритмом цифровой обработки (оператором  $\Phi$ ) входной цифровой сигнал  $x_{ц}(nT_d)$

преобразуется в выходной цифровой сигнал системы  $y_{ц}(nT_{д}) = \Phi[x_{ц}(nT_{д})]$ .

Таковая частота ПЦОС  $f_{clk}$  должна быть такой, чтобы время обработки одного отсчета не превышало  $T_{д}$ .

Аналоговый выходной сигнал системы  $y_{вых}(t)$  получается (или восстанавливается) из цифрового сигнала  $y_{ц}(nT_{д})$  с помощью цифро-аналогового преобразователя ЦАП, преобразующего его в квантованный по уровню аналоговый сигнал  $y_{кв}(t)$  ступенчатой формы, и аналогового ФНЧ2, которым ограничивается частотный спектр и подавляются высокочастотные компоненты выходного сигнала. Этот фильтр с частотой среза  $f_c < f_{д}/2$  называют также сглаживающим.



Пример использования цифровой обработки сигналов в аудиосистемах

## Основные направления и задачи ЦОС

### 1. Линейная фильтрация:

- селекция сигнала в частотной области;
- синтез фильтров, согласованных с сигналом;
- частотное разделение каналов;
- реализация преобразователей Гильберта и дифференциаторов;
- коррекция частотных характеристик каналов.

### 2. Спектральный анализ:

- обработка речевых, звуковых, сейсмических, гидроакустических сигналов;
- распознавание образов.

### 3. Частотно-временной анализ:

- компрессия изображений;
- гидро- и радиолокация;
- различные задачи обнаружения.

### 4. Адаптивная фильтрация:

- обработка речи, изображений;
- распознавание образов;
- подавление шумов;
- адаптивные антенные решетки.

### 5. Нелинейная обработка:

- вычисление корреляций;
- синтез АМ-, ФМ- и ЧМ- детекторов;
- обработка речи;
- векторное кодирование.

### 6. Многоскоростная обработка:

- интерполяция (увеличение) и децимация (уменьшение) частоты дискретизации в многоскоростных системах телекоммуникаций и аудиосистемах.

## Сферы применения ЦОС

1. Космос: - оптимизация процесса фотосъёмки из космоса;
  - сжатие данных;
  - интеллектуальный сенсорный анализ с помощью удалённых космических зондов.
2. Медицина: - диагностические изображения (компьютерная томография, МР - томография, ультразвук и т.д.);
  - анализ ЭКГ;
  - хранение и поиск медицинских изображений.
3. Коммерция: - сжатие изображений и звука для мультимедийных презентаций;
  - спецэффекты в кино;
  - видеоконференции.
4. Телефония: - сжатие голоса и данных;
  - эхо-подавление;
  - мультиплексирование сигналов;
  - фильтрация.
5. Военная сфера: - радиолокация;
  - гидролокация;
  - системы наведения;
  - закрытая связь.
6. Промышленность: - разведка нефтяных и минеральных месторождений;
  - мониторинг и управление производственными процессами;
  - неразрушающее тестирование;
  - САПР и средства конструирования.
7. Научные приложения: - регистрация и анализ землетрясений;
  - сбор данных;
  - спектральный анализ;
  - имитация и моделирование.

## Характеристики сигналов в системах цифровой обработки

Назначение	Характеристика	Диапазон частот, размерность	Требуемое быстродействие
Обработка звуковых сигналов	Анализ и синтез речи, сжатие и распознавание	20 кГц (40 кГц), 16 бит	10 MIPS
Обработка изображений	Восстановление и улучшение изображений, сжатие и распознавание	$10^5$ – $10^6$ отсчетов	100-1000 MIPS
Радиолокация	Фильтрация сигналов антенны радара	10 МГц – 10 ГГц, до $2^{14}$ точек	$10^9$ умножений в секунду
Гидролокация	Фильтрация сигналов звукового локатора	2-40 кГц	$10^6$ – $10^8$ умножений в секунду

В системах обработки звука цифровые процессоры обработки сигнала решают задачи анализа, распознавания и синтеза речи, сжатия речи в системах телекоммуникации.

Используются алгоритмы цифровой фильтрации и спектрального анализа (вычисление ДПФ и БПФ), алгоритмы корреляционного анализа, обратной свертки, специальные алгоритмы линейного предсказания. В большинстве случаев удовлетворительные результаты обеспечивает формат данных с фиксированной запятой, длина слова 16 бит, частоты сигналов от 100 Гц до 4 кГц (речь), до 20-40 кГц (в случае обработки музыки), требуемая производительность – до  $10 \times 10^6$  операций в секунду – 10 MIPS по компьютерной терминологии.

Для **систем обработки изображений** типовыми задачами являются улучшение изображений, сжатие информации для передачи и хранения, распознавание образов.

Восстановление и улучшение изображений осуществляется с помощью фильтрации. При восстановлении трехмерной структуры объектов, получаемых методами проникающего излучения в дефектоскопии и медицинской томографии, применяются методы пространственно-частотной фильтрации, БПФ. Другой класс алгоритмов – преобразование контрастности, выделение контуров, статистическая обработка изображений. Для сжатия информации наиболее эффективны ортогональные преобразования Фурье, Адамара и Уолша. Требуемая производительность оценивается величинами 100–1000 MIPS, массивы данных –  $10^5$ – $10^6$  отсчетов.

Наиболее жесткие требования к аппаратной части цифровой обработки предъявляют **радиолокационные системы**. Назначение – поиск и обнаружение объектов в пространстве, определение координат и динамических параметров этих объектов и их классификация. Основным содержанием цифровой обработки здесь является согласованная фильтрация сигналов антенны РЛС, частоты сигналов от 10 МГц до 10 ГГц. Размеры преобразований могут достигать до  $2^{14}$  комплексных точек, требования по быстродействию составляют  $10^9$  умножений в секунду.

При обработке цифровых сигналов радиолокатора используются алгоритмы цифровой фильтрации и спектрального анализа (вычисление дискретного и быстрого преобразования Фурье – ДПФ и БПФ), алгоритмы корреляционного анализа, обратной свертки, специальные алгоритмы линейного предсказания.

Особенностью **систем гидролокации** является низкочастотный диапазон (2–40 кГц) и высокая зашумленность сигналов