

Лекция 1. Сигналы и системы — подробный разбор

Подробный конспект первой лекции: что такое сигнал, как он становится цифровым, какие сигналы нас окружают и как всё это связано со сквозным проектом (КСППР). Материал рассчитан и на подготовку преподавателя, и на самостоятельное чтение.

О чём этот текст и как им пользоваться

- Это **подробный конспект** лекции 1 — вводной и «постановочной».
 - Лекция отвечает на вопросы:
 - что такое сигнал и зачем его обрабатывать;
 - как непрерывный сигнал превращается в числа;
 - какие ограничения при этом возникают;
 - зачем всё это в курсе и в проекте.
 - Формат — списки: так удобнее готовиться и объяснять.
 - Разделы 1–2 — понятия; 3–5 — оцифровка; 6 — примеры вокруг нас; 7–8 — спектр, проект и стенд; 9–16 — задания, шпаргалка, ошибки, вопросы, план.
-

Цели лекции (что должен уметь студент)

1. Понять, что такое **сигнал** и зачем его обрабатывать:
 - сигнал — носитель информации о процессе;
 - обработка — извлечь из него то, что нужно для решения.
2. Различать **аналоговый, дискретный и цифровой** сигналы:
 - аналог — непрерывен по времени и уровню;
 - дискретный — только по времени;
 - цифровой — и по времени, и по уровню.
3. Понять **дискретизацию** и **теорему Котельникова**:
 - почему $f_{\text{д}} > 2 \cdot f_{\text{max}}$;
 - что такое частота Найквиста $f_{\text{д}}/2$.
4. Понять **квантование** и **шум квантования**:
 - почему разрядность важна;
 - откуда правило «6 дБ на бит».
5. Увидеть **реальные сигналы вокруг нас**:
 - радио, видео, GPS, связь — как «живые» примеры задач.
6. Понять **ЦАП и ШИМ** (класс А и класс D):
 - заправка на схемотехнику.
7. Увидеть **контур КСППР** и аппаратный стенд курса:
 - как обработка сигналов встраивается в систему поддержки решений.

Зачем каждый пункт на практике:

- Понимание сигнала — чтобы знать, что и чем измерять.
- Дискретизация — чтобы не потерять и не исказить данные.
- Квантование — чтобы адекватно оценивать точность.
- Примеры — чтобы видеть, что теория живёт в реальных устройствах.
- Стенд и проект — чтобы связать теорию с конкретной инженерией.

1. Что такое сигнал

1.1 Определение

- **Сигнал** — физическая величина, меняющаяся во времени (или в пространстве).
- Примеры:
 - напряжение на микрофоне;
 - вибрация подшипника;
 - ток и напряжение двигателя;
 - электромагнитная волна;
 - яркость строки изображения.
- Ключевое слово — **изменение**: постоянная величина информации не несёт.
- Сигнал несёт информацию о процессе, объекте или среде.

1.2 Сигнал и информация

- Информация «спрятана» в форме сигнала.
- Задача обработки — **извлечь** её:
 - найти частоты (спектр);
 - найти события во времени;
 - оценить параметры (амплитуда, задержка, частота).
- Один и тот же сигнал можно смотреть разными «линзами»:
 - во времени — что происходит «сейчас»;
 - в спектре — из чего он состоит;
 - на спектрограмме — что происходит и когда.

1.3 Где встречаются сигналы

- **Техника**: вибрация машин, электрика, температура, давление.
- **Медицина**: ЭКГ, ЭЭГ, МРТ, УЗИ.
- **Связь**: Wi-Fi, LTE, спутник.
- **Навигация**: GPS/ГЛОНАСС.
- **Быт**: микрофон, камера, датчики телефона.
- **Наука**: сейсмика, астрономия.

1.4 Обработка сигналов как дисциплина

- Опирается на:
 - математический анализ (Фурье, свёртки);
 - линейную алгебру;
 - теорию вероятностей;
 - схемотехнику и программную инженерию.
 - Цель курса — уметь **превращать сигнал в решение**:
 - «данные → обработка → признак → вывод → рекомендация».
-

2. Классификация сигналов

2.1 По времени и уровню

- **Аналоговый** — непрерывен и по времени, и по величине.
- **Дискретный** — определён в отдельные моменты времени (по времени — дискретный, по уровню — непрерывный).
- **Цифровой** — дискретный и по времени, и по уровню (квантованный).
- Переход аналог → цифра = **дискретизация + квантование + кодирование**.
- Кодирование — представление отсчётов битами (для хранения и передачи).

2.2 Детерминированный и случайный

- **Детерминированный** — можно предсказать (синус, меандр).
- **Случайный** — описывается статистикой (шум, помехи, вибрация).
- Большинство реальных сигналов — смесь полезной компоненты и шума.
- Поэтому в курсе нужны статистические методы (лекции 10–12).

2.3 Стационарный и нестационарный

- **Стационарный** — свойства не меняются во времени.
- **Нестационарный** — меняются (речь, разгон двигателя, всплески).
- Для стационарных хорош обычный спектр; для нестационарных — спектрограмма.

2.4 Одномерный и многомерный

- **Одномерный** — один канал (один микрофон).
- **Многомерный** — массив (микрофонная решётка, изображение).
- Многомерная обработка — лекция 13 (beamforming, PCA/ICA).

2.5 Сводная таблица

Признак	Варианты	Что даёт
Время	аналоговый / дискретный	способ хранения
Уровень	непрерывный / квантованный	точность
Предсказуемость	детерминированный / случайный	метод анализа
Время-статистика	стационарный / нестационарный	спектр или спектрограмма
Размерность	1D / многомерный	постановка задачи

3. Дискретизация

3.1 Идея

- Берём значения сигнала через равные промежутки времени.
- Частота дискретизации $f_{\text{д}}$ — сколько отсчётов в секунду.

- Шаг: $T_{\text{д}} = 1/f_{\text{д}}$.
- Пример: аудио $f_{\text{д}} = 48000$ Гц, шаг ≈ 20.8 мкс.

3.2 Теорема Котельникова (Найквиста)

- Если $f_{\text{д}} > 2 \cdot f_{\text{мах}}$, сигнал можно **точно** восстановить.
- Граница $f_{\text{д}}/2$ — **частота Найквиста**.
- Интуиция: чтобы описать синусоиду, нужно минимум два отсчёта на период.
- Меньше двух — форма «угадывается» неверно.

3.3 Алиасинг

- Частоты выше $f_{\text{д}}/2$ «заворачиваются» и притворяются низкими.
- Пример: колесо машины в кино «крутится назад».
- Пример: высокий тон «превращается» в низкий.
- Алиасинг **необратим** — исправить потом нельзя.
- Лечение: **антиалиасинговый фильтр до дискретизации**.

3.4 Антиалиасинговый фильтр

- Аналоговый фильтр нижних частот перед АЦП.
- Срезает всё выше $f_{\text{д}}/2$.
- Проектируется так, чтобы в полосе пропускания не исказить сигнал.
- Реальный фильтр не идеален: есть переходная полоса.

3.5 Числовой пример

- Нужно ловить вибрацию до 2 кГц $\rightarrow$ берём $f_{\text{д}} = 5000$ Гц (с запасом).
 - Тогда Найквист = 2500 Гц, частоты до 2 кГц надёжно восстановимы.
 - Если ошибиться и взять $f_{\text{д}} = 3000$ Гц, всё выше 1500 Гц «завернётся».
-

4. Квантование

4.1 Идея

- Значения сигнала округляются до ближайшего разрешённого уровня.
- Число уровней 2^b , где b — разрядность АЦП.
- 12 бит $\rightarrow$ 4096 уровней; 16 бит $\rightarrow$ 65536.
- Чем больше уровней, тем мельче шаг и меньше ошибка.

4.2 Шум квантования

- Ошибка округления ведёт себя как шум.
- Равномерно распределён, похож на белый шум.
- Чем больше разрядов, тем меньше уровень шума.

4.3 Правило «6 дБ на бит»

- Каждый дополнительный бит удваивает число уровней.
- ОСШ улучшается примерно на **6 дБ** на бит.
- 8 бит — около 48 дБ; 12 бит — около 72 дБ.
- Отсюда оценка требуемой разрядности под задачу.

4.4 Передискретизация и усреднение

- Если дискретизировать чаще и усреднять, шум падает.
- Выигрыш ≈ 3 дБ на каждое удвоение частоты (для белого шума).
- Так дешёвые дельта-сигма АЦП дают высокую точность.

4.5 Разрядность на стенде

- ESP32-C3: АЦП 12 бит.
 - Это компромисс цены, скорости и точности.
 - Поэтому важны фильтрация и усреднение.
-

5. ЦАП и ШИМ

5.1 ЦАП

- **ЦАП** превращает числа обратно в напряжение/ток.
- Используется для звука, управления, возбуждения сигналов.
- Архитектуры: резисторные матрицы, токовые, дельта-сигма.

5.2 Класс А (линейный усилитель)

- Усилительный элемент работает в линейном режиме.
- Достоинства: простота, малые искажения.
- Недостатки: низкий КПД, нагрев.

5.3 Класс D и ШИМ

- Транзистор либо полностью открыт, либо закрыт (ключевой режим).
- **ШИМ** (широтно-импульсная модуляция) задаёт среднее значение.
- Экономично, КПД высокий.
- Требуется фильтрация, чтобы убрать высокочастотные составляющие.

5.4 Мостик к схемотехнике

- Класс D — стандарт для усилителей звука, драйверов моторов.
 - ШИМ — это тоже «представление сигнала»: длительностью импульсов.
 - Связь с оцифровкой: обе техники работают с временными интервалами.
-

6. Сигналы вокруг нас (примеры)

6.1 Стереосигнал (FM MPX)

- В одном радиоканале передаются $L+R$ и $L-R$.
- **Пилот** 19 кГц — для синхронизации декодера.
- $L-R$ подаётся на поднесущей **38 кГц**.
- Декодер выделяет разностный сигнал и собирает стереосигнал.
- Урок: в одном сигнале уживаются несколько «слоёв».

6.2 Композитный видеосигнал (PAL/SECAM)

- Яркость — уровнем сигнала.
- Синхроимпульсы — для развёртки.
- Цветность — на поднесущей **4.43 МГц**.
- Чересстрочная развёртка для экономии полосы.
- Урок: синхронизация — обязательная часть любого формата.

6.3 ЭЛТ (электронно-лучевая трубка)

- Три пучка **R/G/B**, отклоняющая система, маска.
- Строка рисуется построчно, растр — за кадр.
- **Линия задержки 64 мкс** — согласование по времени.
- Урок: сигнал управляет физикой, а не только «хранится».

6.4 Цифровая связь

- **QPSK + OFDM** — Wi-Fi, LTE, DVB.
- Много поднесущих, квадратурная модуляция.
- Затравка на лекцию 5 (модуляция, I/Q).

6.5 Чирп и GPS

- Сигнал GPS — широкополосный код (похожий на чирп).
- Принимается **согласованным фильтром**.
- Задержка даёт дальность.
- Затравка на лекцию 6 (корреляция и согласованная фильтрация).

6.6 Чему учат примеры

- Сигналы реальны и разнообразны.
- Везде есть «полезное + помехи + синхронизация».
- Обработка начинается с понимания формата сигнала.

7. Время и спектр

7.1 Два взгляда на сигнал

- **Во времени** — как меняется величина.

- **В спектре** — из каких частот состоит.
- Оба представления эквивалентны и дополняют друг друга.

7.2 Спектр

- Спектр — «радуга» сигнала (разложение на синусоиды).
- Показывает амплитуды и фазы компонент.
- Позволяет увидеть то, что не видно глазом.

7.3 Спектрограмма

- Одновременно время и частота.
- Нужна, когда сигнал **меняется** во времени.
- Наглядно показывает события и дрейф частот.

7.4 Пример вибрации

- Во времени — «шумная кривая».
 - В спектре — чёткие линии (50 Гц, дефект 120 Гц).
 - Так сигнал превращается в **числа для решения**.
-

8. Контур КСППР и аппаратный стенд

8.1 Что такое КСППР

- КСППР — когнитивная система поддержки принятия решений.
- Логика:
 - данные → обработка → оценка состояния → прогноз → рекомендация → ЛПР.
- Обработка сигналов — **входной тракт** этой системы.
- Цель — **усилить человека**, а не заменить (Human-in-the-Loop).

8.2 Слои стенда

- **ESP32-C3** — узел сбора и телеметрии (АЦП 12 бит, I2S, Wi-Fi).
- **I2S-микрофон** — звук.
- **LiDAR** — дальность/угол («где»).
- **RFID 800 МГц** — идентификация, RSSI и фаза («кто»).
- **ПК с GPU** — тяжёлая обработка, ML, визуализация.

8.3 Слияние сенсоров

- RFID отвечает «кто», LiDAR — «где».
- Вместе — мониторинг зоны.
- Слияние данных — отдельная тема (фильтр Калмана, лекция 12).

8.4 Пример преподавателя: «умный микрофон»

- Живой образец:
 - контроль отношения сигнал/шум (ОСШ);
 - детекция пауз (VAD);
 - разметка и авто-пауза записи.
 - Показывается как пример, а не как задание студентам.
-

9. Задание №1 (для своего проекта)

1. Определить, какой **сигнал** в вашем проекте (что и чем измеряется).
2. Описать путь: датчик → усиление → АЦП → обработка.
3. Определить **частоты** и выбрать $f_{\text{д}}$.
4. Оценить **разрядность** и требуемый динамический диапазон.
5. Набросать, какие **признаки** нужны для решения.
6. Указать, что мешает (шум, помехи, ограничения железа).

Сдавать: короткое описание (1–2 страницы) + схема тракта.

10. Практические рецепты

- **Звук:** $f_{\text{д}}$ 16–48 кГц, разрядность 16 бит и выше.
 - **Вибрация:** $f_{\text{д}}$ 1–10 кГц, 12–16 бит, антиалиасинговый фильтр.
 - **Питающая сеть:** синхронизация с 50 Гц, точная частота дискретизации.
 - **Радио/RFID:** полоса и частота по стандарту, I/Q-представление.
 - **Общее правило:** сначала понять сигнал, потом выбирать параметры.
-

11. Шпаргалка (словарь)

Термин	Что означает
Сигнал	величина, меняющаяся во времени
Аналоговый	непрерывный по времени и уровню
Дискретный	определён в отдельные моменты
Цифровой	дискретный и квантованный
Дискретизация	взятие отсчётов через $T_{\text{д}}$
$f_{\text{д}}$	частота дискретизации
Найквист	$f_{\text{д}}/2$
Алиасинг	наложение частот выше $f_{\text{д}}/2$
Квантование	округление до уровней
Шум квантования	ошибка округления
ОСШ / SNR	отношение сигнал/шум
ЦАП	числа → напряжение
ШИМ	кодирование длительностью импульсов
КСППР	система поддержки решений

12. Частые ошибки и заблуждения

- «Чем больше $f_{\text{д}}$, тем всегда лучше».
 - Растёт объём данных; разрешение определяется временем, а не $f_{\text{д}}$.
 - «Алиасинг можно убрать цифровым фильтром».
 - Нет, он необратим: нужен фильтр **до** АЦП.
 - «Квантование не важно».
 - Именно оно ограничивает точность измерений.
 - «Дискретный = цифровой».
 - Дискретный может быть непрерывным по уровню.
 - «Сигнал — это просто числа».
 - Числа — следствие оцифровки; за ними стоит физика.
 - «Спектр — красивая картинка».
 - Спектр — измерение, ведущее к решению.
-

13. Вопросы и развёрнутые ответы

1. **Чем дискретный сигнал отличается от цифрового?** Дискретный определён только в отдельные моменты времени, а цифровой ещё и квантован по уровню.
 2. **Сформулируйте теорему Котельникова.** Если $f_{\text{д}} > 2 \cdot f_{\text{мах}}$, сигнал можно точно восстановить по отсчётам.
 3. **Что такое алиасинг и как с ним бороться?** Наложение частот выше $f_{\text{д}}/2$; борьба — антиалиасинговый фильтр до АЦП.
 4. **Как разрядность влияет на ОСШ?** Каждый бит добавляет около 6 дБ к отношению сигнал/шум.
 5. **Чем класс А отличается от класса D?** Класс А — линейный режим (просто, но греется); класс D — ключевой (экономичен).
 6. **Зачем нужен пилот 19 кГц?** Для синхронизации декодера стерео FM.
 7. **Что даёт согласованный фильтр в GPS?** Максимальный отклик на известный код; по задержке — дальность.
 8. **Зачем нужна спектрограмма?** Чтобы видеть, как меняется частотный состав во времени.
 9. **Что такое КСППР?** Система, которая поддерживает решение человека: оценка, прогноз, рекомендация.
 10. **Какие сенсоры входят в стенд?** ESP32-C3, I2S-микрофон, LiDAR, RFID 800 МГц, ПК с GPU.
-

14. План рассказа на 2 академических часа

1. **10 мин.** Что такое сигнал; зачем обрабатывать; примеры.
2. **15 мин.** Классификация; аналог/дискрет/цифра.
3. **20 мин.** Дискретизация, Котельников, алиасинг, числовые примеры.
4. **15 мин.** Квантование, 6 дБ на бит, разрядность стенда.
5. **15 мин.** ЦАП, класс A/D, ШИМ.
6. **20 мин.** Сигналы вокруг нас (FM, видео, ЭЛТ, QPSK/OFDM, GPS).
7. **15 мин.** Контур КСППР, стенд, «умный микрофон», задание №1.

- **Приём:** каждый раздел заканчивать вопросом «а где это в жизни?».
 - Тогда теория запоминается как инструмент, а не как абстракция.
-

15. Итог

- Сигнал — физическая величина, несущая информацию.
 - Цифровая обработка начинается с дискретизации и квантования.
 - Котельников и Найквист задают границы, алиасинг — что бывает при нарушении.
 - Сигналы вокруг нас — готовые примеры реальных задач.
 - Всё это служит сквозному проекту (КСППР) и аппаратному стенду.
-

16. Что дальше

- **Лекция 2:** гармонический анализ — из чего «собран» сигнал.
- **Лекция 3:** ДПФ — как считать спектр.
- **Лекция 4:** БПФ, окна, разрешение, усреднение — практический спектральный анализ.