

Обработка сигналов

Лекция 1. Введение: сигналы, системы и место ЦОС в КСППР

Прикладная математика и информатика

4 курс · 01.03.02 · ИИ и системная аналитика

О курсе и сквозном проекте

- Курс — как из сырых данных датчиков получить решение для человека.
- Сквозной проект: **у каждого свой** (12 кейсов или своя тема).
- Пример преподавателя — «**умный микрофон**» (подготовка лекций).
 - цель примера — **лекция без этапа вёрстки**.
- КСППР: человек (ЛПР) в контуре, ИИ усиливает, а не заменяет.
- стек: Python (NumPy/SciPy), далее ML/LLM.
- Железо: ESP32-C3, LiDAR, RFID, микрофон; локальный GPU.
- Принцип: **сначала решаем сами, потом автоматизируем**.

Цели лекции 1

- 1 Различать аналоговый, дискретный и цифровой сигналы.
- 2 Смотреть на сигнал во времени и в частотной области.
- 3 Понимать теорему Котельникова и явление алиасинга.
- 4 Понимать квантование, шум и отношение сигнал/шум (ОСШ).
- 5 Увидеть роль обработки сигналов в контуре КСППР.
- 6 Начать сквозной проект: задание №1.

Что такое сигнал

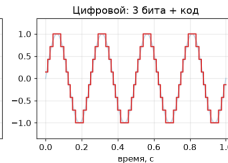
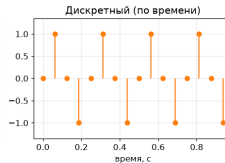
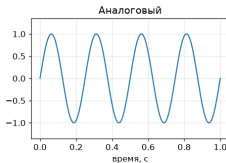
- **Сигнал** — величина, меняющаяся во времени и несущая информацию.
- Нас интересует не кривая, а то, что за ней стоит: дефект, событие, команда, состояние.
- Примеры: вибрация насоса, речь оператора, ток сети, отражённая радиоволна (RFID/LiDAR), ЭКГ.
- Обработка сигналов — мост от измерений к смыслу.

Тезис

Чем больше помех, тем важнее правильная обработка сигнала.

Три типа сигналов

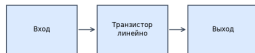
- Аналоговый: значение в любой момент.
- Дискретный: отсчёты через равные интервалы.
- Цифровой: квантование по уровню + кодирование.



ЦАП и ШИМ: класс А и класс D

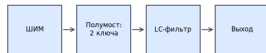
- Класс А: транзистор линейно, как резистор.
 - потери, КПД $\approx 25\%$, греется.
- Класс D (ШИМ): полевые транзисторы-ключи.
 - либо закрыт, либо открыт: потери малы, КПД $> 90\%$.
- ШИМ + LC-фильтр восстанавливают аналог.
- Инженерно выгоден ключевой режим.

Класс А (ЦАП): линейный режим



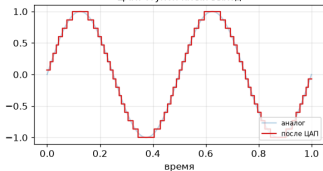
транзистор приоткрыт как резистор $\rightarrow$ потери, КПД $\sim 25\%$, греется

Класс D (ШИМ): ключевой режим

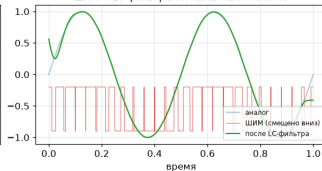


ключ либо закрыт, либо открыт $\rightarrow$ малые потери, КПД $> 90\%$

ЦАП: ступенчатый выход



ШИМ + LC-фильтр восстанавливает аналог



АЦП: как рождается цифровой сигнал

- Цепочка: датчик $\rightarrow$ дискретизация $\rightarrow$ квантование $\rightarrow$ код.
- Дискретизация — «когда» измеряем (частота отсчётов f_d).
- Квантование — «насколько точно» измеряем (биты).
- АЦП/ЦАП переводят аналог в цифру и обратно.

Важно

Ошибки этого этапа потом не исправить.

Сигналы вокруг нас: шесть «суперсил»

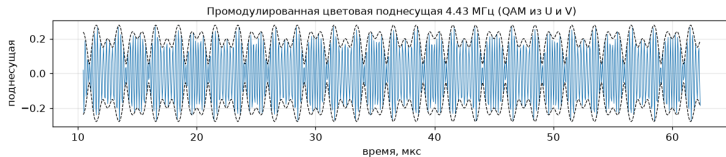
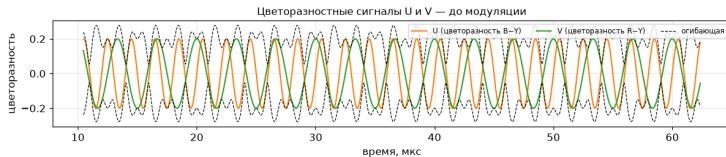
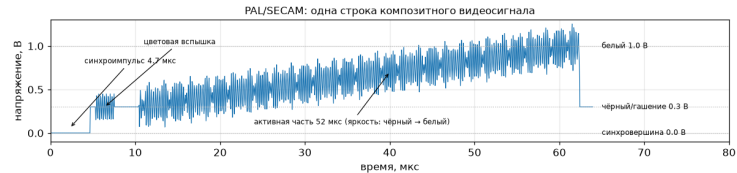
- Радио и ТВ — умение упаковать и разделить каналы.
- Stereo УКВ: $L+R$, пилот 19 кГц, $L-R$ на 38 кГц.
- PAL/SECAM: яркость уровнем, цвет — поднесущей 4.43 МГц.
- Линия задержки 64 мкс: память гасит ошибку фазы.
- Цифровая связь: QPSK (фаза) и OFDM (много поднесущих).
- Радар/GPS/RFID: достать слабый сигнал из шума.
- Один аппарат — стерео, ТВ, Wi-Fi, GPS, радар, RFID.

Сtereo УКВ: три полосы в одном канале

- $L+R$ — сумма каналов, внизу спектра.
- Пилот 19 кГц — опора для фазы.
- $L-R$ — двойная боковая на 38 кГц.
- Спектр показывает «упаковку».

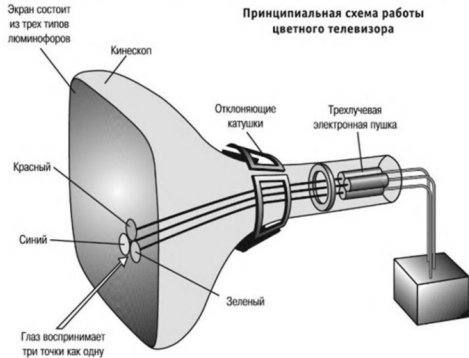


PAL/SECAM: яркость, синхроимпульсы, цвет

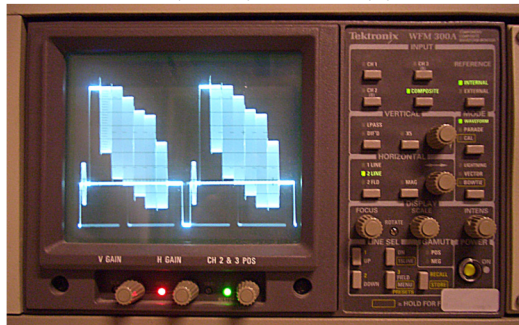


Кинескоп и монитор сигнала

Кинескоп: трёхлучевая пушка, отклонение и люминофор RGB



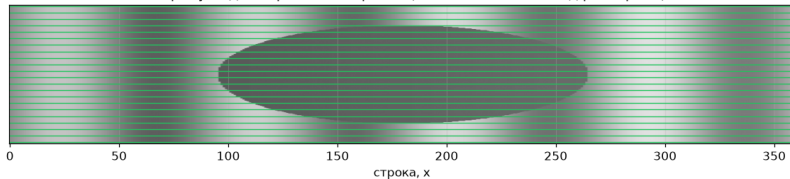
Монитор сигнала (реальный осциллограф)



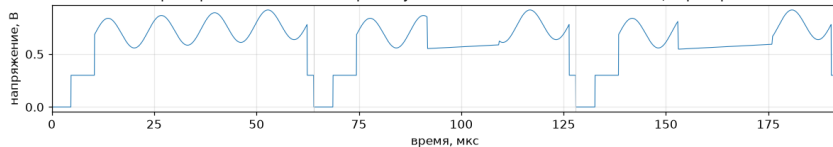
Слева — схема кинескопа («Ремонт ТВ своими руками»); справа — фото Wikimedia Commons, grm_wnr, CC BY-SA 3.0.

Скан-линии и растр

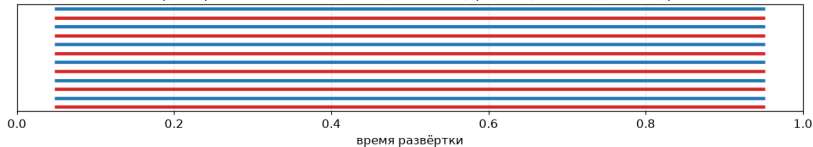
Растр: луч идёт строкой за строкой (зелёные линии — ход развертки)



Три строки в сигнале: синхроимпульс + активная часть = «лестница» растра

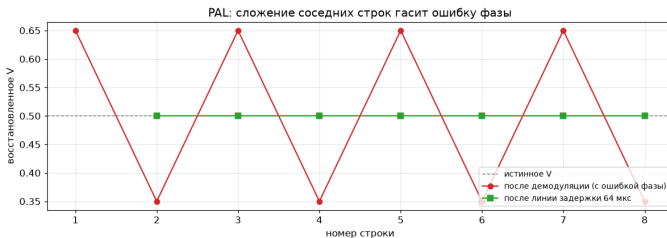


Чересстрочность: поле 1 (синие) и поле 2 (красные) вместе дают кадр



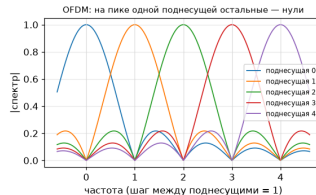
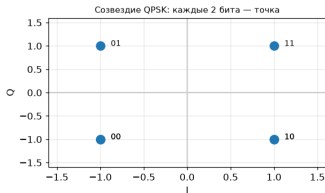
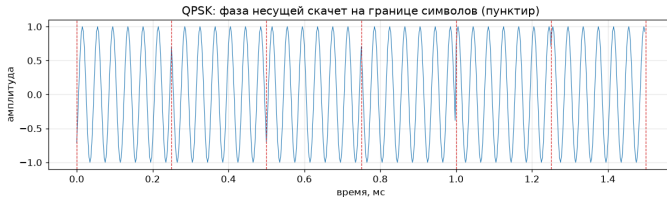
Линия задержки PAL: память гасит ошибку

- Ошибка фазы даёт одинаковую добавку.
- V передают с инверсией через строку.
- Линия задержки 64 мкс складывает строки.
- Ошибка вычитается — фильтр с памятью.



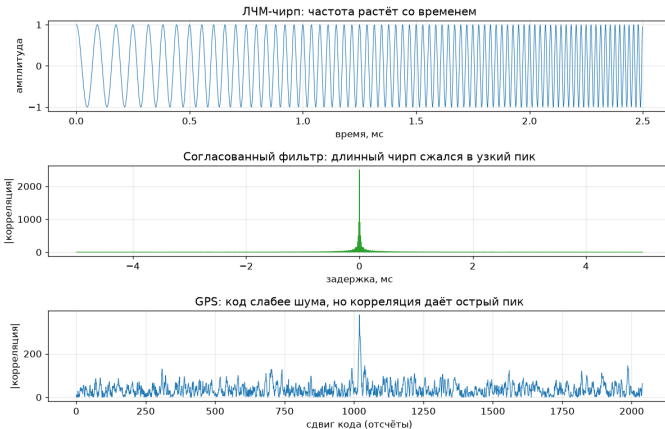
Цифровая связь: QPSK и OFDM

- QPSK: каждые 2 бита — точка I/Q.
- Фаза скачет на границе символа.
- OFDM: много ортогональных поднесущих.
- Так работают Wi-Fi и LTE.



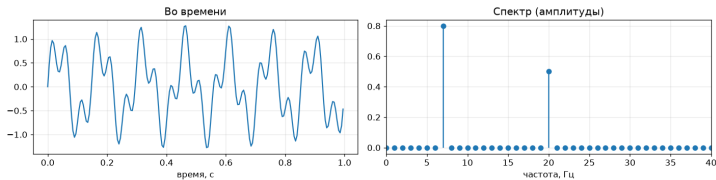
Достать слабый сигнал: чирп и GPS

- Чирп: частота растёт линейно.
- Согласованный фильтр сжимает его в пик.
- GPS: код тонет в шуме.
- Корреляция даёт пик → дальность.



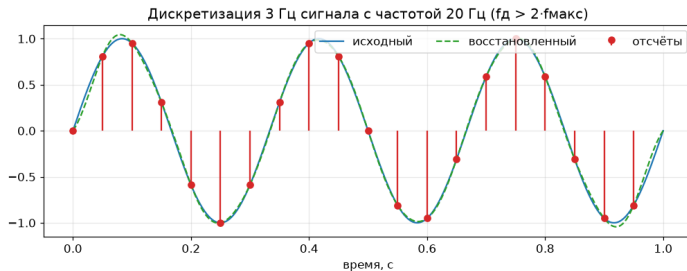
Во времени и по частоте

- Время: как меняется значение.
- Частота: какие колебания спрятаны.
- Спектр — «рентген» сигнала.
- Так находят дефекты, помехи, ритмы.



Дискретизация и теорема Котельникова

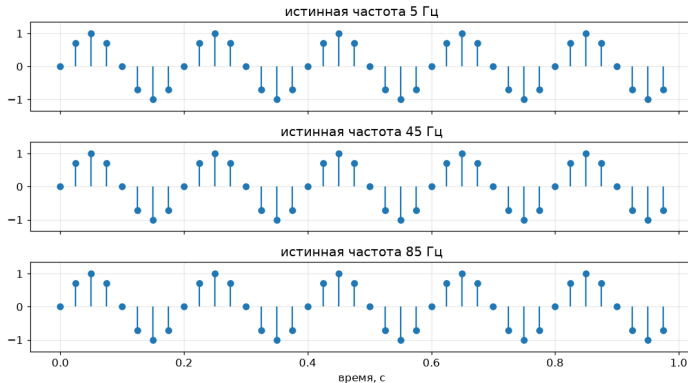
- f_d — сколько отсчётов в секунду.
- Теорема: $f_d \geq 2f_{\text{макс}}$.
- При выполнении — точное восстановление.
- Нарушение условия $\rightarrow$ алиасинг.



Алиасинг: размывание частоты

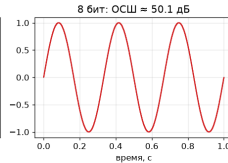
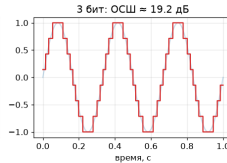
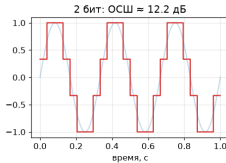
- Слишком редкие отсчёты «путают» частоты.
- Разные сигналы становятся неразличимыми.
- Ошибка необратима после АЦП.
- Частоту дискретизации выбирают заранее.

Алиасинг: при $f_d = 40$ Гц все три сигнала дают одинаковые отсчёты



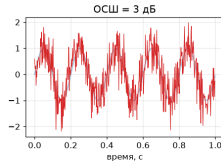
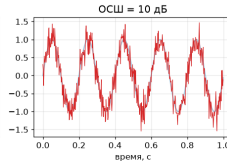
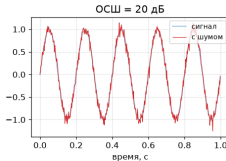
Квантование и разрядность

- Значение хранится с ограниченной точностью.
- Мало бит — грубые «ступеньки» и ошибка.
- Каждый бит $\approx +6$ дБ качества.
- ОСШ показывает, насколько сигнал чище шума.



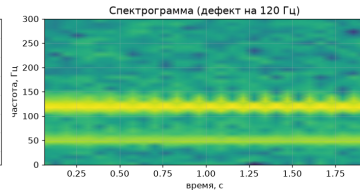
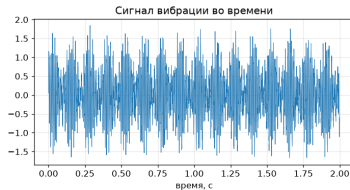
Шум и отношение сигнал/шум

- Реальные измерения всегда зашумлены.
- ОСШ измеряется в децибелах (дБ).
- Низкое ОСШ — решение принимать труднее.
- Правильная обработка повышает «читаемость».



Пример: вибрация механизма

- База 50 Гц + дефект 120 Гц + шум.
- Во времени дефект почти не виден.
- На спектрограмме — устойчивая полоса.
- Так рождается вывод для ЛПР.



Пример преподавателя: «умный микрофон»

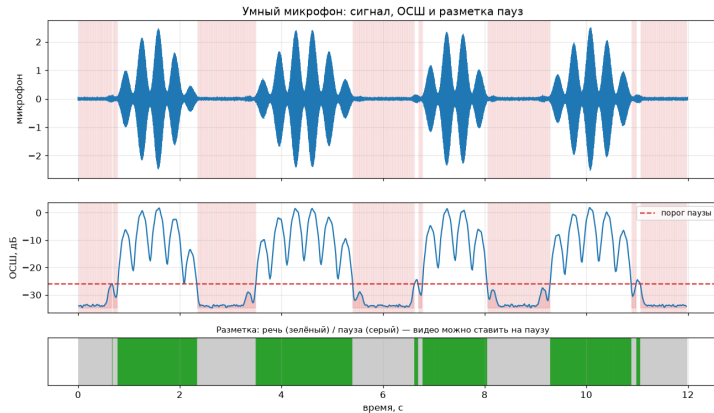
- Мой проект — система подготовки лекций; показываю как пример.
- Идеальный результат — **готовая лекция без этапа вёрстки**.
- Слушает микрофон и следит за ОСШ в реальном времени.
- Различает речь и паузы (детектор активности голоса, VAD).
- Размечает видеоряд по событиям: речь / пауза / тема.
- Транскрипт, главы, субтитры, конспект — автоматически.

Итог

Ваши проекты строятся по тому же образцу.

Демо: ОСШ, паузы, разметка

- Считаем RMS и ОСШ по кадрам.
- Порог отделяет речь от пауз.
- Таймлайн управляет записью видео.
- JSON-разметка — задел для монтажа.



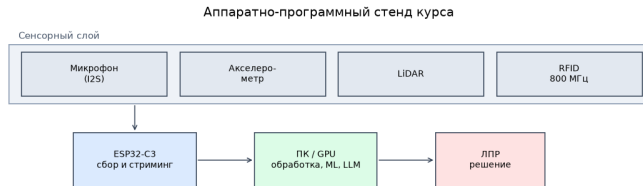
От сигнала к решению: КСППР

- Обработка сигнала — входной тракт.
- На входе — сырые и зашумлённые данные.
- На выходе — достоверные числа.
- Человек принимает решение (Human-in-the-Loop).
- Это КСППР: усиление человека, не автоматизация.



Аппаратный стенд курса

- ESP32-C3: АЦП, I2S, Wi-Fi.
- LiDAR: дальность и сканы.
- RFID 800 МГц: RSSI и фаза.
- Локальный GPU: ML и LLM.



Инструменты курса

- Python: NumPy, SciPy, Matplotlib.
- Далее: scikit-learn, PyTorch — ML на сигналах.
- Локальные LLM (Ollama) — ассистент и RAG по учебникам.
- ИИ помогает, но результат проверяет человек.
- Всё воспроизводимо и работает офлайн.

Пример (микрофон) по этапам курса

- Лекция 1: ОСШ, разметка пауз.
- Лекции 3–5: спектр, ДПФ/БПФ, окна.
- Лекции 6–10: фильтрация, синтез фильтров.
- Лекция 11: спектральное оценивание, VAD.
- Лекция 12: фильтр Калмана — сглаживание ОСШ.
- Лекция 13: ML/LLM — транскрипт, главы, конспект.

Финал

Лекция, готовая к публикации без вёрстки.

Задание №1 (ваш проект)

- 1 Зафиксировать тему и сигнал вашего проекта.
- 2 Получить 10–20 с сигнала (синтетика или датчик/ESP32-C3).
- 3 Сигнал во времени + спектр; оценить ОСШ по кадрам.
- 4 Выделить признак/разметку (для аудио — речь/пауза) в JSON.
- 5 (Опционально) реальный сигнал через ESP32-C3.

Сдача

Ноутбук с графиками + 1 слайд-вывод. Пример — «умный микрофон» (раздел 10).

12 кейсов партнёров: 1–4

- ❶ Предиктивная диагностика насосного агрегата (металлургия).
- ❷ Акустический контроль сварных швов (машиностроение).
- ❸ Мониторинг ЛЭП по частичным разрядам (энергетика).
- ❹ Инвентаризация склада: RFID + LiDAR (логистика).

вибрация/ток · акустика · ВЧ/УЗ · RSSI+фаза, LiDAR

Кейсы партнёров: 5–8

- 5 Контроль запретных зон: RFID + LiDAR (безопасность).
- 6 Сейсмоакустический мониторинг выработок (горное дело).
- 7 Диагностика тяговых двигателей (транспорт).
- 8 Речевой интерфейс оператора HMI (автоматизация).

трекинг · геофоны · гармоники · шумоподавление речи

Кейсы партнёров: 9–12

- 9 Экологический мониторинг шума города (урбанистика).
- 10 Биомедицина: ЭКГ/ФКГ (медтехника).
- 11 Бортовая диагностика БПЛА (беспилотники).
- 12 Качество электроэнергии, THD (энергетика).

карты шума · QRS · Калман/IMU · гармоники

Как выбрать и оформить

- Свой проект: один из 12 кейсов или своя тема.
- «Умный микрофон» — пример преподавателя, не задание.
- Данные: сначала синтетика, затем реальные измерения на стенде.
- Оформление: ноутбук + результаты по неделям.
- Критерии: корректность, обоснованность, понятность для ЛПР, воспроизводимость.
- Финальная защита — в конце семестра.

Итоги и литература

- 1 Сигнал описывают во времени и по частоте.
- 2 $f_d \geq 2f_{\text{макс}}$, иначе — алиасинг.
- 3 Квантование и шум ограничивают точность; ОСШ — мера качества.
- 4 Обработка сигналов — входной тракт КСППР.
- 5 Начали сквозной проект: «умный микрофон».

Литература

Оппенгейм, Шафер; Сергиенко; Солонина; Умняшкин.