

Прорывная система мюонной томографии для неразрушающего сканирования крупных объектов

1. Понятное объяснение — что это и как работает

MuoVis — это прибор, который «просвечивает» большие объекты без разрушения, используя естественное космическое излучение.

Что именно используется?

Из космоса на Землю постоянно падают частицы — **мюоны**.

Мюон — это элементарная частица, похожая на электрон, но в ~200 раз тяжелее. Благодаря большой энергии (1–10 ГэВ) мюоны проходят сквозь:

- горные породы
- бетон
- металл
- здания
- контейнеры

Именно это свойство используется для сканирования.

Откуда → куда идёт сигнал

1. Космос → Земля

Мюоны рождаются при взаимодействии космических лучей с атмосферой.

2. Объект → Детектор

Мюоны проходят через исследуемый объект.

Если внутри есть пустота или плотный материал — траектория немного меняется.

3. Детектор → Электроника

Сцинтилляторы фиксируют вспышку света.

Silicon Photomultiplier регистрируют фотоны.

FPGA и TDC измеряют время и координаты.

4. Электроника → Обработка данных

Алгоритмы реконструируют траектории и строят 3D-карту плотностей.

5. Обработка → Пользователь

Система показывает:

- скрытые пустоты
- плотные включения
- потенциально опасные зоны
- аномалии структуры

2. Что в итоге делает система?

MuoVis позволяет:

- обнаруживать скрытые камеры в археологических объектах
- находить пустоты в шахтах
- проверять контейнеры на наличие плотных материалов
- анализировать состояние мостов и туннелей
- работать в труднодоступных зонах с помощью дронов

Мюонный томограф

Проблема

Исследования археологических памятников, геологических объектов, инфраструктуры, ядерной безопасности и промышленности сталкиваются с барьерами:

- Неразрушающий подход: нельзя бурить/разрушать в курганах, пирамидах, ядерных контейнерах или мостах — риски повреждения/заражения.
- Ограниченный доступ: объекты в горах, под землёй, тропиках или опасных зонах (рудники, реакторы), без тяжёлой техники.
- Недостатки традиционных методов: радары (GPR) слабы в плотных породах; рентген/КТ не для больших масштабов; детекторы уязвимы в экстремальных условиях.
- Высокая стоимость/сложность: существующие мюонные системы (e.g., от KEK или Ideon) громоздкие, дорогие (10k+ USD) и не универсальны для реал-тайм мониторинга в security/mining.
- Отсутствие динамики: аналоги статичны, без AI-предикций или мобильной (drone) интеграции.

Решение: MuoVis — Прорывной универсальный мюонный томограф для археологии, геологии, ядерной безопасности и промышленности

Система фиксирует космические мюоны в модульных Micromegas/RPC-стеках, синхронизирует время, реконструирует треки и строит 3D-карту плотностей/аномалий.

Прорывные улучшения:

- Гибрид с GPR/LiDAR/SAR для fusion данных; MST для nuclear detection.
- Реал-тайм AI (U-Net/GANs) с предиктивной аналитикой (e.g., "риск обвала").
- Drone/робот интеграция для динамического сканирования.
- Open-source с crowdsourcing данных для глобальной сети.
- Улучшения: двойной readout, FPGA-коинциденции + TDC, LoRa-модуль с SD-буфером, атомные часы/IRIG-B, IP67-корпус, LED self-test, Cherenkov-оптика для энергии.

Архитектура (слои)

- Детекторный модуль (хит): Micromegas/RPC-панель (16×16 см) → газовая смесь → readout-электроды/Cherenkov → TIA → дискриминатор → TDC → FPGA (коинциденция/MST) → MCU → LoRa/SD.
- Синхронизация: Атомные часы + IRIG-B (indoor/outdoor), GPS/INS для drone.
- Сбор данных: FPGA/MCU пакуют события → шлюз RPi Zero пишет в SQLite → облако для crowdsourcing.
- Реконструкция: Реал-тайм backprojection → SIRT/Kalman → AI-денойзинг/предикция (U-Net/GANs на реальных+синтетике).
- Мобильность: Drone-mount (UAV с RPC) или crawling роботы для динамики.
- Механика/энергия: Модульные кассеты IP67, drone-адаптеры, LiFePO4 50 Ah + солнечные/MPPT, DC-DC (12→5V), HV для Micromegas.

Детали блока (развёрнуто)

А) Детектор мюонов (панель)

- Чувствительный элемент: Micromegas для сверхточности ($<1^\circ$) + RPC fallback для портативности; газовая смесь + Cherenkov-оптика для энергии мюонов. Двойной readout для позиций/MST (отклонение для nuclear materials).
- Читout: Электроды $\rightarrow$ TIA $\rightarrow$ дискриминатор $\rightarrow$ ToT для энергии.
- Температурная компенсация: Термодатчик + DAC.
- Self-test: LED-инжектор.
- Питание: Локальный 12 $\rightarrow$ HV boost, мониторинг.

В) Мини-стек / геометрия и TDC

- Мини-стек: 2–3 слоя Micromegas/RPC, базлайн 50 см для $\leq 1^\circ$ разрешения.
- Коинциденция: FPGA iCE40 с MST-алгоритмами.
- TDC: TDC7200 (1 нс).
- Формат: {ts, id, hit_mask, pos, ToT, energy, deviation}.

С) Сбор данных и связь

- MCU/шлюз: RP2040 + RPi Zero.
- Формат: Protobuf + CRC, blockchain для security данных.
- Транспорт: LoRa для поля (5–10 км), Zigbee fallback, SD-буфер; API для crowdsourcing.
- Сеть: Оффлайн/онлайн, batch в облако (AWS/GCP).

Д) Реконструкция и томография

- Pipeline: Реал-тайм backprojection $\rightarrow$ SIRT/Kalman $\rightarrow$ AI (U-Net/GANs) для денойзинга/предикций (e.g., риск обвала).
- Параметры: Адаптивные воксели 0.5–5 см.
- Fusion: GPR/LiDAR/SAR + MST для hybrid (улучшение 50–70%).
- UI: Unity AR (интерактив 3D, AR-оверлей, предиктивные алерты на tablet).

Е) Питание и термо

- Энергопак: LiFePO₄ 50 Ah, 24–48 ч, солнечные с MPPT; drone-батареи для UAV.
- DC-DC: 12 $\rightarrow$ 5V, фильтры.
- Мониторинг: PMIC + прогноз.
- Тепло: Пассивные радиаторы.

Механика и развертывание

- Кассета: Алюминий 20×20×5 см, IP67, вес <5 кг; drone-mount адаптеры (DJI-совместимые).
- Рама: Складные штативы + робот-шасси для crawling.
- Размещение: 4–8 стеков, динамичное с дронами/роботами; borehole-опция для mining.

Синхронизация / калибровка

- Режим: Атомные часы/IRIG-B + GPS/INS для drone.
- Автокалибровка: LED + муоны (5–10 мин).
- Авто-порог: <50 Hz/канал.
- Юстировка: Software + hybrid данные.

Прогноз потока и съёмки

- Площадь: ~256 см² → ~500–1000 треков/мин (улучшено Micromegas).
- Совпадения: 100–200 событий/мин/стек.
- Демо: Пустота/аномалия за минуты; реал — реал-тайм мониторинг.

ПО и алгоритмы

- Firmware: Verilog для FPGA, C++ для MCU; edge-AI на RPi.
- Протокол: Protobuf, retransmit; API для crowdsourcing.
- Сервер/GUI: Python + Unity AR; GANs для сценариев.
- ML: U-Net/GANs, обучение на Geant4 + реальных (e.g., volcano/mining datasets).

Безопасность и EMC

- HV изоляция, индикаторы; дозиметрия для операторов.
- Развязка, ферриты, EMC-тесты; blockchain для данных.

Причины улучшений (коротко)

- Micromegas/Cherenkov: Сверхточность + энергия для MST
- AI предиктивный: Реал-тайм алерты, новинка для stability.
- Drone/роботы: Динамика в inaccessible зонах.
- Open-source: Глобальная сеть, как в AGEMERA.

BOM (на один 2-слойный стек, прорывная версия)

- Micromegas/RPC-панели: 2 шт (~300 USD/шт).
- Readout-платы + Cherenkov: 2 шт (~150 USD).
- FPGA iCE40 + RP2040: 1 набор (~50 USD).
- LoRa (SX1276): 1 шт (~10 USD).
- Атомные часы/IRIG-B: 1 шт (~100 USD).
- RPi Zero: 1 шт (~20 USD).
- LiFePO4 50 Ah + MPPT: 1 комплект (~200 USD).
- Корпус IP67 + drone-адаптер: ~150 USD.
- GPR/LiDAR модуль: ~500 USD.
- AI-чип (edge): ~100 USD. Итого: ~1500–2000 USD/стек (экономия vs аналоги, но + для прорыва).

Метрики успеха

- Угловое разрешение: $\leq 1^\circ$.

- Стабильность: $\pm 1 \text{ mV/}^\circ\text{C}$.
- Пропуск: ≥ 1000 событий/мин.
- Автономность: 24–48 ч (drone — 1–2 ч полёта).
- Демо: Аномалия/риск за минуты с предикцией.

Альтернативные применения

- Archaeology: Скрытые камеры в пирамидах.
- Geology/Mining: Пустоты/рудники с borehole.
- Nuclear security: Детекция материалов в контейнерах/MST.
- Infrastructure: Мосты/туннели на стабильность.
- Подводные/экстремальные: Роботы для баз.

Риски и снижение

- Статистика: Увеличить стеки/drone, AI-ускорение.
- Температура: Компенсация + мониторинг.
- Связь: SD + retransmit.
- EMC: Ферриты, тесты.
- Масштаб: Open-source + партнёрства.
- Регуляции: Сертификация IAEA для nuclear.

Объяснение работы

муоны проникают сквозь объект, Micromegas/RPC фиксируют хиты/отклонения, FPGA/TDC ставят метки, LoRa шлёт на RPi/облако. AI реконструирует 3D реал-тайм с предикциями, hybrid GPR/LiDAR/SAR улучшает точность. Drone/роботы добавляют динамику. Open-source сеть — глобальный мониторинг. Для археологии — неразрушающе; для security — детекция ядерных угроз; для mining — mapping руд.

Сцинтиллятор: Подробное техническое описание

Сцинтиллятор — это ключевой компонент детектора в мюонной томографии, преобразующий энергию ионизирующих частиц (в данном случае космических мюонов) в видимый свет (фотоны). В системе мюонного томографа сцинтиллятор фиксирует прохождение мюона, генерируя световой сигнал, который затем улавливается фотодетекторами (например, SiPM). Основной механизм — сцинтилляция: возбуждение электронов в материале мюоном приводит к их релаксации с излучением фотонов. Эффективность определяется световым выходом (light yield), временем затухания (decay time), длиной волны эмиссии, плотностью и устойчивостью к радиации.

В оригинальной архитектуре проекта рекомендуется использовать пластиковые сцинтилляторы (например, BC-408 или EJ-200) для портативности и стоимости, или кристаллические (NaI(Tl), CsI(Tl)) для высокой эффективности. Ниже приведено детальное техническое описание, основанное на стандартных спецификациях и применениях в мюонной томографии. Я опираюсь на данные из производителей (Eljen Technology, Saint-Gobain) и научных публикаций по мюонным детекторам. Для мюонной томографии ключевыми параметрами являются: световой выход ~8–70% от антрацена (стандарт), время отклика 1–5 нс для пластиковых и 230–250 нс для кристаллических, и разрешение энергии, зависящее от размера и геометрии.

1. Назначение и принцип работы

Сцинтиллятор преобразует кинетическую энергию мюона (обычно 1–10 ГэВ в поверхностных приложениях) в фотоны видимого диапазона. Процесс:

- Ионизация и возбуждение: мюон теряет энергию через ионизацию атомов материала, создавая электрон-дырочные пары. Энергия потери описывается формулой Бете-Блоха:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4 N_A \rho}{m_e c^2 \beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I(1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 \right]$$

где:

- z — заряд мюона ($=1$),
- e — заряд электрона,
- N_A — число Авогадро,
- ρ — плотность материала,
- m_e — масса электрона,
- $\beta = v/c, \gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$,
- I — средний потенциал ионизации (для пластика ~ 65 эВ, для NaI ~ 450 эВ).

Для мюонов с энергией ~ 4 ГэВ:

$$dE/dx \approx 2 \text{ МэВ}/(\text{г}/\text{см}^2)$$

Это соответствует генерации порядка

$$10^4 - 10^5 \text{ фотонов}/\text{МэВ}$$

- Эмиссия: Возбужденные электроны релаксируют, излучая фотоны. Световой выход (LY) измеряется в фотонах/МэВ или % от антрацена (стандарт: 100% $\sim 38\,000$ фотонов/МэВ для нейтронов).
- Регистрация: Фотоны собираются волоконными световодами (WLS) или напрямую фотодетекторами. В мюонной томографии важно минимизировать мертвые зоны и обеспечить угловое разрешение $< 5^\circ$ для трекинга.
- Применение в томографии: Сцинтилляторы используются в слоях (мини-стеках) для регистрации траекторий мюонов. Плотность мюонного потока на Земле $\sim 10^2$ мюонов/ $\text{м}^2/\text{с}$, так что для панели 0.3 м^2 ($\sim 300 \text{ см}^2$) ожидается $\sim 30 - 300$ треков/мин, в зависимости от геометрии и высоты.

2. Типы сцинтилляторов

Рекомендуются два класса: пластиковые (для компактности и стоимости) и кристаллические (для высокой эффективности). Выбор зависит от баланса между световым выходом, стоимостью и устойчивостью.

2.1. Пластиковые сцинтилляторы (например, BC-408, EJ-200, EJ-212)

Материал: полистирол (PST) или поливинилтолуол (PVT) с добавками (p-terphenyl + POPOP для флуоресценции). Плотность $\sim 1.05 - 1.06 \text{ г}/\text{см}^3$, эффективный $Z \sim 5.8$ (низкий, но достаточный для мюонов > 1 ГэВ). Негигроскопичны, механически прочны (модуль Юнга $\sim 3 \text{ ГПа}$), устойчивы к радиации до $10^4 - 10^5$ рад.

Технические характеристики (EJ-200 как пример):

- Световой выход: 10 000–10 400 фотонов/МэВ (64% от антрацена), ~8–10% от теоретического максимума (для 1 МэВ электрона).

Формула эффективности:

$$\eta = \frac{LY}{E_{dep}}$$

где E_{dep} — депонированная энергия. Для мюонов ~10–15% от NaI(Tl) из-за низкого Z , но достаточно для трекинга (проху-энергия через ToT).

- Время затухания: основная компонента ~2.1–3 нс (быстрый отклик для высоких потоков), с хвостом ~10–20 нс.

Полная форма импульса:

$$I(t) = I_0 e^{-t/\tau}, \quad \tau \approx 2 \text{ нс}$$

Подходит для совпадений в <10 нс окне.

- Длина волны эмиссии: пик ~423 нм (синий), диапазон 380–490 нм. Коэффициент преломления $n = 1.58$, длина затухания (attenuation length) >3.8 м (минимальные потери в плитах до 1 м).
- Плотность и размеры: 1.023 г/см³. Типичные геометрии: плиты 300×100×10 мм или бруски 300×20×10 мм (сегментированные для позиционирования). Площадь покрытия: 10–15 см²/детектор для оптимальной чувствительности; для 1000 м² системы — ~10–20 м² материала.

- Устойчивость: радиационная твердость $> 10^4$ рад (без значительной деградации LY).
Температурный диапазон: $-20...+50$ °C (LY падает на $\sim 1\%/^{\circ}\text{C}$ выше 20 °C). Механика: твердость по Шору D=75, не хрупкий.
- Энергетическая эффективность: $\sim 10\%$ для мюонов $1\text{--}10$ ГэВ (из-за низкого Z, мюоны минимально ионизирующие частицы, MIP).
Стоимость: $50\text{--}150$ USD/м² для базовых плит.

Сравнение с другими пластиковыми (например, BC-408):

- BC-408: LY = 10 000 фотонов/МэВ (64% антрацен), $\tau = 2.1$ нс, пик 425 нм, длина затухания 2.1 м, плотность 1.032 г/см³. Лучше для больших панелей (> 1 м), но короче затухание света.
- EJ-212 (тонкий): LY = 9 200 фотонов/МэВ, $\tau = 2.4$ нс, для быстрых приложений (например, timing в томографии).

Применения в мюонной томографии: пластиковые предпочтительны для портативных систем из-за легкости (вес ~ 1 кг/панель) и стоимости. В проектах вроде COSMIC (мюонный трекер) используются сегментированные бруски с WLS-волокнунами (Kuraray Y-11, $\varnothing 1$ мм) для сбора света, повышая равномерность на 2–3 раза.

Светосбор: увеличение до $3\times$ с WLS (wavelength-shifting fibers). В системах с треугольными барами (triangular strips) разрешение позиции ~ 1 мм, для 3D-реконструкции по backprojection или SIRT.

2.2. Кристаллические сцинтилляторы (например, NaI(Tl), CsI(Tl))

Материал: неорганические кристаллы с допантами (Tl для активации). Высокий Z (NaI: $Z_{eff} \approx 50$, CsI: $Z_{eff} \approx 54$), плотность $3.67\text{--}4.51$ г/см³, гигроскопичны (требуют герметизации). Лучшая эффективность для низкоэнергетических гамма/мюонов.

NaI(Tl) (натрий-йодид с таллием):

- Световой выход: $38\,000\text{--}41\,000$ фотонов/МэВ (100% антрацен), $\sim 30\text{--}60\%$ теоретического.
Эффективность: $\eta \approx 45$ фотонов/кэВ.
Непропорциональность: LY падает на $\sim 20\%$ ниже 100 кэВ из-за quenching.
- Время затухания: основная компонента $\sim 230\text{--}250$ нс (экспоненциальная: $\tau = 250$ нс), с компонентами ~ 1 мс и 12 мс (температурно-зависимы).

Формула:

$$I(t) = \sum I_i e^{-t/\tau_i}, \quad \tau_1 = 250 \text{ нс (90\%)}, \quad \tau_2 = 1 \text{ мс (10\%)}$$

- Длина волны: пик 415 нм (совместим с биалкалийными PMT), диапазон $300\text{--}550$ нм.
 $n = 1.85$, коэффициент затухания $\sim 0.1\text{--}0.2$ см⁻¹.

- Плотность и размеры: 3.67 г/см^3 . Кристаллы $3 \times 3 - 20 \times 20 \text{ см}$, толщина 5–10 мм.
Для томографии: плиты $10 \times 10 \text{ см}^2$, $\sim 10\text{--}100 \text{ м}^2$ для больших систем (стоимость 500–1500 USD/ м^2).
- Устойчивость: радиационная твердость $\sim 10^3 \text{ рад}$ (деградация LY > 10%).
Температурный диапазон: $-20\text{...}+50 \text{ }^\circ\text{C}$ (LY максимум при $25 \text{ }^\circ\text{C}$, падение $\sim 0.3\%/^\circ\text{C}$).
Гигроскопичен (NaCl-подобный), требует алюминиевого корпуса.
- Энергетическая эффективность: $\sim 60\%$ для гамма/мюонов (высокий Z).
Разрешение энергии: 5.4–7% FWHM при 662 кэВ (с SiPM).

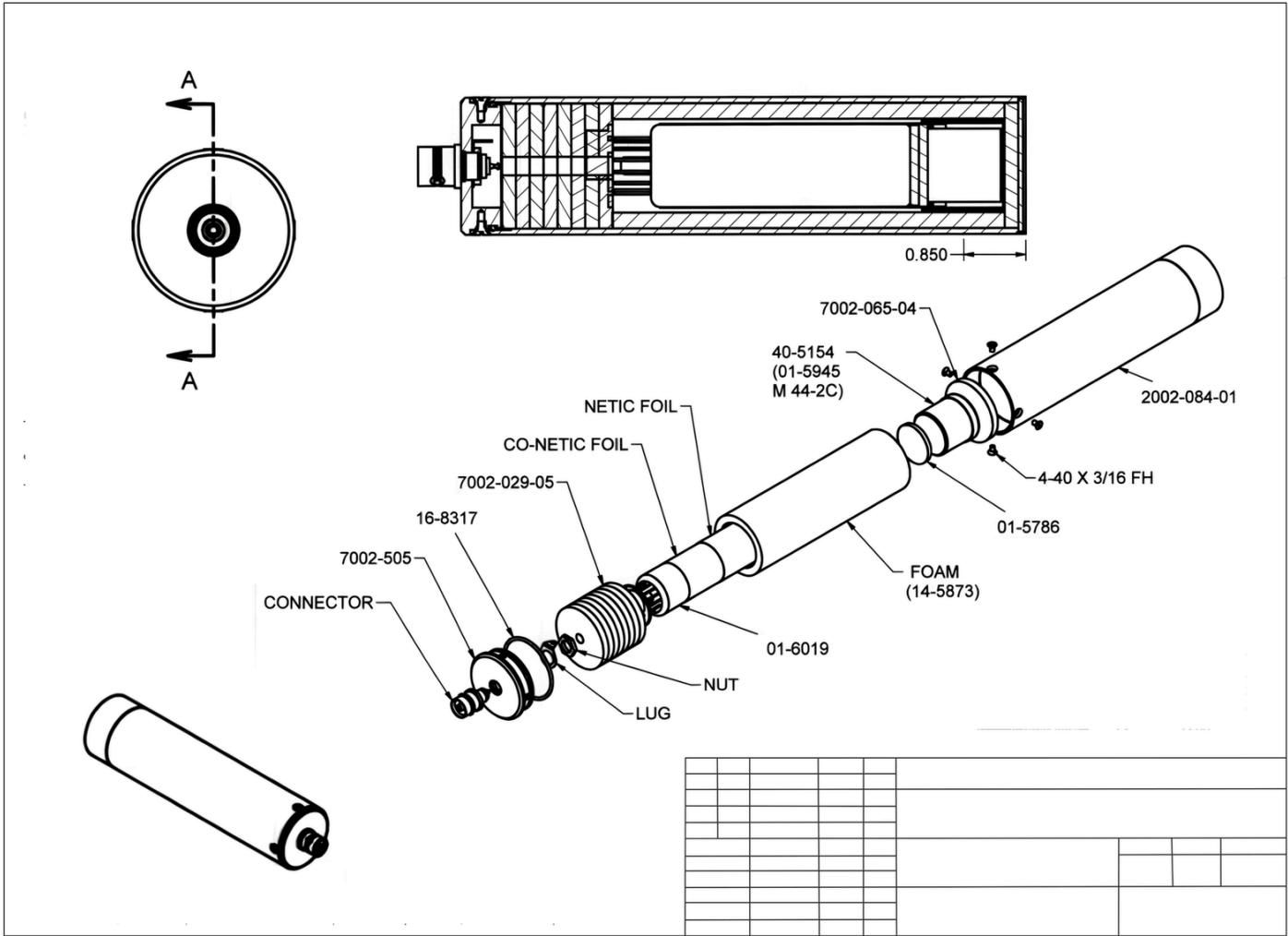
CsI(Tl) (цезий-йодид с таллием):

- Световой выход: 54 000–65 000 фотонов/МэВ ($\sim 165\%$ NaI(Tl)), пик 550 нм (зелёный, оптимален для SiPM/PD).
Непропорциональность: варьирует по ионизации (быстрые/медленные компоненты для PSD).
- Время затухания: 3–5 нс (быстрая компонента), основная $\sim 680 \text{ нс} + 3.3 \text{ мкс}$ (зависит от частицы: τ короткий для гамма, длинный для альфа).
Afterglow: 0.05–0.39% при 20 мс (низкий для томографии).
- Длина волны: пик 550 нм, диапазон 350–700 нм.
 $n = 1.79$, коэффициент затухания $\sim 0.05 \text{ см}^{-1}$.
- Плотность и размеры: 4.51 г/см^3 . Кристаллы/массивы 1D/2D (пиксели 1–2 мм), толщина 5–10 мм.
Для томографии: массивы 485 пикселей с WLS.
- Устойчивость: радиационная твердость $> 10^3 \text{ рад}$.
Механика: нет cleavage, твёрдость 2 по Моосу.
Слабогигроскопичен (лучше, чем NaI).
- Энергетическая эффективность: $\sim 70\%$ (высокий Z).
Разрешение: 4.8–7% FWHM при 662 кэВ.

3. Процесс регистрации и дополнительные параметры

- Поглощение мюонов: мюон (MIP) генерирует $\sim 10^4$ фотонов/см в пластике, ~ 3 раза больше в кристаллах.
Сигнал: $\sim 10^3\text{--}10^4$ фотоэлектронов/МэВ с PMT/SiPM (усиление $10^6\text{--}10^8$).
- Температурный режим: для NaI(Tl)/CsI(Tl) LY максимум при $20\text{--}25 \text{ }^\circ\text{C}$, падение 0.3–1%/ $^\circ\text{C}$. Пластик стабильнее ($-0.1\%/^\circ\text{C}$).
- Устойчивость к радиации: пластик $> 10^4 \text{ рад}$, кристаллы $\sim 10^3 \text{ рад}$ (деградация от Tl-центров).
- Расчёты: для покрытия 1000 м^2 — $10\text{--}20 \text{ м}^2$ пластика (5–15k USD) или $50\text{--}100 \text{ м}^2$ кристаллов (25–150k USD).
Плотность мюонов: $100 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, регистрация $\sim 10^2/\text{м}^2/\text{с}$.

В мюонной томографии пластиковые предпочтительны для полевых систем (дешевле, легче), кристаллические — для высокой точности (например, ядерная безопасность). Для проекта рекомендуется комбинировать с WLS для позиционирования; цель — разрешение 1–5 нс для TDC.



Фотодетекторы (SiPM): подробное техническое описание

Фотодетекторы типа SiPM (Silicon Photomultipliers, кремниевые фотоумножители) — это твердотельные устройства на основе лавинных фотодиодов (APD), работающие в режиме Гейгера (Geiger-mode APD, GM-APD). Они предназначены для регистрации слабых оптических сигналов от сцинтилляторов, преобразуя фотоны в электрический сигнал с высоким усилением.

SiPM состоят из массива микропикселей (SPAD — single-photon avalanche diodes), соединённых параллельно, что обеспечивает высокую чувствительность к одиночным фотонам. В мюонной томографии SiPM улавливают свет от сцинтилляторов (например, 10^3 – 10^4 фотонов на один мюонный хит), генерируя пропорциональный импульс для оценки энергии и времени.

SiPM превосходят традиционные фотоумножающие трубки (PMT) по компактности, низкому напряжению питания (30–50 В против 1–2 кВ у PMT), магнитоустойчивости и стоимости. Недостатки — высокий темновой шум (dark count rate, DCR) и оптический кроссток.

По состоянию на август 2025 года рынок SiPM растёт: объём — 146–152 млн USD (2024–2025), прогноз — 208–240 млн USD к 2030 году (CAGR 6–8 %). Развитие обеспечивается улучшением радиационной стойкости (для LHC/CMS), временного разрешения (<50 пс) и применением в LiDAR, ядерной безопасности и медицинской томографии.

1. Что это?

SiPM представляют собой массив из тысяч микропикселей (SPAD), каждый из которых является лавинным фотодиодом в Geiger-режиме.

- Активная площадь: от 1×1 мм² до 6×6 мм² (или больше в массивах).
- Материал: кремний (Si), с n-p или p-n переходом.
- Ключевые характеристики:
 - коэффициент квантовой эффективности регистрации фотонов (PDE) — до 50–65 % (в 2025 году улучшено до 70 % в моделях для LiDAR);
 - усиление $G \approx 10^5$ – 10^7 ;
 - временное разрешение — <50 пс (в 2025 году достигнуты 20–30 пс для задач ToF);
 - темновой счёт (DCR) — 10^5 – 10^6 с⁻¹·мм⁻² при 25 °C.

2. Для чего используется?

- Преобразование света от сцинтилляторов в электрический сигнал (мюоны, гамма, нейтроны).
- Высокоточный счёт фотонов: PDE >50 % в диапазоне 420–450 нм (сцинтиллятор BC-408).
- В мюонной томографии: определение позиции, времени и энергии хита по амплитуде импульса.
- В проектах CMS (CERN): работа в условиях радиации $>10^{14}$ н·см⁻² (апгрейд 2025 года).
- Другие применения: LiDAR (автономный транспорт, горнодобывающая разведка), ПЭТ/МРТ (медицина), ядерная безопасность.

3. Как работает SiPM?

Структура.

- Размер микропикселей — 10–100 мкм.
- Коэффициент заполнения (fill factor) — 50–80 %.
- Каждый SPAD снабжён гасительным резистором.
- Количество субпикселей — от 100 до 10^4 .

Гейгер-режим.

Напряжение смещения:

$$V_{\text{bias}} = V_{\text{breakdown}} + V_{\text{over}},$$

где $V_{\text{over}} = 1\text{--}5$ В, а $V_{\text{breakdown}} \approx 25\text{--}30$ В.

При поглощении фотона ($h\nu > E_g \approx 1,1$ эВ) возникает электрон-дырочная пара, которая инициирует лавину.

Усиление:

$$G = \frac{C_{\text{cell}} \cdot V_{\text{over}}}{q},$$

где $C_{\text{cell}} \approx 50\text{--}100$ фФ, q — заряд электрона.

Типичное значение $G \approx 10^6$ при $V_{\text{over}} = 3$ В.

Суммирование импульсов.

Выходной заряд:

$$Q_{\text{out}} = N_{\text{ph}} \cdot G \cdot q \cdot \text{PDE},$$

где N_{ph} — число фотонов.

Для $N_{\text{ph}} = 10^3$: $Q_{\text{out}} \sim 10^9\text{--}10^{10}$ электронов (амплитуда 1–10 мВ на 50 Ом).

Временные характеристики.

- Время восстановления: $\tau_{\text{rec}} = R_q \cdot C_{\text{cell}} \approx 10\text{--}100$ нс.
- Джиттер:

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_{\text{walk}}^2 + \sigma_{\text{noise}}^2},$$

значение <50 пс (2025 год — до 20–30 пс).

Шум.

- DCR — $10^5\text{--}10^6$ с⁻¹·мм⁻².
- Оптический кроссток (ОСТ) — 5–20 %.
- Afterpulsing — 1–10 %.

Эффективность.

$$\text{PDE} = QE \cdot FF \cdot P_{\text{trigger}},$$

где $QE \approx 80\text{--}90\%$ в диапазоне 400–500 нм.

Итоговое значение PDE = 40–65 % (в 2025 году — до 70 %).

4. Какие технологии используются?

- Кремниевые фотодиоды (структура N-on-P или P-on-N).
- CMOS-совместимые процессы (0,13–0,35 мкм), антиотражательные покрытия.
- Технология trench-изоляции (ОСТ <5 %).
- Активное и пассивное гашение лавины (AQ <10 нс, PQ ≈50 нс).
- Напряжение питания — 25–70 В.
- Потребляемая мощность — 30–50 мВт·мм⁻².
- Производители: Hamamatsu (S13360), ON Semiconductor (MicroFJ), KETEK (PM33xx), AdvanSiD.

5. Количество SiPM в проекте

- Один брусок сцинтиллятора (3–5 см²): 4–16 SiPM.
- Мини-стек (3 слоя, 5 брусков): 30–120 SiPM.
- Общая площадь покрытия: 100–150 мм².
- Полная система (3–6 стеков): 100–500 SiPM.

6. Из чего состоит SiPM?

- Массив SPAD с p–n переходом (глубина 10–20 мкм).

- Система усиления (гасительные резисторы или транзисторы).
- Электронные схемы (аналоговый/цифровой выход, TDC/ADC в цифровых SiPM).
- Корпус: керамический или пластиковый, с окном из стекла.
- Размеры: 3×3 – 6×6 мм, толщина ≈1 мм.

7. Стоимость SiPM

- Hamamatsu S13360 (3×3 мм): 50–150 USD.
- ON Semi MicroFJ-30035 (3×3 мм): 60–120 USD.
- KETEK PM3350 (3,5×3,5 мм): 40–100 USD.
- Массовые закупки: снижение на 20–50 %.
- Радиационно-стойкие версии: +50–100 %.

8. Дополнительные вычисления и особенности

Шум.

$$DCR = DCR_{\text{thermal}} + DCR_{\text{tunnel}}, \quad DCR_{\text{thermal}} \sim \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right).$$

Темновой счёт удваивается каждые 7–10 °С.

Время отклика.

- Время нарастания: 1–5 нс.
- Длительность импульса: 10–50 нс.
- Для метода ToT:

$$\text{ToT} = \tau_{\text{ln}} \cdot \ln(N_{\text{ph}} + 1).$$

Пример расчёта.

Для мюонного хита ($N_{\text{ph}} = 1000$, PDE = 50 %, $G = 10^6$):

$$Q \approx N_{\text{ph}} \cdot \text{PDE} \cdot G \cdot q \approx 10 \text{ пКл.}$$

Отношение сигнал/шум:

$$SNR = \frac{\sqrt{N_{ph} \cdot PDE}}{\sqrt{DCR \cdot t_{int} + OCT \cdot N_{ph}}} > 10.$$

Позиционирование.

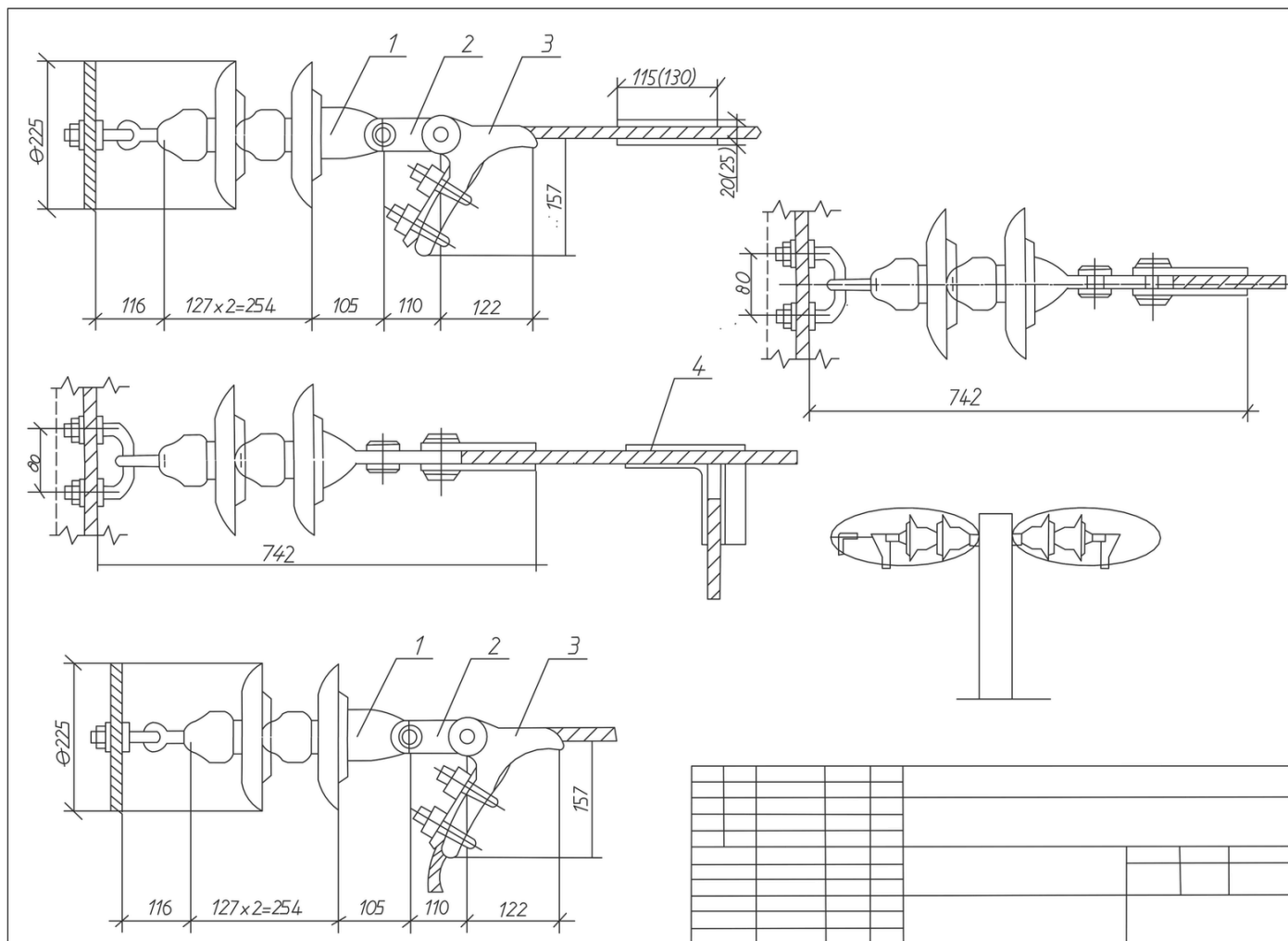
Для двух SiPM на волокно:

$$Pos = \frac{L}{2\alpha} \cdot \ln \left(\frac{S_1}{S_2} \right),$$

где $\alpha \approx 0,01-0,05 \text{ см}^{-1}$ — коэффициент затухания волокна.

Примерные параметры для проекта:

- Размер: 3×3 мм².
- PDE: 50–60 % (420–450 нм).
- Усиление: $G=106G = 10^6$ $G=106$.
- DCR: <1 МГц·мм⁻².
- Время отклика: 10–50 нс.
- Цена: 50–150 USD.



Аналоговый тракт: Подробное техническое описание

Аналоговый тракт (analog front-end, AFE) — это цепь электронных компонентов, обрабатывающих сырой сигнал от фотодетекторов (SiPM) перед цифровизацией. Он включает усилители (например, трансимпедансные усилители, TIA), компараторы/дискриминаторы (для порогового детектирования) и высоковольтную схему (HV-scheme) для питания SiPM. Цель — усилить слабый сигнал (милливольты/наносекунды), снизить шум, измерить амплитуду/время и подготовить для TDC/ADC. В мюонной томографии AFE критичен для точного трекинга: временное разрешение < 10 нс, динамический диапазон 10^0 – 10^4 фотонов, низкий шум ($\text{SNR} > 20$ дБ). По состоянию на август 2025, advancements фокусируются на low-power ASIC (application-specific integrated circuits) для портативных детекторов, с интеграцией в SiPM-arrays для muon imaging в ядерной безопасности и геологии. Шум снижен до < 1 фА/√Гц, энергопотребление < 10 мВт/канал в новых дизайнах для TOF (time-of-flight) систем.

1. Что это?

Аналоговый тракт — последовательность цепей: TIA для преобразования тока в напряжение, преамп/шейпер для фильтрации, компаратор для триггера и HV-схема для стабильного питания SiPM ($V_{\text{bias}} = 25$ – 70 В). Это AFE минимизирует джиттер ($\sigma_t < 50$ пс), компенсирует температурные дрейфы и обеспечивает линейность для ToT (time-over-threshold) как проху-энергии. В портативных системах (e.g., muon detectors) AFE интегрируется в ASIC для компактности, как в Cosmo ArduSiPM (2024–2025: PCB с AFE для SiPM, low-noise < 1 пА/√Гц).

2. Для чего используется?

- **Усилители:** Увеличивают амплитуду сигнала от SiPM (ток ~ 1 – 10 мА на лавину) до уровней для ADC/TDC (0.1–5 В). Снижают шум (electronic noise influence) для single-photon resolution.
- **Компараторы:** Детектируют события выше порога, генерируя TTL/LVDS импульсы для коинциденций. Используются для CFD (constant fraction discriminator) для timing < 10 нс.
- **HV-схема:** Обеспечивает стабильное высокое напряжение для Geiger-режима SiPM, с компенсацией (температура, aging). В muon tomography AFE критичен для позиционного разрешения (~ 1 мм) и энергетики (ToT проху для dE/dx).
- **Применения:** particle detectors (CMS/LHC) для readout SiPM; портативные muon arrays для imaging (low-power < 5 мВт/канал); TOF-ion mass spectrometers (2025 ASIC: < 1 нс timing).

3. Как работает?

AFE обрабатывает импульс от SiPM (ширина 10–50 нс, амплитуда 1–100 мВ).

- **Усилители (TIA/Preamplifier):**

- TIA преобразует ток I_{in} в напряжение V_{out} :

$$V_{\text{out}} = -I_{\text{in}} \cdot R_f,$$

где R_f — обратный резистор (1–10 кОм).

- Полоса пропускания:

$$BW = \frac{1}{2\pi R_f C_f},$$

где C_f — ёмкость для стабильности (pole-zero compensation).

- Шум:

$$i_n = \frac{\sqrt{\frac{4kT}{R_f} + 2qI_{\text{dark}}}}{\sqrt{BW}} + \frac{v_n}{R_f},$$

где v_n — напряжение шума опампа ($\sim 1\text{--}5$ нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$).

- Преамп/шейпер: CR-RC фильтр ($\tau_{\text{shape}} \sim 10\text{--}100$ нс):

$$V(t) = \frac{Q}{C} \cdot \frac{t}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

где Q — заряд от SiPM.

SNR:

$$SNR = \sqrt{\frac{Q^2}{2qI_{\text{leak}}\tau + 4kTR_s\tau + e_n^2 C_{\text{in}}^2 / \tau}}.$$

- **Компараторы/дискриминаторы:**

- Сравнивают V_{in} с V_{th} (порог от DAC, 1–100 мВ). Выход: TTL/LVDS если $V_{\text{in}} > V_{\text{th}}$.
- Время отклика: $t_{\text{prop}} < 10$ нс.
- CFD: $V_{\text{th}} = f \cdot V_{\text{peak}}$, $f = 0.2\text{--}0.5$.

- **HV-схема (High Voltage):**

- Генерирует $V_{\text{bias}} = 30\text{--}70$ В из 5–12 В.
- DC-DC boost:

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{1 - D},$$

где D — duty cycle PWM.

- Компенсация: $\Delta V_{\text{bias}} = k \cdot \Delta T$, $k = -20 - 60 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$.

4. Какие технологии используются?

- **Усилители:** low-noise ОУ (OPA211: $v_n = 1.1 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$, $I_n = 0.1 \text{ пА}/\sqrt{\text{Гц}}$).
- **Компараторы:** high-speed CMOS (TLV3501: slew rate $> 100 \text{ В/мкс}$).
- **HV:** DC-DC converters (LM2623, freq 1.3 МГц); DAC для fine-tune (resolution 10–50 мВ).

5. Сколько компонентов нужно?

- **Усилители:** 1–2/канал (TIA + preamp). Для 4–16 SiPM/детектор — 4–32.
- **Компараторы:** 1/канал (для триггера). Для многоканальных: quad-чипы (LM339 $\times 4$).
- **HV:** 1/группу SiPM (или per-channel для компенсации).

6. Из чего состоят компоненты?

- **Усилители:** ОУ (BJT/MOSFET), R/C для feedback, фильтры (LC для EMI).
- **Компараторы:** Дифференциальные пары транзисторов, hysteresis-резисторы.
- **HV-схема:** MOSFET/IGBT, индукторы/трансформаторы, Schottky-диоды, LDO.

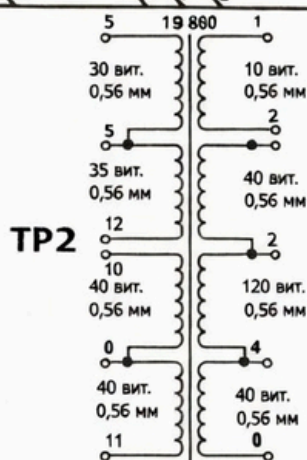
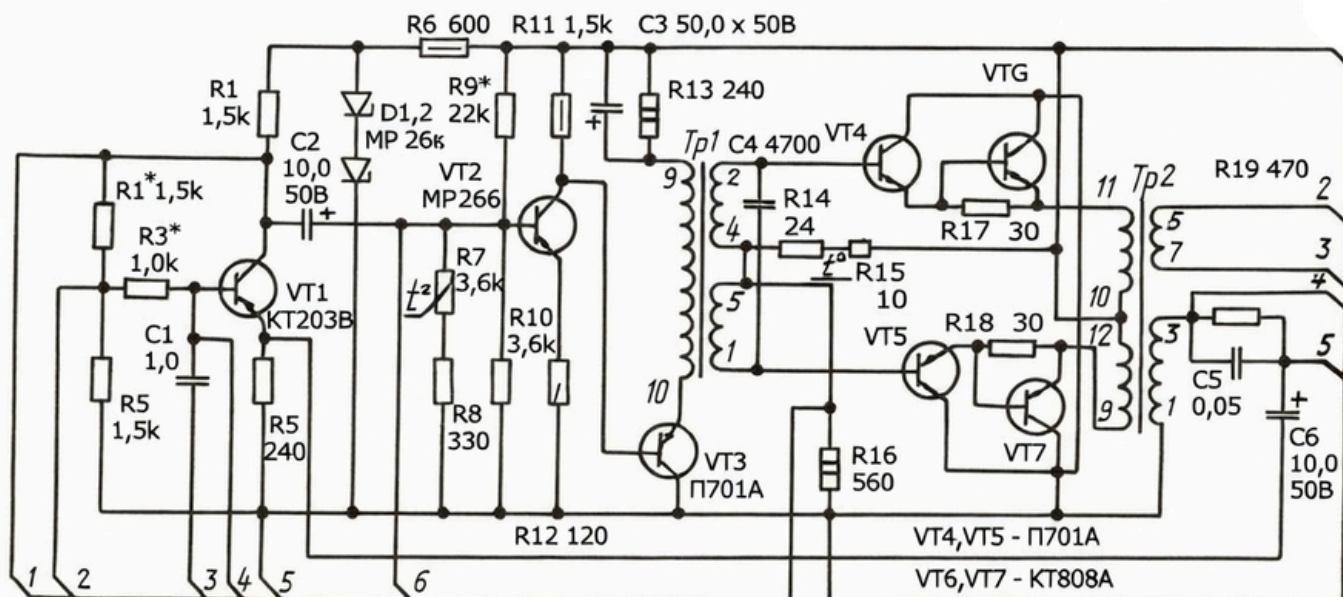
7. Стоимость компонентов

- **Усилители:** OPA211 $\sim 5\text{--}10 \text{ USD}$.
- **Компараторы:** LM339 $\sim 1\text{--}3 \text{ USD}$; high-speed $\sim 5\text{--}15 \text{ USD}$.
- **HV:** LM2623 $\sim 5\text{--}15 \text{ USD}$; HV9910 $\sim 3\text{--}10 \text{ USD}$.
- **Полный AFE ASIC:** $\sim 20\text{--}50 \text{ USD/канал}$ (2025: снижение для mass-production).

8. Дополнительные вычисления и особенности

- **Температурная стабилизация:** $dV_{\text{os}}/dT < 1 \mu\text{В}/^\circ\text{C}$.
- **Время отклика:** $< 50 \text{ нс}$ для компараторов; ENC $< 100 \text{ е}^-$ для TIA.
- **Расчёт:** при сигнале $Q = 1 \text{ пКл}$:

$$V_{\text{out}} = \frac{Q}{C_f} \approx 1 \text{ В}, \quad C_f = 1 \text{ пФ}.$$



III

Адрес	Цепь	Конт
Регулировочный	14	14
Регулировочный	15	15
Ист. сит. $\approx 0,788$ (Вход)	16	16
Регулировочный (Регулировочный)	19	19
Ист. сит. $\approx 0,788$; +24,5	17	17
Регулировочный	17	17
Регулировочный	7	7
Регулировочный	8	8
Ист. пит. +24,8	18	18
Ист. пит. -24,5	10	10
Нагрузка ≈ 308 (Выход)	5	5
Нагрузка ≈ 308 (Выход)	6	6
Нагрузка ≈ 308 (Выход)	4	4
Нагрузка ≈ 308 (Выход)	4	4
Регулировочный	19	19
Регулировочный	19	19
Перетинка +24,5	1	1
Перетинка +24,5	2	2

Цифровая логика: Подробное техническое описание

Цифровая логика в проекте — это блок, отвечающий за обработку дискретизированных сигналов от аналогового тракта, установку временных меток (timestamps) и формирование событий для дальнейшей реконструкции.

Ключевые компоненты: TDC (Time-to-Digital Converter, преобразователь времени в цифровой код), FPGA (Field-Programmable Gate Array, программируемая логическая интегральная схема) и MCU (Microcontroller Unit, микроконтроллер).

Это обеспечивает высокоточную временную привязку хитов (разрешение < 5 нс), коинциденции (сопоставление событий в слоях) и упаковку данных для передачи. В мюонной томографии цифровая логика критична для трекинга: угловое разрешение $< 5^\circ$ зависит от временной точности ($\Delta\theta \sim c \cdot \Delta t / \text{baseline}$, где baseline — расстояние между слоями ≈ 50 см).

По состоянию на сентябрь 2025 года разработки фокусируются на low-power FPGA с встроенным TDC (например, для переносных мюонных детекторов в геологии и ядерной безопасности) с разрешением < 1 нс и интеграцией AI для on-chip фильтрации. Энергопотребление снижено до < 50 мВт/канал в новых чипах для TOF (time-of-flight) систем.

1. Что это?

Цифровая логика — комбинация аппаратных (FPGA/TDC) и программных (MCU firmware) элементов для преобразования аналоговых триггеров в цифровые события.

- **TDC** измеряет время прихода сигнала (leading/trailing edges для ToT).
- **FPGA** обрабатывает логику (коинциденции, фильтры).
- **MCU** управляет системой (конфигурация, передача).

Общий формат события: {timestamp (64-bit, ns-resolution), module_id, layer_mask, strip_id, ToT (energy proxy), temp}.

В 2025 году: цифровизация на уровне ASIC с AI-акселераторами для real-time track validation.

2. Для чего используется?

- **TDC**: точное измерение Δt между start/stop (например, PPS и хит). Разрешение 1–5 нс для угловой точности $\sim 1\text{--}5^\circ$ ($\theta = \arctan(c \cdot \Delta t / d)$, где $d = \text{baseline}$).
- **FPGA**: параллельная обработка (коинциденции < 100 нс), буферизация, простая ML (например, noise rejection). Для многоканальных систем: до 1000 каналов/чип.
- **MCU**: контроль (пороги, калибровка), интерфейсы (I²C/SPI для HV-DAC), передача данных. В мюонной томографии: фильтрация событий (> 200 /мин/стек), синхронизация с GPS/IRIG-B.

Применения:

- particle physics (CERN ATLAS/CMS: TDC в muon triggers),
- portable imaging (геология/добыча: low-power FPGA для field deployment),
- TOF-PET (медицина: <50 пс timing).

3. Как работает?

Цифровая логика преобразует LVDS/TTL от компаратора в цифровые метки.

Pipeline:

- **TDC**
 - Принцип: измеряет Δt как код (например, delay-line или oscillator-based).
 - Delay-line: цепочка инверторов (разрешение $\sim 10\text{--}50$ пс/элемент), код = $N_{\text{delay}} \cdot \tau_{\text{delay}}$.
 - Oscillator: счётчик тактов ($f_{\text{ref}} = 1\text{--}10$ ГГц), $t_s = N \cdot (1/f_{\text{ref}}) + \text{fine}$ (DLL/PLL для sub-ps).
 - Состав: start/stop inputs, coarse counter (64-bit, 40 МГц для ~ 25 нс LSB), fine interpolator (Vernier delay line: $\Delta t_{\text{fine}} = \tau_1 - \tau_2 \approx 10$ пс).
 - Разрешение: $R = \text{LSB} / \sqrt{12} \approx 0.3 \cdot \text{LSB}$ для гауссовского шума.
 - Типы:
 - TDC7200 (TI: 55 пс LSB, диапазон 12 нс–8 мс, мощность 0.5 мВт),
 - CAEN V1720 (12-bit ADC+TDC, 3.2 пс),
 - RP2040 PIO (квази-TDC, 4–8 нс, low-cost).
 - Нелинейность: INL/DNL <0.5 LSB (калибровка LUT).
- **FPGA**
 - Принцип: программируемая логика (LUTs, flip-flops) для параллельной обработки.
 - Коинциденция: AND-гейт на hits в слоях (окно $\pm 30\text{--}100$ нс).
 - Пакет событий: FIFO-буфер (ring buffer, 1–10k событий).
 - HDL (Verilog/VHDL):

```
always @(posedge clk)
```

```
if (hit_mask == 3'b111) event_pack();
```

- Обработка: Bayesian фильтры для шума, ML-classifier (lightweight NN на LUTs для valid track vs noise).
- Clock: 100–500 МГц, latency <10 мкс.
- Типы: iCE40UP5K (Lattice: 5k LUTs, 120 кбит RAM, power <50 мВт, для low-cost muon); Xilinx Spartan-6 (50k LUTs, для complex logic).
- **MCU**
 - Принцип: CPU для контроля (ISR для hits, DMA для буферов).
 - Настройка: I²C для DAC/порогов.
 - Передача: UART/SPI к LoRa/SD.
 - Типы: RP2040 (dual Cortex-M0+, 133 МГц, PIO для custom TDC); STM32H7 (Cortex-M7, 480 МГц, FPU для calc).
 - Firmware: C/C++, ring buffer для ISR < DMA.

4. Какие технологии используются?

- **TDC**: delay-line (Vernier для <10 пс), time-amplifier (TA для растяжки Δt), ASIC (Nutt method: coarse+fine). В 2025 году — hybrid TDC+ADC в one-chip для energy+time.
- **FPGA**: CMOS-based gates (7–28 нм nodes), DSP blocks для ML. Tools: IceStorm (open-source для iCE40), Vivado для Xilinx.
- **MCU**: ARM Cortex (M0/M4/M7), peripherals (TIM для counters, DMA для high-rate). RTOS (FreeRTOS) для multitasking.

5. Сколько компонентов нужно?

- TDC: 1/канал (или multi-channel chip, как TDC7200 для 8 каналов). В стеках: 3–6.
- FPGA: 1/стек (для 16–32 каналов). Для системы: 1–2.
- MCU: 1/стек (или central для multi-stack).

6. Из чего состоят компоненты?

- **TDC**: counters, delay lines (inverters/chains), PLL/DLL, registers. Интегрированные: ADC для calib.
- **FPGA**: LUTs (4–6 inputs), FFs, BRAM (block RAM), I/O pins (LVDS для PPS).
- **MCU**: CPU core, peripherals (ADC/DAC/TIM), flash/RAM (256 кБ–1 МБ), interfaces (USB/Ethernet опционально).

7. Стоимость компонентов

- TDC: TDC7200 ≈10–30 USD; CAEN V1720 ≈200–1000 USD (multi-channel).
- FPGA: iCE40UP5K ≈15–50 USD; Spartan-6 ≈50–200 USD.
- MCU: RP2040 ≈5–20 USD; STM32H7 ≈10–50 USD.

8. Дополнительные вычисления и особенности

- Синхронизация:

$$t_s = \text{PPS} + \text{ticks},$$

(64-bit counter, overflow ~584 года). Дрейф <1 ppm с ОСХО (oven-controlled oscillator).

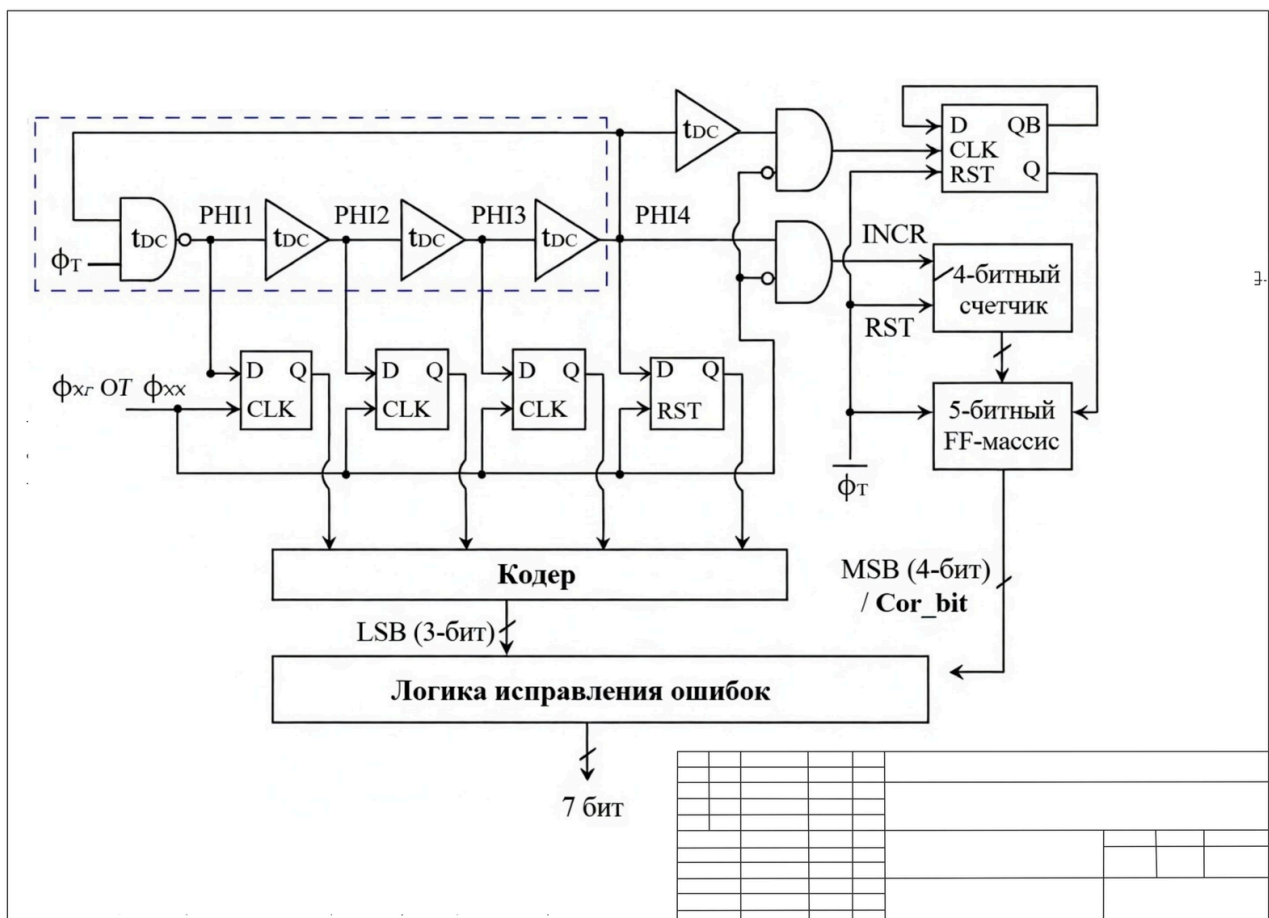
- **Обработка ошибок:** CRC32 на события, retransmit. Dead-time < 1 % при 1 МГц rate.
- **Расчёты:** для baseline 50 см и $\Delta t = 5$ нс:

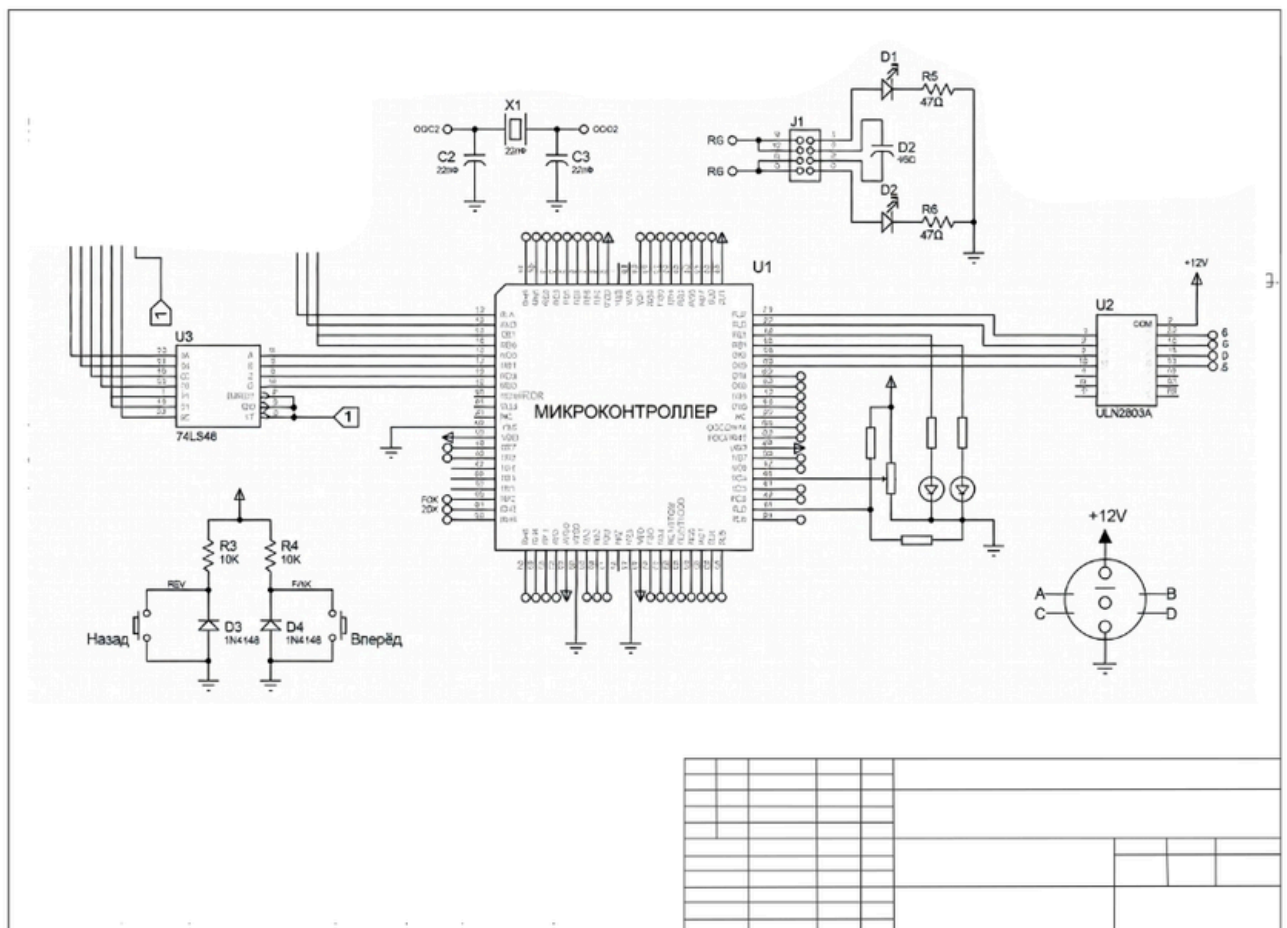
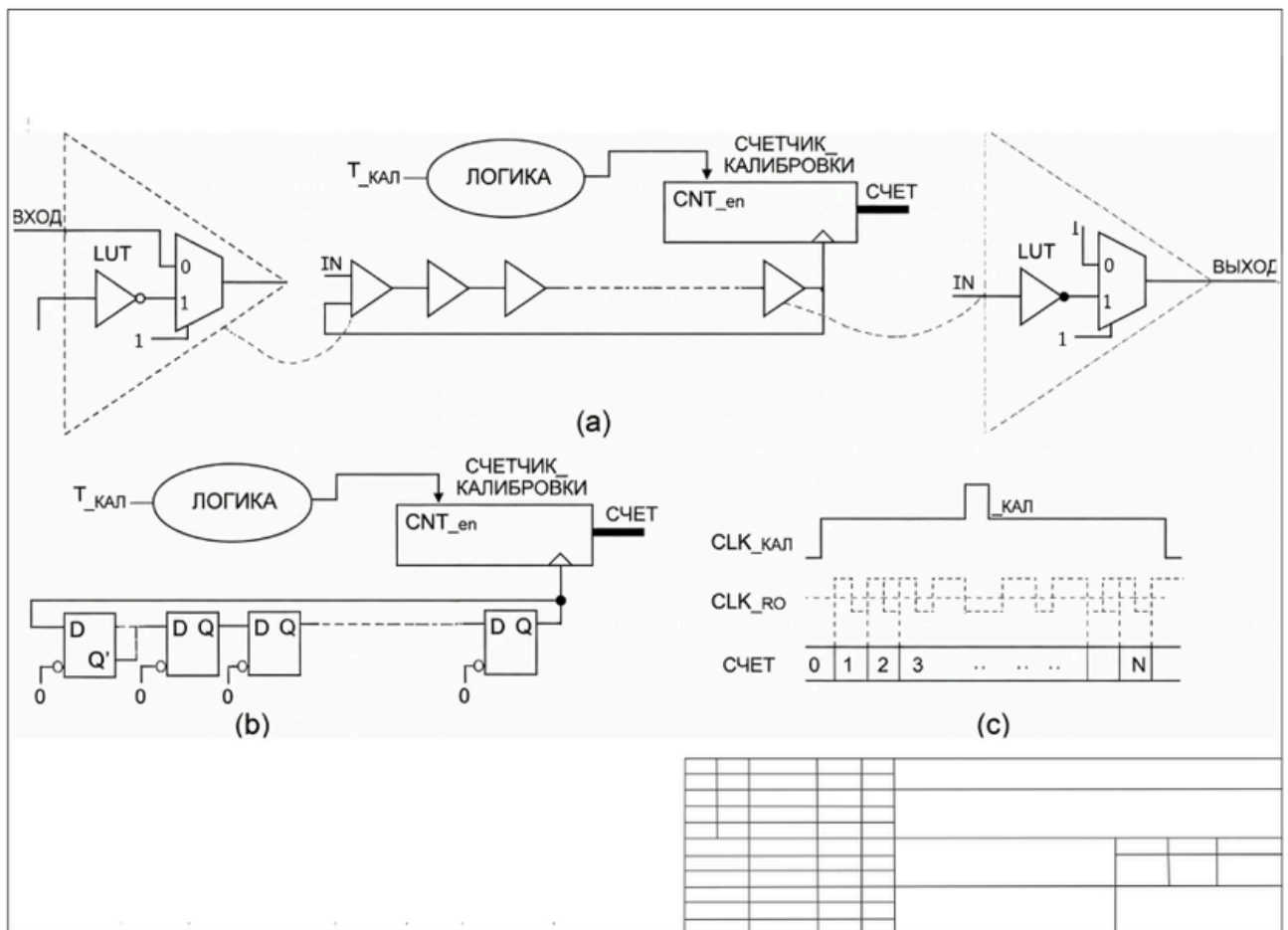
$$\Delta\theta \approx \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/c} \cdot 5 \cdot 10^{-9} \text{ c}}{0.5 \text{ m}} \approx 3^\circ.$$

Пропуск: 200 событий/мин при clock 100 МГц.

- **Особенности 2025 года:** AI on FPGA (TensorFlow Lite для track classification), radiation-hard (SEU mitigation с TMR — triple modular redundancy). В проекте: PIO-TDC как fallback, HDL для custom logic.

Примерные параметры: TDC разрешение 1 нс, FPGA 16–32 канала @200 МГц, MCU 168 МГц с 1 МБ RAM.





Связь и синхронизация:

Подробное техническое описание

Связь и синхронизация — это подсистема, обеспечивающая передачу данных между модулями детекторов и точную временную координацию событий (синхронизацию) в системе мюонного томографа. Она включает как проводные каналы (кабели, например CAT5e для PPS-сигналов), так и беспроводные (LoRa, Wi-Fi, Zigbee), а также источники синхронизации (GPS для outdoor, IRIG-B или атомные часы для indoor). Цель — обеспечить низколатентную передачу компактных событий (<100 байт/событие) с потерей пакетов <0,1 % и временной точностью <10 нс для трекинга мюонов (угловое разрешение <5°). В экстремальных условиях (пещеры, тропики) акцент делается на устойчивости: оффлайн-буфер (SD) и повторная передача. По состоянию на сентябрь 2025 года, развитие IoT-сетей подчеркивает гибридные подходы: LoRa для дальнобойной маломощной связи, с интеграцией AI для оптимизации (например, адаптивная модуляция), и GPS/IRIG-B для субмикросекундной синхронизации в научных приборах. Энергопотребление минимизировано (<10 мВт для LoRa), с учетом электромагнитной совместимости (EMC) для полевых применений.

1. Что это?

Подсистема связи и синхронизации объединяет транспорт данных (проводной и беспроводной) и временные референсы.

- Связь: передача бинарных кадров (например, Protobuf/CBOR с CRC32) от MCU к шлюзу/облаку.
- Синхронизация: привязка локальных таймеров к глобальному времени (UTC) для корреляции событий между модулями (коинциденции в окне $\pm 30\text{--}100$ нс).

Двухрежимная работа: outdoor (GPS 1PPS + 10/20 МГц) и indoor (мастер-PPS по LVDS/CAT5e или IRIG-B/атомные часы). Формат событий: {ts64, id, data} с подтверждением (ACK) и повторной передачей. В 2025 году наблюдается интеграция с 5G/LTE для гибридных решений, но фокус сохраняется на low-power для удалённых систем (например, LoRa-mesh).

2. Для чего используется?

- Кабели (проводная связь): надежная передача на средние расстояния (<100 м) с низкой латентностью (<1 мс), для indoor/лабораторий (например, PPS по LVDS для синхронизации <1 нс).
- Беспроводные каналы: для полевых развертываний (remote areas, без кабелей), с низким энергопотреблением (например, LoRa для 5–10 км в скалах), с буферизацией при потере связи.
- GPS/синхронизация: абсолютная временная привязка (точность <1 мкс) для корреляции в мульти-модульных системах; indoor-fallback для пещер (атомные часы/IRIG-B).

- Применения:
 - мюонная томография — синхронизация треков ($\Delta t < 5$ нс для $\theta < 5^\circ$), передача ~200 событий/мин/стек;
 - ядерная безопасность — realtime-алерты;
 - геология — удалённый мониторинг вулканов и добычи.

3. Как работает?

Подсистема имеет два режима: высокоскоростной (Wi-Fi для демонстраций) и надёжный (LoRa для полевых условий). Синхронизация обеспечивает глобальный референс для локальных счётчиков.

Кабельные каналы связи:

- Типы:
 - Коаксиальные (RG-58/RG-6 для ВЧ-сигналов, затухание <0,5 дБ/м при 1 ГГц);
 - Оптоволокно (LC/SC, <0,2 дБ/км, нечувствительно к ЭМП);
 - Ethernet (CAT5e для данных и PPS).

CAT5e: витая пара (4 пары, 100 Ом импеданс), BW до 100 МГц, расстояние <100 м для Gigabit (TIA-568). Для LVDS-PPS: дифференциальная передача ($V_{diff} = 250\text{--}400$ мВ, подавление синфазных помех >60 дБ) по паре (например, контакты 1–2) с терминатором 100 Ом.

Характеристики: skew <1 нс/100 м, джиттер <50 пс (экранированная версия для EMI).
- Принцип: электрические импульсы (LVDS для PPS: время фронта <1 нс, частота до 100 МГц) или оптические импульсы ($\lambda = 1310/1550$ нм, скорость 10–100 Gbps). Для multi-stack: daisy-chain или звезда.

Беспроводные каналы связи:

- Wi-Fi (802.11n/ac/ax): скорость до 1 Gbps, радиус <100 м, мощность ~100–500 мВт. Для демонстраций: 2,4/5/6 ГГц, MCS до 1024-QAM. Задержка <10 мс, но нестабильно в remote-зонах.
- LoRa (Long Range): CSS-модуляция, частоты 433/868/915/2400 МГц (ISM), BW 7,8–500 кГц, spreading factor 7–12. Скорость 0,3–50 kbps, дальность 5–15 км LOS, <5 км в скалах. Path loss:

$$L = 32,4 + 20 \log d + 20 \log f,$$

где d в км, f в МГц.

Мощность <100 мВт (TX 14–27 dBm), duty cycle <1 % (нормативы ЕС). Ошибки <1 % с FEC. В 2025: LoRaWAN с ML для massive IoT (до 1000 узлов/км²).

- Zigbee (802.15.4): радиус 10–100 м, mesh-топология, скорость 250 kbps при 2,4 ГГц, мощность <50 мВт. Используется как fallback в плотных сетях indoor.

мВт. Используется как fallback в плотных сетях indoor.

- Принцип: радиоволны (CSS для LoRa, O-QPSK для Zigbee). Протокол: CBOR/Protobuf (сжатие >50 %), ACK+retransmit (таймаут 1–10 с).

GPS-синхронизация и fallback:

- GPS: 1PPS (TTL/LVDS-импульс шириной 10–100 мс, каждую секунду), точность <1 мкс. Протокол NMEA (\$GPRMC для UTC). Для outdoor: 1PPS сбрасывает локальный счётчик, опорная частота 10/20 МГц обеспечивает стабильность (фазовый шум <−100 dBc/Hz @10 Гц).
- IRIG-B: временной код (100 бит/с, кадр 1 с), ШИМ (2/5/8 мс для 0/1/index). Точность <1 мкс. Интерфейс RS-422/BNC, дистанция <1 км.
- Атомные часы: Rb/Cs, дрейф <10^{−11}/с (например, mRO-50 Rb: точность <5·10^{−11}, мощность <5 Вт). Allan deviation $\sigma_y(\tau) < 10^{-12}$ при 1 с.
- Принцип: 1PPS/IRIG-B задаёт начало отсчёта для локального таймера:

$$ts = PPS_{\text{count}} + \text{fine_ticks}.$$

4. Какие технологии используются?

- Кабели: витая пара (CAT5e: 24 AWG, перекрёстные помехи <−40 дБ @100 МГц); оптоволокно (SMF, потери <0,2 дБ/км).
- Беспроводные: LoRa (SX1276, CSS с BW/SF); Zigbee (CC2530, DSSS); Wi-Fi (ESP32, OFDM).
- Синхронизация: GPS (u-blox NEO-M8, 1PPS джиттер <50 нс); IRIG-B (модули B12x); Rb-часы (mRO-50, ADEV <5·10^{−11}).
- 2025: LoRaWAN с ML-routing; гибрид GPS+5G для urban.

5. Сколько компонентов нужно?

- Кабели: 1–2 на стек (CAT5e для PPS и данных), 3–6 для multi-stack.
- Беспроводные: 1 модуль/стек (LoRa + fallback).
- Синхронизация: 1 GPS/IRIG-B/атомный модуль или master.

6. Из чего состоят компоненты?

- Кабели: медные пары (CAT5e: 4 пары, изоляция PVC/PE), коннекторы (RJ45/M12).
- Беспроводные: RF-трансивер (SX1276: PA+LNA, кварц 32 МГц), антенна (whip/PCB).
- Синхронизация: GPS-приёмник (LNA+антенна), IRIG-B декодер (FPGA-логика), Rb-часы (vapor cell + laser).

7. Стоимость компонентов

- CAT5e: ~0,5–1 USD/м.
- LoRa (SX1276): ~5–10 USD.
- GPS (u-blox): ~20–50 USD.
- IRIG-B модуль: ~50–200 USD.
- Rb-часы: ~500–1000 USD (миниатюрные).

8. Дополнительные вычисления и особенности

- Задержка: LoRa ~1–10 с/пакет ($T_{\text{air}} = \frac{8 + PL}{DR}$, где PL — payload, DR — data rate); CAT5e <1 мкс/100 м.
- Точность синхронизации: GPS <1 мкс; IRIG-B <1 мкс; Rb-holdover <1 нс/ч.
- RX-чувствительность для LoRa:

$$RX_{\text{sens}} = -174 + 10 \log(BW) + NF + SNR_{\text{req}},$$

где $SNR_{\text{req}} = -20$ дБ для SF12.

- Power budget:

$$TX + G_{\text{ant}} - L_{\text{path}} > RX_{\text{sens}}.$$

- Особенности 2025: LoRa с AI для подавления шумов; квантовые часы для стабильности $<10^{-15}$. В проекте: dual-radio для устойчивости, SD-буфер >1 ГБ для оффлайн-работы.

Реконструкция и визуализация: Подробное техническое описание

Реконструкция и визуализация — это алгоритмический и программный уровень системы мюонного томографа, где сырые данные о треках мюонов (timestamps, позиции, ToT) преобразуются в 3D-карту плотностей/аномалий объекта, а затем отображаются в интерактивном интерфейсе. Реконструкция использует томографические алгоритмы для инверсии задачи рассеяния/поглощения мюонов, а визуализация — графику для представления результатов (e.g., воксельные модели, срезы). Это ПО работает на ноутбуке/сервере/планшете (локально или в облаке), с фокусом на real-time обработку для полевых применений. По состоянию на сентябрь 2025 года, ключевые advancements включают интеграцию ML для denoising и суперразрешения (e.g., U-Net/GANs на реальных датасетах), гибридные алгоритмы с геоматическими данными (GPR/LiDAR) и adaptive reconstruction для limited-view CT, что улучшает качество изображений на 30–50 % в археологии и геологии. Эффективность повышена благодаря GPU/edge computing, а momentum-dependent реконструкция обеспечивает более точный material ID в ядерной безопасности.

1. Что это?

Реконструкция — математическая инверсия: из траекторий мюонов (углы, энергии) восстанавливается распределение плотности $\rho(x, y, z)$ объекта.

Визуализация — рендеринг этой карты в 2D/3D (срезы, volume rendering).

Pipeline: fast live (backprojection) → iterative (SIRT/ART) → ML-post (денойзинг).

Формат входа: события $\{ts, pos, \theta, \varphi, ToT\}$;

выход: воксельная сетка (например, $100 \times 100 \times 100$ вокселей, 3–10 см).

В 2025: adaptive voxelization и generative AI для моделирования сценариев (например, «риск обвала»).

2. Для чего используется?

- **Реконструкция:** Построение 3D-изображения пустот/аномалий (например, камеры в пирамидах, руды в шахтах) без разрушения. Улучшение: ML для суперразрешения (разрешение < 1 см из noisy data).
- **Визуализация:** Интерактивный просмотр (срезы XY/XZ/YZ, тепловые карты, threshold sliders) для анализа археологами/геологами. В ядерной безопасности — детекция материалов по отклонению (MST).
- **Применения:** Archaeology (hidden chambers); geology (voids/faults); nuclear (fuel debris).

3. Как работает?

Pipeline преобразования от raw треков к 3D-модели:

вход — N треков ($\theta, \varphi, pos, energy$);

выход — распределение плотности

$$\rho(r) = \int \mu(r) dr,$$

где μ — коэффициент поглощения/рассеяния.

- **Fast live (ray-driven backprojection):**

Для каждого мюона ray-sum обновляет воксели:

$$\rho_v = \sum \frac{w_i}{L_i},$$

где w_i — вес (1 для simple, ToT для energy-weighted), L_i — путь в вокселе.

Быстрое отображение (секунды для demo), но артефакты. Реализация: NumPy/Numba.

- **Iterative (ART/SIRT):**

ART:

$$\rho^{k+1} = \rho^k + \lambda \frac{A^T(b - A\rho^k)}{\|A\|^2},$$

где A — проекционная матрица (ray paths), b — измерения (углы/ToT), λ — relaxation (0.1–1).

Сходимость за 10–50 итераций, но шум.

SIRT:

$$\rho^{k+1} = \rho^k + \lambda \frac{A^T (b - A\rho^k)}{A^T \mathbf{1}}.$$

Лучше для ограниченных углов.

Регуляризация: TV (total variation) или Tikhonov.

В 2025: momentum-integrated PoCA для учёта рассеяния:

$$\theta_{\text{scatter}} \sim \frac{\sqrt{X/X_0}}{p},$$

где p — импульс мюона, X_0 — radiation length.

- **ML-постобработка:** U-Net/TFLite для denoising и суперрезолуции; GANs для генерации симуляций; кластеризация для detection masks.
- **Визуализация:** Web UI (Three.js, shaders, heatmaps), срезы (XY/XZ/YZ), экспорт (PNG/PLY), AR-оверлей через Unity.

4. Какие технологии используются?

- Реконструкция: Python (NumPy/SciPy, Numba, TomoPy), C++/CUDA для GPU.
- ML: TensorFlow Lite, PyTorch, Geant4 datasets.
- Визуализация: Three.js/WebGL для 3D, PyQtGraph для desktop.
- В 2025: adaptive ART для limited-view, fusion с геоданными (GPR/LiDAR).

5. Сколько компонентов нужно?

- Реконструкция: 3–4 модуля (backproj, iterative, ML, fusion).
- Визуализация: 1 UI + 2–3 экспорта.
- Для системы: 1 сервер (RPi/laptop), многопоточность для multi-stack.

6. Из чего состоят компоненты?

- Реконструкция: алгоритмы (matrix ops, optimizers), voxel grids (ndarray).
- Визуализация: JS-lib (Three.js: Scene/Camera/Renderer), HTML/CSS для UI.

7. Стоимость компонентов

- ПО: open-source (NumPy, SciPy, Three.js free).
- ML-training: cloud GPU ~ 100–500 USD.
- Hardware: laptop/server 500–2000 USD.

8. Дополнительные вычисления и особенности

- Параметры: voxel size 3–10 см, итераций 10–50 до $\text{error} < 10^{-3}$.
- Расчёты: для $N = 10^5$ треков, $M = 10^6$ вокселей: ART complexity $O(NM)$, ~minutes на CPU, seconds на GPU.
- TV-регуляризация:

$$\nabla \rho = \sum \sqrt{(\rho_x - \rho_{x+1})^2 + \varepsilon}.$$

- Особенности 2025: multi-orientation tomography (several views → +accuracy), momentum-dependent recon для material discrimination, 3D reactor imaging.

Таким образом, реконструкция и визуализация образуют связанный модуль, который объединяет математические алгоритмы, ML-модели и графические интерфейсы для превращения сырых событий мюонного трекера в понятные и практически полезные 3D-карты структуры объекта.

Приложения

1. Сравнение с аналоговыми методами

Критерий	MuoVis	Рентген / Гамма-сканирование	Бурение / Отбор проб	УЗ-/Сейсмо-методы
Принцип	Естественные мюоны	Ионизирующее излучение	Физическое проникновение	Волновые методы
Неразрушающий	✓	✓	✗	✓
Требует источника излучения	✗	✓	✗	✗
Глубина проникновения	>10 м	1–3 м	без ограничений	1–5 м
Разрешение (плотность)	Высокое на больших объектах	Хорошее на малых	Очень высокое	Среднее
Риск для оператора	Низкий	Средний–Высокий	Средний	Низкий
Мобильность	Высокая	Ограниченная	Низкая	Средняя
Влияние окружающей среды	Незначительное	Среднее	Значительное	Высокое

2. Стоимость построения системы

а) Базовая конфигурация MuoVis (1 блок)

Компонент	Кол-во	Цена за единицу, EUR	Сумма, EUR
Детекторный стек (2 сцинтиллятора + SiPM)	1	450	450
FPGA + TDC модуль	1	350	350
Корпус и монтаж	1	150	150
Питание (LiFePO ₄ 50 Ah)	1	200	200
Коммуникация (LoRa/Wi-Fi)	1	70	70
Кабели, кронштейны, мелкие элементы	–	80	80
Итого (блок)	–	–	1 300

в) Система из 4 блоков (полевой комплект)

Компонент	Кол-во	Цена за единицу, EUR	Сумма, EUR
4 × Muoscope 3.0 блок	4	1 300	5 200
Централизованная обработка	1	400	400
Защитные кейсы	4	100	400
Документация и лицензии	–	–	200
Итого (комплект)			6 200

3. Стоимость годового обслуживания

Показатель	Значение (EUR)	Обоснование
Регулярная калибровка	300	Раз в год
Замена расходников	150	SiPM, кабели
Поддержка ПО	250	Обновления, баг-фиксы
Полевое обслуживание	300	Логистика, настройка
Итого/год	1 000	

4. Экономическая выгода (ROI)

Показатель	Рентген/Бурение	MuoVis
Стоимость обследования	20 000 EUR	6 200 EUR
Время на обследование	5–10 дней	1–3 дня
Риск аномалий после	Средний	Низкий
Стоимость простой	2 000 EUR/день	500 EUR/день

Показатель	Традиционные методы	MuoVis
Бурение проб	15 000 EUR	0 EUR
Время	>10 дней	2–4 дня
Повреждение объекта	Вероятно	Никакое
Репутационный риск	Средний	Низкий

5. Срок службы ключевых компонентов

Компонент	Срок службы	Комментарий
Сцинтилляторы	10+ лет	Низкий износ
SiPM фотодетекторы	7–10 лет	Требуют защиты от температур
FPGA + TDC электроника	8–12 лет	Перепрошивка, обновления
LiFePO ₄ аккумулятор	5–8 лет	300–500 циклов
Корпус / крепёж	15+ лет	УФ-стабильные материалы