

MuoVis

Sistem revoluționar de tomografie cu muoni pentru scanarea non-distructivă a obiectelor mari

1. Explicație clară — ce este și cum funcționează

MuoVis — este un dispozitiv care „translucește” obiecte mari fără distrugere, folosind radiația cosmică naturală.

Ce anume se folosește?

Din cosmos pe Pământ cad constant particule — **muoni**.

Muonul — este o particulă elementară, asemănătoare electronului, dar de ~200 de ori mai grea.

Datorită energiei mari (1–10 GeV) muonii trec prin:

- roci muntoase
- beton
- metal
- clădiri
- containere

Tocmai această proprietate se folosește pentru scanare.

De unde → unde merge semnalul

1. Cosmos → Pământ

Muonii se nasc la interacțiunea razelor cosmice cu atmosfera.

2. Obiect → Detector

Muonii trec prin obiectul cercetat.

Dacă în interior există goluri sau material dens — traiectoria se schimbă puțin.

3. Detector → Electronică

Scintilatoarele fixează fulgerul de lumină.

Silicon Photomultiplier înregistrează fotonii.

FPGA și TDC măsoară timpul și coordonatele.

4. Electronică → Procesarea datelor

Algoritmii reconstruiesc traiectoriile și construiesc harta 3D a densităților.

5. Procesare → Utilizator

Sistemul arată:

- goluri ascunse

- incluziuni dense
- zone potențial periculoase
- anomalii ale structurii

2. Ce face sistemul în final?

MuoVis permite:

- descoperirea camerelor ascunse în obiecte arheologice
- găsirea golurilor în mine
- verificarea containerelor pentru prezența materialelor dense
- analizarea stării podurilor și tunelurilor
- lucru în zone greu accesibile cu ajutorul dronelor

Tomograf cu muoni

Problemă

Cercetările monumentelor arheologice, obiectelor geologice, infrastructurii, securității nucleare și industriei se confruntă cu bariere:

- Abordare non-distructivă: nu se poate găuri/distruge în movile, piramide, containere nucleare sau poduri — riscuri de deteriorare/contaminare.
- Acces limitat: obiecte în munți, sub pământ, tropice sau zone periculoase (mine, reactoare), fără tehnică grea.
- Dezavantaje ale metodelor tradiționale: radare (GPR) slabe în roci dense; raze X/CT nu pentru scări mari; detectoare vulnerabile în condiții extreme.
- Cost ridicat/complexitate: sistemele muonice existente (de exemplu, de la KEK sau Ideon) voluminoase, scumpe (10k+ USD) și nu universale pentru monitorizare real-time în securitate/mining.
- Lipsă de dinamică: analogii statici, fără AI-predicții sau integrare mobilă (drone).

Soluție: MuoVis — Tomograf universal revoluționar cu muoni pentru arheologie, geologie, securitate nucleară și industrie

Sistemul fixează muonii cosmici în stive modulare Micromegas/RPC, sincronizează timpul, reconstruiește traiectoriile și construiește harta 3D a densităților/anomaliilor.

Îmbunătățiri revoluționare:

- Hibrid cu GPR/LiDAR/SAR pentru fuziunea datelor; MST pentru detecție nucleară.
- AI real-time (U-Net/GANs) cu analiză predictivă (de exemplu, „risc de prăbușire”).
- Integrare drone/roboți pentru scanare dinamică.
- Open-source cu crowdsourcing de date pentru rețea globală.
- Îmbunătățiri: readout dublu, coincidențe FPGA + TDC, modul LoRa cu buffer SD, ceasuri atomice/IRIG-B, carcasă IP67, LED self-test, optică Cherenkov pentru energie.

Arhitectură (straturi)

- Modul detector (hit): Panou Micromegas/RPC (16×16 cm) → amestec de gaz → TIA → discriminator → TDC → FPGA (readout, decodor, filtru, LoRa/SD).
- Sincronizare: Ceasuri atomice + IRIG-B (indoor/outdoor), GPS/INS pentru drone.
- Colectare date: FPGA/MCU împachetează evenimente → gateway RPi Zero scrie în SQLite → cloud pentru crowdsourcing.
- Reconstrucție: Backprojection real-time → SIRT/Kalman → AI-denoising/predicție (U-Net/GANs pe reale+sintetice).
- Mobilitate: Montare pe drone (UAV cu RPC) sau roboți crawling pentru dinamică.
- Mecanică/energie: Casete modulare IP67, adaptoare drone, LiFePO4 50 Ah + solare/MPPT, DC-DC (12→5V), HV pentru Micromegas.

Detalii bloc (detaliat)

A) Detector muoni (panou)

- Element sensibil: Micromegas pentru superprecizie ($<1^\circ$) + RPC fallback pentru portabilitate; amestec de gaz + optică Cherenkov pentru energia muonilor. Readout dublu pentru poziții/MST (deviație pentru materialele nucleare).
- Readout: Electrozi $\rightarrow$ TIA $\rightarrow$ discriminator $\rightarrow$ ToT pentru energie.
- Compensare temperatură: Senzor temperatură + DAC.
- Self-test: Injector LED.
- Alimentare: Boost local 12 $\rightarrow$ HV, monitorizare.

B) Mini-stivă / geometrie și TDC

- Mini-stivă: 2–3 straturi Micromegas/RPC, baseline 50 cm pentru rezoluție $\leq 1^\circ$.
- Coincidență: FPGA iCE40 cu algoritmi MST.
- TDC: TDC7200 (1 ns).
- Format: {ts, id, hit_mask, pos, ToT, energy, deviation}.

C) Colectare date și comunicare

- MCU/gateway: RP2040 + RPi Zero.
- Format: Protobuf + CRC, blockchain pentru securitatea datelor.
- Transport: LoRa pentru câmp (5–10 km), Zigbee fallback, buffer SD; API pentru crowdsourcing.
- Rețea: Offline/online, batch în cloud (AWS/GCP).

D) Reconstrucție și tomografie

- Pipeline: Backprojection real-time $\rightarrow$ SIRT/Kalman $\rightarrow$ AI (U-Net/GANs) pentru denoising/predicții (de exemplu, risc de prăbușire).
- Parametri: Voxeluri adaptive 0.5–5 cm.
- Fusion: GPR/LiDAR/SAR + MST pentru hibrid (îmbunătățire 50–70%).
- UI: Unity AR (interactiv 3D, AR-overlay, alerte predictive pe tabletă).

E) Alimentare și termo

- Pachet energie: LiFePO4 50 Ah, 24–48 h, solare cu MPPT; baterii drone pentru UAV.
- DC-DC: 12 $\rightarrow$ 5V, filtre.
- Monitorizare: PMIC + prognoză.
- Căldură: Radiatoare pasive.

Mecanică și implementare

- Casetă: Aluminiu 20 $\times$ 20 $\times$ 5 cm, IP67, greutate <5 kg; adaptoare drone-mount (compatibile DJI).
- Cadru: Trepiede pliabile + șasiu robot pentru crawling.
- Plasare: 4–8 stive, dinamic cu drone/roboți; opțiune borehole pentru mining.

Sincronizare / calibrare

- Mod: Ceasuri atomice/IRIG-B + GPS/INS pentru drone.

- Autocalibrare: LED + muoni (5–10 min).
- Autoprag: <50 Hz/canal.
- Ajustare: Software + date hibride.

Proгноză flux și înregistrare

- Suprafață: ~256 cm² → ~500–1000 traectorii/min (îmbunătățit Micromegas).
- Coincidențe: 100–200 evenimente/min/stivă.
- Demo: Gol/anomalie în minute; real — monitorizare real-time.

PO și algoritmi

- Firmware: Verilog pentru FPGA, C++ pentru MCU; edge-AI pe RPi.
- Protocol: Protobuf, retransmit; API pentru crowdsourcing.
- Server/GUI: Python + Unity AR; GANs pentru scenarii.
- ML: U-Net/GANs, antrenare pe Geant4 + reale (de exemplu, datasets vulcani/mining).

Securitate și EMC

- Izolație HV, indicatori; dozimetrie pentru operatori.
- Decuplare, ferite, teste EMC; blockchain pentru date.

Motive pentru îmbunătățiri (scurt)

- Micromegas/Cherenkov: Superprecizie + energie pentru MST<nuclear security="">>.</nuclear>
- AI predictiv: Alerte real-time, noutate pentru stabilitate.
- Drone/roboți: Dinamică în zone inaccesibile.
- Open-source: Rețea globală, ca în AGEMERA.

BOM (pentru un stivă 2-straturi, versiune revoluționară)

- Panouri Micromegas/RPC: 2 buc (~300 USD/buc).
- Plăci readout + Cherenkov: 2 buc (~150 USD).
- FPGA iCE40 + RP2040: 1 set (~50 USD).
- LoRa (SX1276): 1 buc (~10 USD).
- Ceasuri atomice/IRIG-B: 1 buc (~100 USD).
- RPi Zero: 1 buc (~20 USD).
- LiFePO4 50 Ah + MPPT: 1 set (~200 USD).
- Carcasă IP67 + adaptor drone: ~150 USD.
- Modul GPR/LiDAR: ~500 USD.

- Chip AI (edge): ~100 USD. Total: ~1500–2000 USD/stivă (economie vs analogi, dar + pentru revoluționar).

Metrici de succes

- Rezoluție unghiulară: $\leq 1^\circ$.
- Stabilitate: ± 1 mV/°C.
- Propus: ≥ 1000 evenimente/min.
- Autonomie: 24–48 h (drone — 1–2 h zbor).
- Demo: Anomalie/risc în minute cu predicție.

Aplicații alternative

- Arheologie: Camere ascunse în piramide.
- Geologie/Mining: Goluri/mine cu borehole.
- Securitate nucleară: Detecție materiale în containere/MST.
- Infrastructură: Poduri/tuneluri pentru stabilitate.
- Subacvatice/extreme: Roboți pentru baze.

Riscuri și mitigări

- Statistică: Creștere stive/drone, accelerare AI.
- Temperatură: Compensare + monitorizare.
- Comunicare: SD + retransmit.
- EMC: Ferite, teste.
- Scală: Open-source + parteneriate.
- Reglementări: Certificare IAEA pentru nuclear.

Explicație a funcționării

muonii pătrund prin obiect, Micromegas/RPC fixează hituri/deviații, FPGA/TDC pun metici, LoRa trimite la RPi/cloud. AI reconstruiește 3D real-time cu predicții, hibrid GPR/LiDAR/SAR îmbunătățește precizia. Drone/roboți adaugă dinamică. Rețea open-source — monitorizare globală. Pentru arheologie — non-distructiv; pentru securitate — detecție amenințări nucleare; pentru mining — mapare minereuri.

Scintilator: Descriere tehnică detaliată

Scintilatorul — este componenta cheie a detectorului de tomografie cu muoni, care transformă energia particulelor ionizante (în acest caz, muonii cosmici) în lumină vizibilă (fotoni). În sistemul tomografului cu muoni scintilatorul fixează trecerea muonului, generând un semnal luminos, care apoi este captat de fotodetectoare (de exemplu, SiPM). Mecanismul principal — scintilația: excitarea electronilor în material de către muon duce la relaxarea lor cu emisia de fotoni. Eficiența este determinată de ieșirea luminoasă (light yield), timpul de atenuare (decay time), lungimea de undă a emisiei, densitatea și rezistența la radiație.

În arhitectura originală a proiectului se recomandă folosirea scintilatoarelor plastice (de exemplu, BC-408 sau EJ-200) pentru portabilitate și cost, sau cristaline (NaI(Tl), CsI(Tl)) pentru eficiență înaltă. Mai jos este o descriere tehnică detaliată, bazată pe specificații standard și aplicații în detectoarele cu muoni. Mă bazez pe date de la producători (Eljen Technology, Saint-Gobain) și publicații științifice privind detectoarele cu muoni. Pentru tomografia cu muoni parametrii cheie sunt: ieșirea luminoasă ~8-70% de la antracen (standard), timp de răspuns 1-5 ns pentru plastice și 230-250 ns pentru cristaline, și rezoluția energiei, depinzând de mărime și geometrie.

1. Scop și principiu de funcționare

Scintilatorul transformă energia cinetică a muonului (de obicei 1-10 GeV în aplicații de suprafață) în fotoni din gama vizibilă. Procesul:

- Ionizare și excitație: muonul pierde energie prin ionizarea atomilor materialului, creând perechi electron-gol. Pierderea de energie este descrisă de formula Bethe-Bloch:

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

unde:

- z — sarcina muonului ($= 1$),
- e — sarcina electronului,
- N_A — numărul Avogadro,
- ρ — densitatea materialului,
- m_e — masa electronului,
- $\beta = v/c, \gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$,
- I — potențialul mediu de ionizare (pentru plastic ~65 eV, pentru NaI ~450 eV).

Pentru muoni cu energie ~4 GeV:

$$\frac{dE}{dx} \approx 2 \text{ MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)$$

Aceasta corespunde generării de ordine

$$10^4 - 10^5 \text{ fotoni/MeV}$$

- **Emisie:** Electronii excitați relaxează, emițând fotoni. Ieșirea luminoasă (LY) se măsoară în fotoni/MeV sau % de la antracen (standard: 100% ~38 000 fotoni/MeV pentru neutroni).
- **Înregistrare:** Fotonii sunt colectați de ghiduri de lumină fibroase (WLS) sau direct de fotodetectoare. În tomografia cu muoni este important să minimizăm zonele moarte și să asigurăm rezoluție unghiulară $<5^\circ$ pentru urmărire.
- **Aplicație în tomografie:** Scintilatoarele se folosesc în straturi (mini-stive) pentru înregistrarea traiectoriilor muonilor. Densitatea fluxului de muoni pe Pământ $\sim 10^2$ muoni/m²/s, deci pentru un panou de 0.3 m² (~300 cm²) se așteaptă ~30–300 traectorii/min, în funcție de geometrie și altitudine.

2. Tipuri de scintilatoare

Se recomandă două clase: plastice (pentru compactitate și cost) și cristaline (pentru eficiență înaltă). Alegerea depinde de balanța între ieșirea luminoasă, cost și rezistență.

2.1. Scintilatoare plastice (de exemplu, BC-408, EJ-200, EJ-212)

Material: polistiren (PST) sau poliviniltoluen (PVT) cu aditivi (p-terfenil + POPOP pentru fluorescență).

Densitate ~1.05–1.06 g/cm³, Z efectiv ~5.8 (scăzut, dar suficient pentru muoni >1 GeV). Non-

Caracteristici tehnice (EJ-200 ca exemplu):

- Ieșire luminoasă: 10 000–10 400 fotoni/MeV (64% de la antracen), ~8–10% de la maximul teoretic (pentru 1 MeV electron). Formula eficienței:

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

unde E_{dep} — energie depusă. Pentru muoni ~10–15% de la NaI(Tl) din cauza Z scăzut, dar suficient pentru urmărire (energie proxy prin ToT).

- Timp de atenuare: componenta principală ~2.1–3 ns (răspuns rapid pentru fluxuri înalte), cu coadă ~10–20 ns.

Forma completă a impulsului:

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

Potrivit pentru coincidențe în fereastră <10 ns.

- Lungime de undă emisiei: vârf ~423 nm (albastru), gamă 380–490 nm. Coeficient de refracție $n = 1.58$, lungime de atenuare (attenuation length) >3.8 m (pierderi minime în plăci până la 1 m).
- Densitate și dimensiuni: 1.023 g/cm³. Geometrii tipice: plăci 300×100×10 mm sau bare 300×20×10 mm (segmentate pentru poziționare). Suprafață acoperire: 10–15 cm²/detector pentru sensibilitate optimă; pentru sistemă 1000 m² — ~10–20 m² material.
- Rezistență: rezistență la radiație > 10⁴ rad (fără degradare semnificativă LY). Interval temperatură: -20...+50 °C (LY cade cu ~1%/°C peste 20 °C). Mecanică: duritate Shore D=75, nu fragil.
- Eficiență energetică: ~10% pentru muoni 1–10 GeV (din cauza Z scăzut, muoni particule minim ionizante, MIP). Cost: 50–150 USD/m² pentru plăci de bază.

Comparare cu alte plastice (de exemplu, BC-408):

- BC-408: LY = 10 000 fotoni/MeV (64% antracen), $\tau = 2.1$ ns, vârf 425 nm, lungime atenuare 2.1 m, densitate 1.032 g/cm³. Mai bun pentru panouri mari (>1 m), dar atenuare lumină mai scurtă.
- EJ-212 (subțire): LY = 9 200 fotoni/MeV, $\tau = 2.4$ ns, pentru aplicații rapide (de exemplu, timing în tomografie).

Aplicații în tomografia cu muoni: plastice preferate pentru sisteme portabile din cauza ușurinței (greutate ~1 kg/panou) și costului. În proiecte precum COSMIC (tracker muoni) se folosesc bare segmentate cu fibre WLS (Kuraray Y-11, Ø1 mm) pentru colectarea luminii, crescând uniformitatea de 2–3 ori.

Colectare lumină: creștere până la 3× cu WLS (wavelength-shifting fibers). În sisteme cu bare triunghiulare (triangular strips) rezoluție poziție ~1 mm, pentru reconstrucție 3D prin backprojection sau SIRT.

2.2. Scintilatoare cristaline (de exemplu, NaI(Tl), CsI(Tl))

Material: cristale neorganice cu dopanți (Tl pentru activare). Z înalt (NaI: $Z_{\text{eff}} \approx 50$, CsI: $Z_{\text{eff}} \approx 54$), densitate 3.67–4.51 g/cm³, igroscopice (necesită etanșare). Eficiență mai bună pentru gamma/muoni cu energie joasă.

NaI(Tl) (iodură de sodiu cu talu):

- Ieșire luminoasă: 38 000–41 000 fotoni/MeV (100% antracen), ~30–60% teoretic. Eficiență: $\eta \approx 45$ fotoni/keV. Neproporționalitate: LY cade cu ~20% sub 100 keV din cauza quenching.
- Timp de atenuare: componenta principală ~230–250 ns (exponențială: $\tau = 250$ ns), cu componente ~1 ms și 12 ms (dependente de temperatură). Formula:

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

- Lungime de undă: vârf 415 nm (compatibil cu bialcaline PMT), gamă 300–550 nm. $n = 1.85$, coeficient atenuare ~0.1–0.2 cm⁻¹.
- Densitate și dimensiuni: 3.67 g/cm³. Cristale 3×3 – 20×20 cm, grosime 5–10 mm.

Pentru tomografie: plăci 10×10 cm², ~10–100 m² pentru sisteme mari (cost 500–1500 USD/m²).

- Rezistență: rezistență la radiație ~10³ rad (degradare LY >10%).

Interval temperatură: -20...+50 °C (LY maxim la 25 °C, cadere ~0.3%/°C).

Igroscopic (similar NaCl), necesită carcasă aluminiu.

- Eficiență energetică: ~60% pentru gamma/muoni (Z înalt).

Rezoluție energie: 5.4–7% FWHM la 662 keV (cu SiPM).

CsI(Tl) (iodură de cesiu cu talu):

- Ieșire luminoasă: 54 000–65 000 fotoni/MeV (~165% NaI(Tl)), vârf 550 nm (verde, optim pentru SiPM/PD).

Neproporționalitate: variază după ionizare (componente rapide/lente pentru PSD).

- Timp de atenuare: 3–5 ns (componenta rapidă), principală ~680 ns + 3.3 μs (depinde de particulă: τ scurt pentru gamma, lung pentru alfa).

Afterglow: 0.05–0.39% la 20 ms (scăzut pentru tomografie).

- Lungime de undă: vârf 550 nm, gamă 350–700 nm.

$n = 1.79$, coeficient atenuare $\sim 0.05 \text{ cm}^{-1}$.

- Densitate și dimensiuni: 4.51 g/cm^3 . Cristale/masive 1D/2D (pixeli 1–2 mm), grosime 5–10 mm.

Pentru tomografie: masive 485 pixeli cu WLS.

- Rezistență: rezistență la radiație $>10^3 \text{ rad}$.

Mecanică: fără clivaj, duritate 2 după Mohs.

Slab igroscopic (mai bun decât NaI).

- Eficiență energetică: $\sim 70\%$ (Z înalt).

Rezoluție: 4.8–7% FWHM la 662 keV.

3. Procesul de înregistrare și parametri adiționali

- Absorbție muoni: muon (MIP) generează $\sim 10^4$ fotoni/cm în plastic, ~ 3 ori mai mult în cristale.

Semnal: $\sim 10^3$ – 10^4 fotoelectroni/MeV cu PMT/SiPM (amplificare 10^6 – 10^8).

- Regim temperatură: pentru NaI(Tl)/CsI(Tl) LY maxim la 20–25 °C, cadere 0.3–1%/°C. Plastic mai stabil ($\sim 0.1\%/^{\circ}\text{C}$).
- Rezistență la radiație: plastic $>10^4 \text{ rad}$, cristale $\sim 10^3 \text{ rad}$ (degradare de la centre Tl).
- Calcule: pentru acoperire 1000 m^2 — 10–20 m^2 plastic (5–15k USD) sau 50–100 m^2 cristale (25–150k USD).

Densitate muoni: $100 \text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, înregistrare $\sim 10^2/\text{m}^2/\text{s}$.

În tomografia cu muoni plasticele sunt preferate pentru sisteme de câmp (mai ieftine, mai ușoare), cristalinele — pentru precizie înaltă (de exemplu, securitate nucleară). Pentru proiect se recomandă combinarea cu WLS pentru poziționare; țintă — rezoluție 1–5 ns pentru TDC.

- Ieșire luminoasă: 10 000–10 400 fotoni/MeV (64% de la antracen), ~ 8 –10% de la maximul teoretic (pentru 1 MeV electron). Formula eficienței:

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

unde E_{dep} — energie depusă. Pentru muoni ~ 10 –15% de la NaI(Tl) din cauza Z scăzut, dar suficient pentru urmărire (energie proxy prin ToT).

- Timp de atenuare: componenta principală ~ 2.1 –3 ns (răspuns rapid pentru fluxuri înalte), cu coadă ~ 10 –20 ns.

Forma completă a impulsului:

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

Potrivit pentru coincidențe în fereastră <10 ns.

- Lungime de undă emisiei: vârf ~423 nm (albastru), gamă 380–490 nm. Coeficient de refracție $n = 1.58$, lungime de atenuare (attenuation length) >3.8 m (pierderi minime în plăci până la 1 m).
- Densitate și dimensiuni: 1.023 g/cm³. Geometrii tipice: plăci 300×100×10 mm sau bare 300×20×10 mm (segmentate pentru poziționare). Suprafață acoperire: 10–15 cm²/detector pentru sensibilitate optimă; pentru sistemă 1000 m² — ~10–20 m² material.
- Rezistență: rezistență la radiație > 10⁴ rad (fără degradare semnificativă LY). Interval temperatură: -20...+50 °C (LY cade cu ~1%/°C peste 20 °C). Mecanică: duritate Shore D=75, nu fragil.
- Eficiență energetică: ~10% pentru muoni 1–10 GeV (din cauza Z scăzut, muoni particule minim ionizante, MIP). Cost: 50–150 USD/m² pentru plăci de bază.

Comparare cu alte plastice (de exemplu, BC-408):

- BC-408: LY = 10 000 fotoni/MeV (64% antracen), $\tau = 2.1$ ns, vârf 425 nm, lungime atenuare 2.1 m, densitate 1.032 g/cm³. Mai bun pentru panouri mari (>1 m), dar atenuare lumină mai scurtă.
- EJ-212 (subțire): LY = 9 200 fotoni/MeV, $\tau = 2.4$ ns, pentru aplicații rapide (de exemplu, timing în tomografie).

Aplicații în tomografia cu muoni: plastice preferate pentru sisteme portabile din cauza ușurinței (greutate ~1 kg/panou) și costului. În proiecte precum COSMIC (tracker muoni) se folosesc bare segmentate cu fibre WLS (Kuraray Y-11, Ø1 mm) pentru colectarea luminii, crescând uniformitatea de 2–3 ori.

Colectare lumină: creștere până la 3× cu WLS (wavelength-shifting fibers). În sisteme cu bare triunghiulare (triangular strips) rezoluție poziție ~1 mm, pentru reconstrucție 3D prin backprojection sau SIRT.

2.2. Scintilatoare cristaline (de exemplu, NaI(Tl), CsI(Tl))

Material: cristale neorganice cu dopanți (Tl pentru activare). Z înalt (NaI: $Z_{\text{eff}} \approx 50$, CsI: $Z_{\text{eff}} \approx 54$), densitate 3.67–4.51 g/cm³, igroscopice (necesită etanșare). Eficiență mai bună pentru gamma/muoni cu energie joasă.

NaI(Tl) (iodură de sodiu cu taliiu):

- Ieșire luminoasă: 38 000–41 000 fotoni/MeV (100% antracen), ~30–60% teoretic. Eficiență: $\eta \approx 45$ fotoni/keV. Neproporționalitate: LY cade cu ~20% sub 100 keV din cauza quenching.
- Timp de atenuare: componenta principală ~230–250 ns (exponențială: $\tau = 250$ ns), cu componente ~1 ms și 12 ms (dependente de temperatură). Formula:

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

- Lungime de undă: vârf 415 nm (compatibil cu bialcaline PMT), gamă 300–550 nm. $n = 1.85$, coeficient atenuare ~0.1–0.2 cm⁻¹.
- Densitate și dimensiuni: 3.67 g/cm³. Cristale 3×3 – 20×20 cm, grosime 5–10 mm.

Pentru tomografie: plăci 10×10 cm², ~10–100 m² pentru sisteme mari (cost 500–1500 USD/m²).

- Rezistență: rezistență la radiație $\sim 10^3$ rad (degradare LY $>10\%$).

Interval temperatură: $-20\dots+50$ °C (LY maxim la 25 °C, cadere $\sim 0.3\%/^{\circ}\text{C}$).

Igrosopic (similar NaCl), necesită carcasă aluminiu.

- Eficiență energetică: $\sim 60\%$ pentru gamma/muoni (Z înalt).

Rezoluție energie: 5.4–7% FWHM la 662 keV (cu SiPM).

CsI(Tl) (iodură de cesiu cu talu):

- Ieșire luminoasă: 54 000–65 000 fotoni/MeV ($\sim 165\%$ NaI(Tl)), vârf 550 nm (verde, optim pentru SiPM/PD).

Neproportionalitate: variază după ionizare (componente rapide/lente pentru PSD).

- Timp de atenuare: 3–5 ns (componenta rapidă), principală ~ 680 ns + 3.3 μs (depinde de particulă: τ scurt pentru gamma, lung pentru alfa).

Afterglow: 0.05–0.39% la 20 ms (scăzut pentru tomografie).

- Lungime de undă: vârf 550 nm, gamă 350–700 nm.

$n = 1.79$, coeficient atenuare ~ 0.05 cm $^{-1}$.

- Densitate și dimensiuni: 4.51 g/cm ^{3} . Cristale/masive 1D/2D (pixeli 1–2 mm), grosime 5–10 mm.

Pentru tomografie: masive 485 pixeli cu WLS.

- Rezistență: rezistență la radiație $>10^3$ rad.

Mecanică: fără clivaj, duritate 2 după Mohs.

Slab igrosopic (mai bun decât NaI).

- Eficiență energetică: $\sim 70\%$ (Z înalt).

Rezoluție: 4.8–7% FWHM la 662 keV.

3. Procesul de înregistrare și parametri adiționali

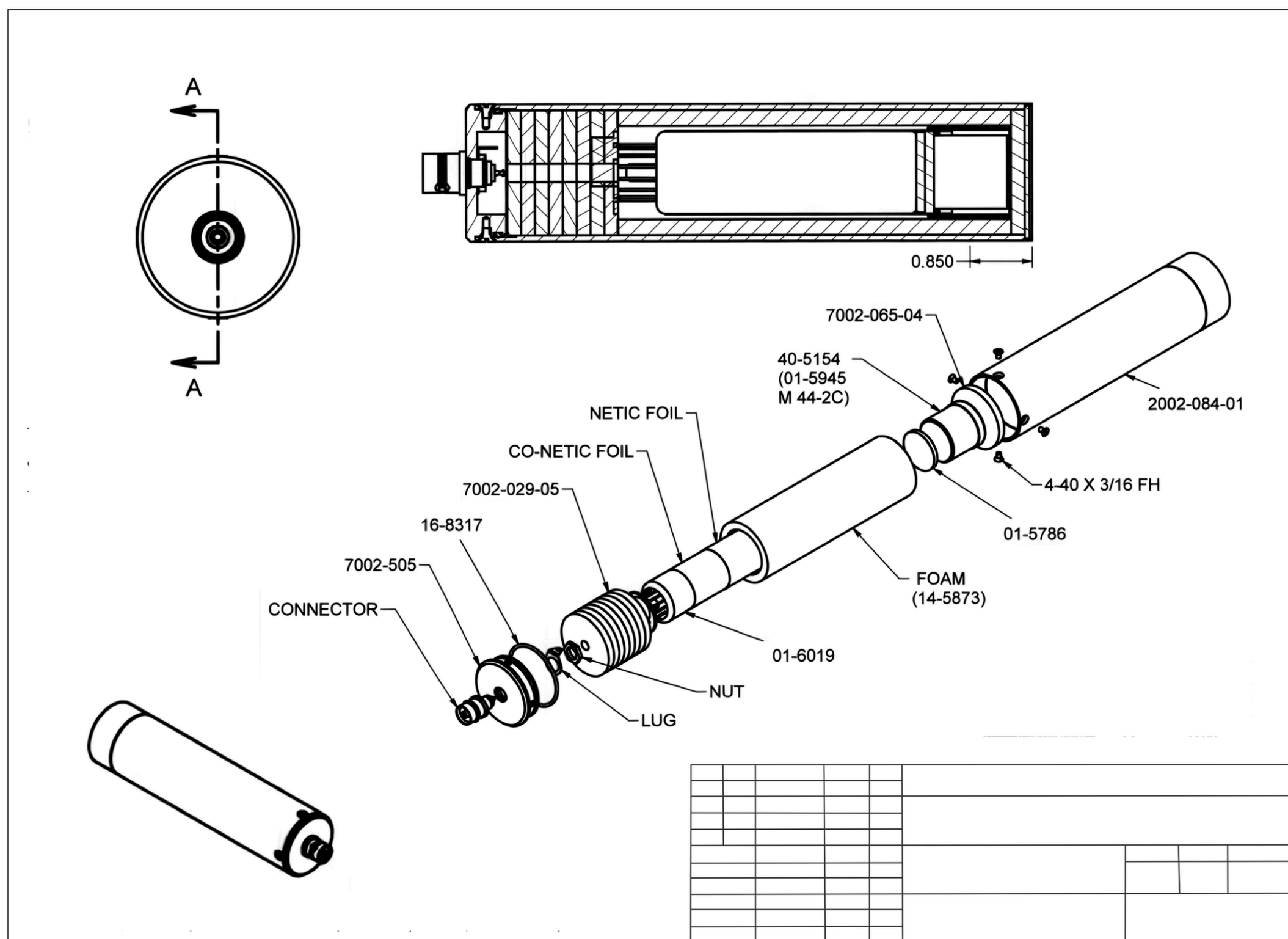
- Absorbție muoni: muon (MIP) generează $\sim 10^4$ fotoni/cm în plastic, ~ 3 ori mai mult în cristale.

Semnal: $\sim 10^3$ – 10^4 fotoelectroni/MeV cu PMT/SiPM (amplificare 10^6 – 10^8).

- Regim temperatură: pentru NaI(Tl)/CsI(Tl) LY maxim la 20–25 °C, cadere 0.3–1%/°C. Plastic mai stabil ($\sim 0.1\%/^{\circ}\text{C}$).
- Rezistență la radiație: plastic $>10^4$ rad, cristale $\sim 10^3$ rad (degradare de la centre Tl).
- Calcule: pentru acoperire 1000 m ^{2} — 10–20 m ^{2} plastic (5–15k USD) sau 50–100 m ^{2} cristale (25–150k USD).

Densitate muoni: 100 m $^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, înregistrare $\sim 10^2$ /m ^{2} /s.

În tomografia cu muoni plasticele sunt preferate pentru sisteme de câmp (mai ieftine, mai ușoare), cristalinele — pentru precizie înaltă (de exemplu, securitate nucleară). Pentru proiect se recomandă combinarea cu WLS pentru poziționare; țintă — rezoluție 1–5 ns pentru TDC.



Fotodetectoare (SiPM): Descriere tehnică detaliată

Fotodetectoare de tip SiPM (Silicon Photomultipliers, fotomultiplicatoare de siliciu) — sunt dispozitive solide bazate pe fotodiode avalanche (APD), funcționând în mod Geiger (Geiger-mode APD, GM-APD). Ele sunt destinate pentru înregistrarea semnalelor optice slabe de la scintilatoare, transformând fotonii în semnal electric cu amplificare înaltă.

SiPM constau dintr-un masiv de micropixeli (SPAD — single-photon avalanche diodes), conectați în paralel, ceea ce asigură sensibilitate înaltă la fotoni unici. În tomografia cu muoni SiPM capturează lumina de la scintilatoare (de exemplu, 10^3 – 10^4 fotoni pe un hit muon), generând un impuls proporțional pentru evaluarea energiei și timpului.

SiPM depășesc tuburile fotomultiplicatoare tradiționale (PMT) în compactitate, tensiune joasă de alimentare (30–50 V față de 1–2 kV la PMT), rezistență la câmpuri magnetice și cost. Dezavantaje — zgomot termic înalt (dark count rate, DCR) și crosstalk optic.

După starea din august 2025, piața SiPM crește: volum — 146–152 mln USD (2024–2025), prognoză — 208–240 mln USD până în 2030 (CAGR 6–8 %). Dezvoltarea este asigurată de îmbunătățirea rezistenței la radiație (pentru LHC/CMS), rezoluției temporale (<50 ps) și aplicațiilor în LiDAR, securitate nucleară și tomografie medicală.

1. Ce este?

SiPM reprezintă propriu masiv de mii de micropixeli (SPAD), fiecare fiind o fotodiodă avalanche în mod Geiger.

- Suprafață activă: de la $1 \times 1 \text{ mm}^2$ la $6 \times 6 \text{ mm}^2$ (sau mai mult în masive).
- Material: siliciu (Si), cu tranziție n-p sau p-n.
- Caracteristici cheie:
 - coeficient de eficiență cuantică a înregistrării fotonilor (PDE) — până la 50–65 % (în 2025 îmbunătățit până la 70 % în modele pentru LiDAR);
 - amplificare $G = 10^5 - 10^7$ $G \approx 10^5 - 10^7$;
 - rezoluție temporală — <50 ps (în 2025 atinse 20–30 ps pentru sarcini ToF);
 - cont termic (DCR) — 10^5 – $10^6 \text{ s}^{-1} \text{ mm}^{-2}$ la 25 °C.

2. Pentru ce se folosește?

- Transformarea luminii de la scintilatoare în semnal electric (muoni, gamma, neutroni).
- Cont precis de fotoni: PDE >50 % în gama 420–450 nm (scintilator BC-408).
- În tomografia cu muoni: determinarea poziției, timpului și energiei hitului după amplitudinea impulsului.
- În proiectele CMS (CERN): lucru în condiții de radiație $>10^{14} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$ (upgrade 2025).
- Alte aplicații: LiDAR (transport autonom, explorare minieră), PET/MRT (medicină), securitate nucleară.

3. Cum funcționează SiPM?

Structura.

- Dimensiune micropixeli — 10–100 μm .
- Coeficient de umplere (fill factor) — 50–80 %.
- Fiecare SPAD echipat cu rezistor de stingere.
- Număr subpixeli — de la 100 la 10^4 .

Regim Geiger.

Tensiune de polarizare:

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

unde $V_{\text{over}} = 1 - 5 \text{ V}$, iar $V_{\text{breakdown}} \approx 25 - 30 \text{ V}$.

La absorbția fotonului ($h\nu > E_g \approx 1,1 \text{ eV}$) apare pereche electron-gol, care inițiază avalansa.

Amplificare:

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

unde $C_{\text{cell}} \approx 50 - 100 \text{ fF}$, q — sarcină electron.

Valoare tipică $G \approx 10^6$ la $V_{\text{over}} = 3 \text{ V}$.

Sumare impulsuri.

Sarcină ieșire:

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

unde N_{ph} — număr fotoni.

Pentru $N_{\text{ph}} = 10^3$: $Q_{\text{out}} \sim 10^9 - 10^{10}$ electroni (amplitudă 1-10 mV pe 50 Ohm).

Caracteristici temporale.

- Timp recuperare: $\tau_{\text{rec}} = R_q \cdot C_{\text{cell}} \approx 10 - 100 \text{ ns}$.
- Jitter:

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

valoare <50 ps (2025 — până la 20-30 ps).

Zgomot.

- DCR — $10^5\text{--}10^6\text{ s}^{-1}\cdot\text{mm}^{-2}$.
- Crosstalk optic (OCT) — 5-20 %.
- Afterpulsing — 1-10 %.

Eficiență.

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

unde $QE \approx 80 - 90\%$ în gama 400-500 nm.

Valoare finală PDE = 40-65 % (în 2025 — până la 70 %).

4. Ce tehnologii se folosesc?

- Fotodiode de siliciu (structură N-on-P sau P-on-N).
- Procese compatibile CMOS (0,13-0,35 μm), acoperiri antireflex.
- Tehnologie trench-izolație (OCT <5 %).
- Stingere activă și pasivă a avalanșei (AQ <10 ns, PQ $\approx$ 50 ns).
- Alimentare — 25-70 V.
- Consum energie — 30-50 $\text{mW}\cdot\text{mm}^{-2}$.
- Producători: Hamamatsu (S13360), ON Semiconductor (MicroFJ), KETEK (PM33xx), AdvanSiD.

5. Câți SiPM în proiect

- Un bar scintilator (3-5 cm^2): 4-16 SiPM.
- Mini-stivă (3 straturi, 5 bare): 30-120 SiPM.
- Suprafață totală acoperire: 100-150 mm^2 .
- Sistem complet (3-6 stive): 100-500 SiPM.

6. Din ce constă SiPM?

- Masiv SPAD cu tranziție p-n (adâncime 10-20 μm).
- Sistem amplificare (rezistori sau tranzistori de stingere).
- Scheme electronice (ieșire analogică/digitală, TDC/ADC în SiPM digitale).
- Carcasă: ceramică sau plastică, cu fereastră de sticlă.
- Dimensiuni: 3×3 – 6×6 mm, grosime $\approx$ 1 mm.

7. Cost SiPM

- Hamamatsu S13360 (3×3 mm): 50–150 USD.
- ON Semi MicroFJ-30035 (3×3 mm): 60–120 USD.
- KETEK PM3350 (3,5×3,5 mm): 40–100 USD.
- Achiziții masive: reducere 20–50 %.

- Versiuni rezistente la radiație: +50–100 %.

8. Calcule adiționale și particularități

Zgomot.

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

Cont termic dublează fiecare 7–10 °C.

Timp răspuns.

- Timp creștere: 1–5 ns.
- Durată impuls: 10–50 ns.
- Pentru metoda ToT:

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

Exemplu calcul.

Pentru hit muon ($N_{\text{ph}} = 1000$, PDE = 50 %, $G = 10^6$):

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

Raport semnal/zgomot:

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

Poziționare.

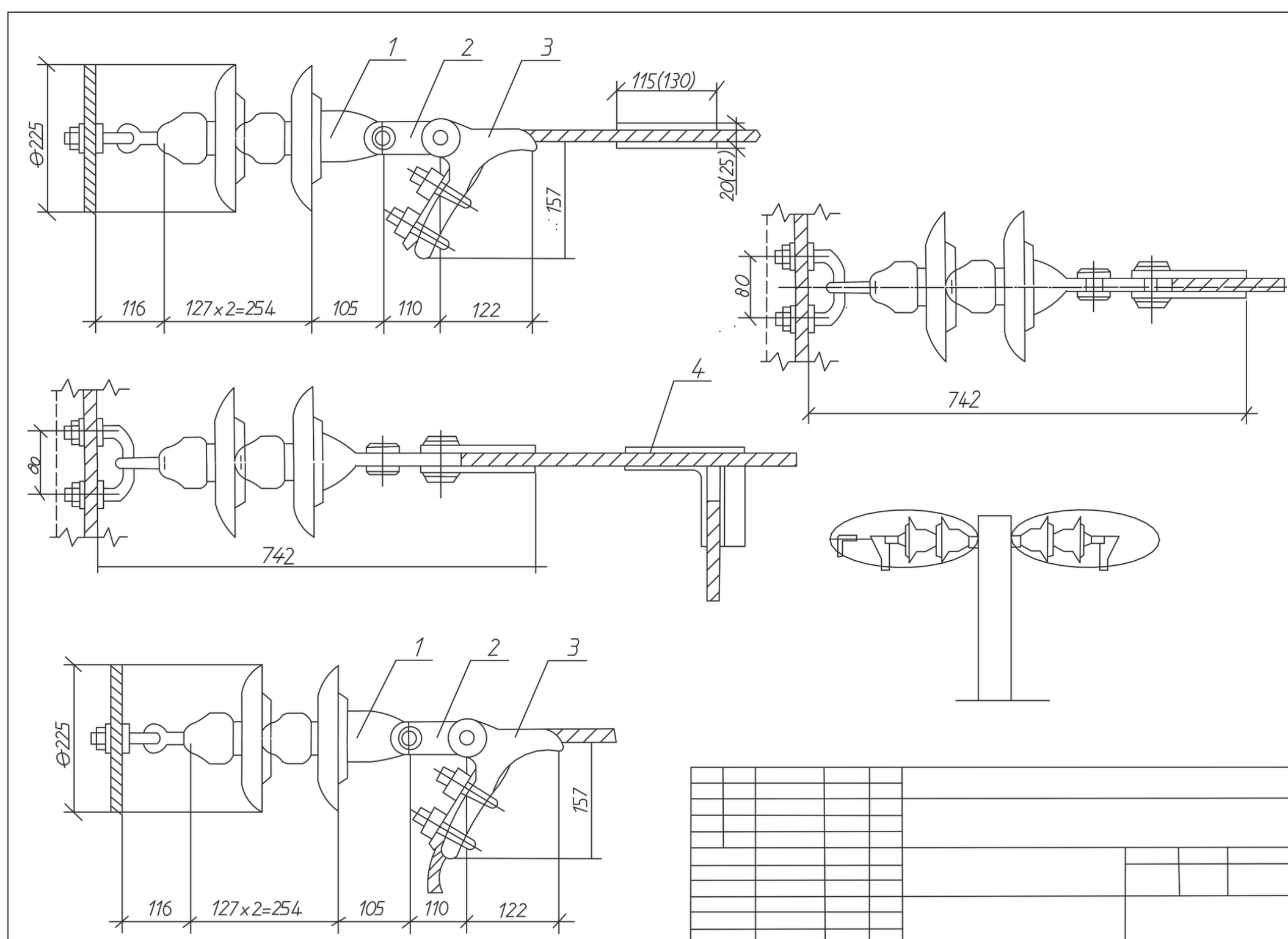
Pentru două SiPM pe fibră:

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

unde $\alpha \approx 0,01 - 0,05 \text{ cm}^{-1}$ — coeficient atenuare fibră.

Parametri exemplu pentru proiect:

- Dimensiune: 3×3 mm².
- PDE: 50-60 % (420-450 nm).
- Amplificare: $G = 10^6$.
- DCR: <1 MHz·mm⁻².
- Timp răspuns: 10-50 ns.
- Preț: 50-150 USD.



Tranzistor analog: Descriere tehnică detaliată

Tranzistorul analog (analog front-end, AFE) — este lanțul de componente electronice care procesează semnalul brut de la fotodetectoare (SiPM) înainte de digitalizare. Include amplificatoare (de exemplu, amplificatoare transimpedanță, TIA), comparatoare/discriminatoare (pentru detecție prag) și schemă de înaltă tensiune (HV-scheme) pentru alimentare SiPM. Scop — amplifică semnal slab (milivolți/nanosecunde), reduce zgomotul, măsoară amplitudine/timp și pregătește pentru TDC/ADC (0.1–5 V). În tomografia cu muoni AFE este critic pentru urmărire precisă: rezoluție temporală <10 ns, gamă dinamică 10^0 – 10^4 fotoni, zgomot scăzut (SNR >20 dB). După starea din august 2025, avansurile se concentrează pe ASIC low-power (circuite integrate specifice aplicației) pentru detectoare portabile, cu integrare în masive SiPM pentru imagistică muoni în securitate nucleară și geologie. Zgomot redus până la <1 fA/√Hz, consum energie <10 mW/canal în designuri noi pentru sisteme TOF (time-of-flight).

1. Ce este?

Tranzistorul analog — secvență de lanțuri: TIA pentru transformare curent în tensiune, preamp/shaper pentru filtrare, comparator pentru declanșare și schemă HV pentru alimentare stabilă SiPM ($V_{bias} = 25 - 70$ V). Acest AFE minimizează jitter ($\sigma_t < 50$ ps), compensează derive termice și asigură liniaritate pentru ToT (time-over-threshold) ca proxy-energie. În sisteme portabile (e.g., detectoare muoni) AFE se integrează în ASIC pentru compactitate, ca în Cosmo ArduSiPM (2024–2025: PCB cu AFE pentru SiPM, low-noise <1 pA/√Hz).

2. Pentru ce se folosește?

- **Amplificatoare:** Crește amplitudinea semnalului de la SiPM (curent ~1–10 mA pe avalanșă) până la niveluri pentru ADC/TDC (0.1–5 V). Reduce zgomotul (electronic noise influence) pentru rezoluție single-photon.
- **Comparatoare:** Detectează evenimente peste prag, generând impulsuri TTL/LVDS pentru coincidențe. Folosite pentru CFD (constant fraction discriminator) pentru timing <10 ns.
- **Schemă HV:** Asigură tensiune înaltă stabilă pentru mod Geiger al SiPM, cu compensare (temperatură, aging). În tomografia cu muoni AFE critic pentru rezoluție pozițională (~1 mm) și energetică (ToT proxy pentru dE/dx).
- **Aplicații:** detectoare particule (CMS/LHC) pentru readout SiPM; masive muoni portabile pentru imagistică (low-power <5 mW/canal); spectrometre masă ion TOF (2025 ASIC: <1 ns timing).

3. Cum funcționează?

AFE procesează impuls de la SiPM (lățime 10–50 ns, amplitudine 1–100 mV).

- Amplificatoare (TIA/Preamps):
- TIA transformă curent I_{in} în tensiune V_{out} :

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

unde R_f — rezistor feedback (1–10 kOhm).

- Bandă de trecere:

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

unde C_f — capacitate pentru stabilitate (pole-zero compensation).

- Zgomot:

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

unde v_n — zgomot tensiune opamp ($\sim 1\text{--}5$ nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$).

- Preamp/shaper: filtru CR-RC ($\tau_{shape} \sim 10\text{--}100$ ns):

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

unde Q — sarcină de la SiPM.

SNR:

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

- Comparatoare/discriminatoare:
- Compară V_{in} cu V_{th} (prag de la DAC, 1–100 mV). ieșire: TTL/LVDS dacă $V_{in} > V_{th}$.
- Timp răspuns: $t_{prop} < 10$ ns.
- CFD: $V_{th} = f \cdot V_{peak}$, $f = 0.2\text{--}0.5$.
- Schemă HV (High Voltage):
- Generează $V_{bias} = 30\text{--}70$ V din 5–12 V.
- DC-DC boost:

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

unde D — duty cycle PWM.

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

4. Ce tehnologii se folosesc?

- Amplificatoare: opamp low-noise (OPA211: $v_n = 1.1$ nV/ $\sqrt{1\text{ Hz}}$, $I_n = 0.1$ pA/ $\sqrt{1\text{ Hz}}$).
- Comparatoare: CMOS high-speed (TLV3501: slew rate >100 V/ μs).
- HV: convertore DC-DC (LM2623, freq 1.3 MHz); DAC pentru fine-tune (rezoluție 10–50 mV).

5. Câți componente nevoie?

- Amplificatoare: 1–2/canal (TIA + preamp). Pentru 4–16 SiPM/detector — 4–32.
- Comparatoare: 1/canal (pentru declanșare). Pentru multicanale: chipuri quad (LM339 ×4).
- HV: 1/grup SiPM (sau per-channel pentru compensare).

6. Din ce constau componentele?

- Amplificatoare: opamp (BJT/MOSFET), R/C pentru feedback, filtre (LC pentru EMI).
- Comparatoare: Perechi diferențiale tranzistori, rezistori histerezis.
- Schemă HV: MOSFET/IGBT, inductori/transformatoare, diode Schottky, LDO.

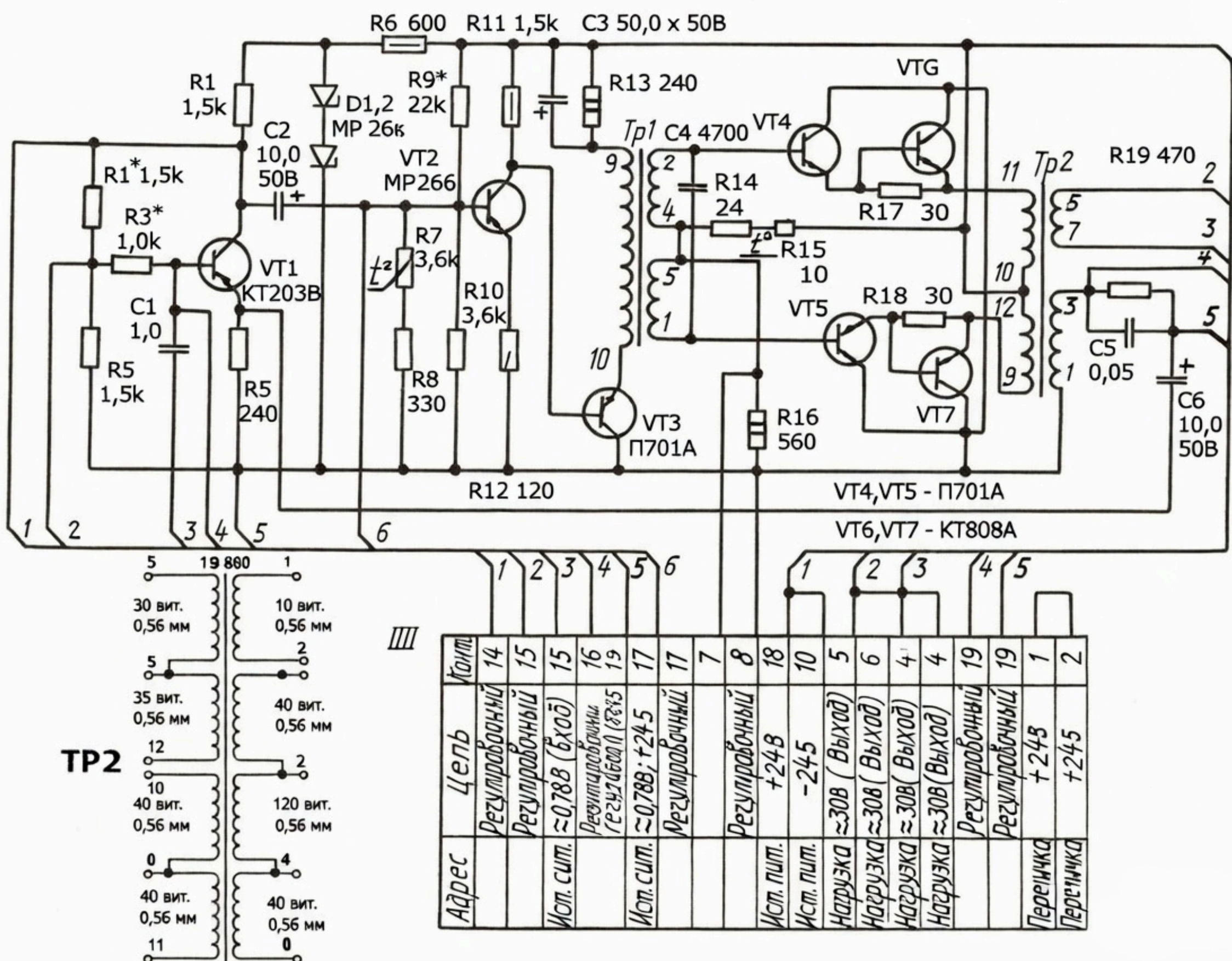
7. Cost componente

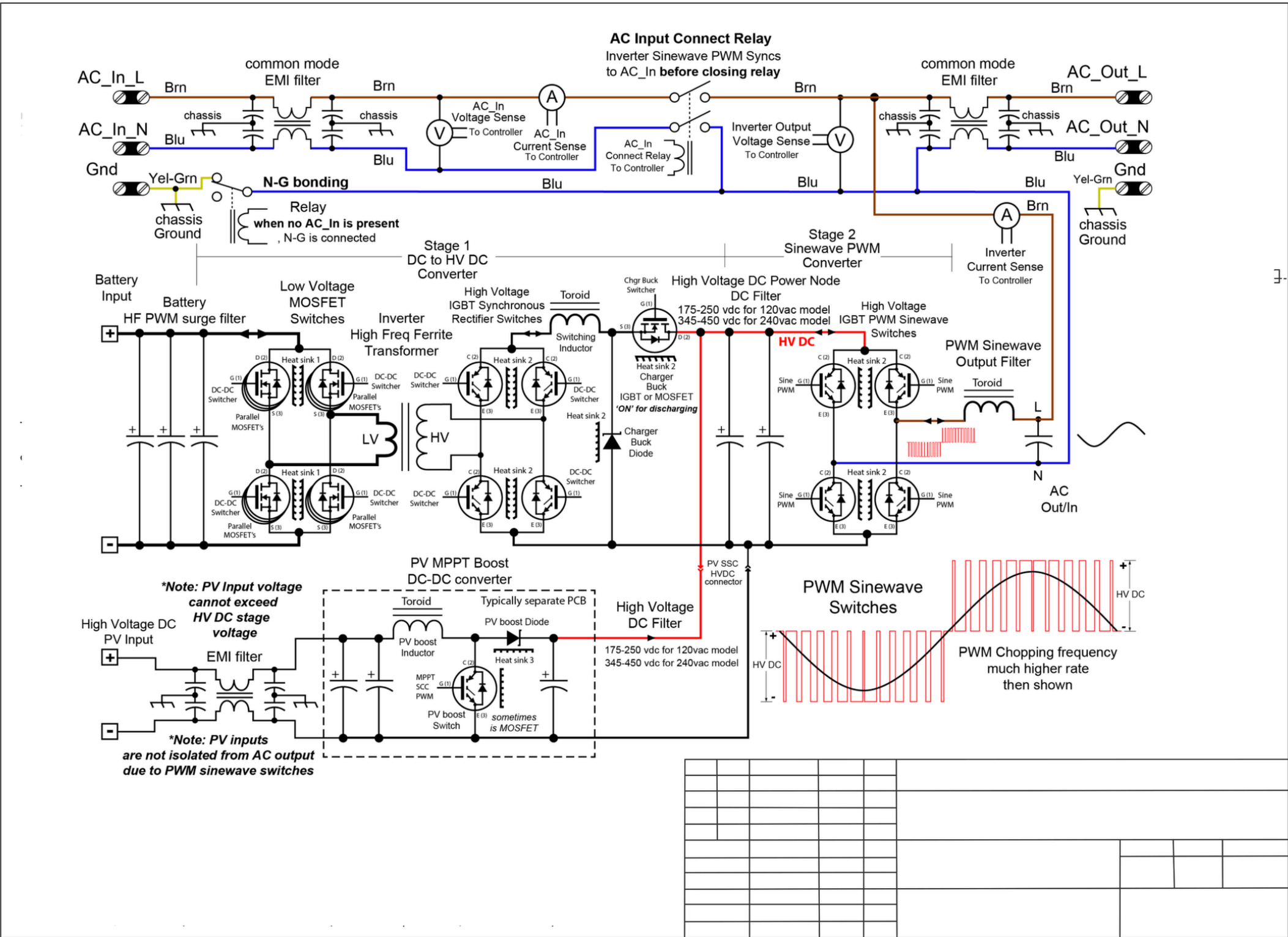
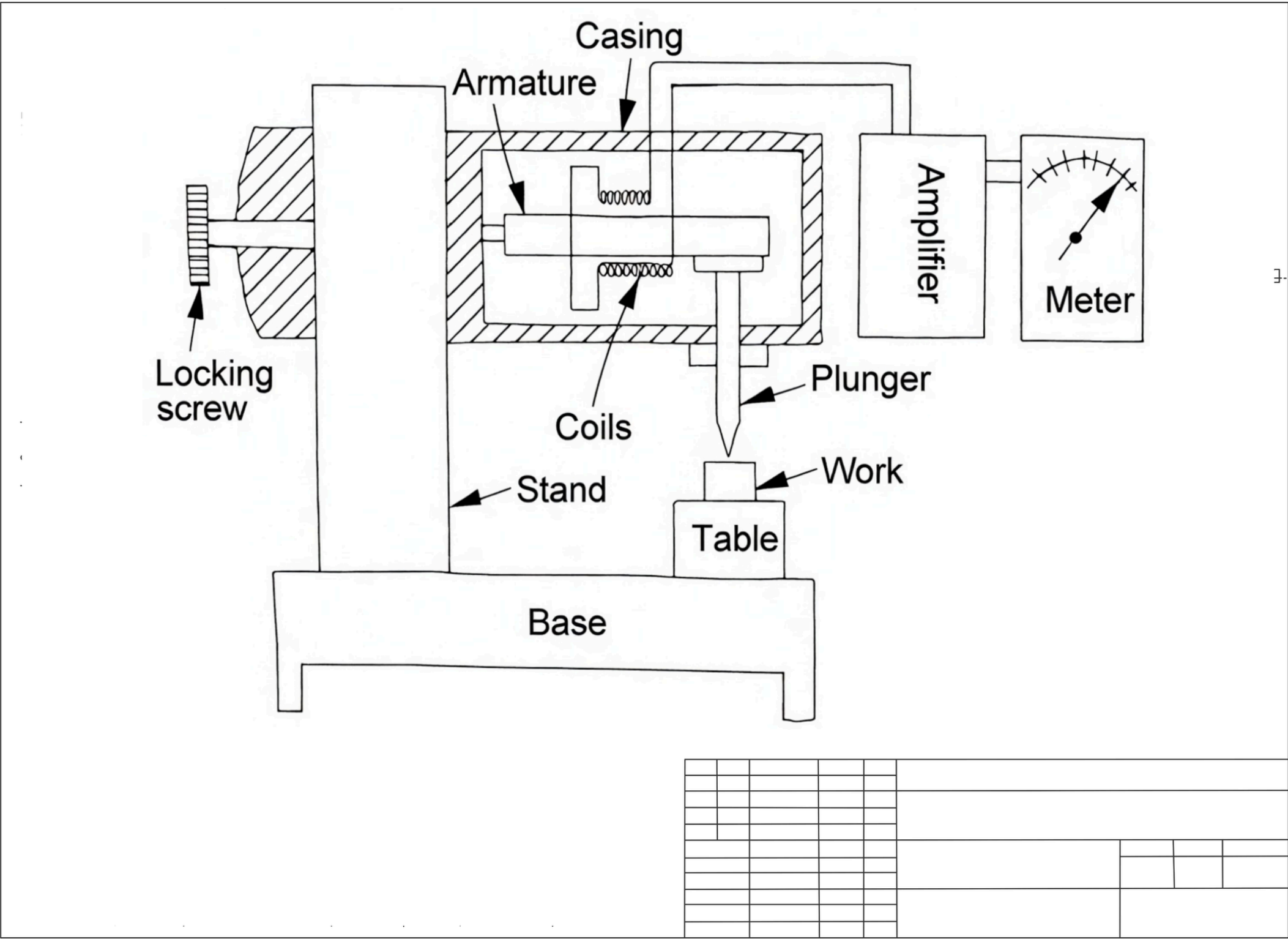
- Amplificatoare: OPA211 ~5–10 USD.
- Comparatoare: LM339 ~1–3 USD; high-speed ~5–15 USD.
- HV: LM2623 ~5–15 USD; HV9910 ~3–10 USD.
- AFE ASIC complet: ~20–50 USD/canal (2025: reducere pentru producție masă).

8. Calcule adiționale și particularități

- Stabilizare temperatură: $dV_{os}/dT < 1\mu V/^{\circ}C$.
- Timp răspuns: <50 ns pentru comparatoare; ENC <100 e⁻ pentru TIA.
- Calcul: la semnal $Q = 1$ pC:

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





Logică digitală: Descriere tehnică detaliată

Logica digitală în proiect — este blocul responsabil pentru procesarea semnalelor discretizate de la tranzistorul analog, setarea meticilor temporale (timestamps) și formarea evenimentelor pentru reconstrucție ulterioară.

Componente cheie: TDC (Time-to-Digital Converter, convertor timp în cod digital), FPGA (Field-Programmable Gate Array, schemă integrată logică programabilă) și MCU (Microcontroller Unit, microcontroler).

Aceasta asigură legătură temporală precisă a hiturilor (rezoluție <5 ns), coincidențe (potrivire evenimente în straturi) și ambalare date pentru transmitere. În tomografia cu muoni logica digitală este critică pentru urmărire: rezoluție unghiulară $<5^\circ$ depinde de precizia temporală ($\Delta\theta \sim c \cdot \Delta t / \text{baseline}$, unde baseline — distanța între straturi ≈ 50 cm).

După starea din septembrie 2025, dezvoltările se concentrează pe FPGA low-power cu TDC încorporat (de exemplu, pentru detectoare muoni portabile în geologie și securitate nucleară) cu rezoluție <1 ns și integrare AI pentru filtrare on-chip. Consum energie redus la <50 mW/canal în chipuri noi pentru sisteme TOF (time-of-flight).

1. Ce este?

Logica digitală — combinație de hardware (FPGA/TDC) și software (firmware MCU) elemente pentru transformarea trigurilor analogice în evenimente digitale.

- TDC măsoară timp venire semnal (leading/trailing edges pentru ToT).
- FPGA procesează logica (coincidențe, filtre).
- MCU controlează sistemul (configurație, transmitere).

Format eveniment general: {timestamp (64-bit, ns-resolution), module_id, layer_mask, strip_id, ToT (energy proxy), temp}.

În 2025: digitalizare la nivel ASIC cu acceleratoare AI pentru validare track real-time.

2. Pentru ce se folosește?

- TDC: măsurare precisă Δt între start/stop (de exemplu, PPS și hit). Rezoluție 1–5 ns pentru legătură unghiulară $\sim 1\text{--}5^\circ$ ($\theta = \arctan(c \cdot \Delta t / d)$, unde d = baseline).
- FPGA: procesare paralelă (coincidențe <100 ns), buferizare, ML simplă (de exemplu, respingere zgomot). Pentru sisteme multicanale: până la 1000 canale/chip.
- MCU: control (praguri, calibrare), interfețe (I²C/SPI pentru HV-DAC), transmitere date. În tomografia cu muoni: filtrare evenimente (>200 /min/stivă), sincronizare cu GPS/IRIG-B.

Aplicații:

- fizică particule (CERN ATLAS/CMS: TDC în declanșatoare muoni),
- imagistică portabilă (geologie/mining: low-power FPGA pentru implementare de câmp),
- TOF-PET (medicină: <50 ps timing).

3. Cum funcționează?

Logica digitală transformă LVDS/TTL de la comparator în metici digitale.

Pipeline:

- TDC
- Principiu: măsoară Δt ca cod (de exemplu, delay-line sau bazat pe oscilator).
- Delay-line: lanț invertoare (rezoluție $\sim 10\text{--}50$ ps/element), cod = $N_{\text{delay}} \cdot \tau_{\text{delay}}$.
- Oscilator: contor tacturi ($f_{\text{ref}} = 1\text{--}10$ GHz), $t_s = N \cdot (1/f_{\text{ref}}) + \text{fine}$ (DLL/PLL pentru sub-ps).
- Compoziție: intrări start/stop, contor coarse (64-bit, 40 MHz pentru ~ 25 ns LSB), interpolator fine (Vernier delay line: $\Delta t_{\text{fine}} = \tau_1 - \tau_2 \approx 10$ ps).
- Rezoluție: $R = \text{LSB} / \sqrt{12} \approx 0.3 \cdot \text{LSB}$ pentru zgomot gaussian.
- Tipuri:
 - TDC7200 (TI: 55 ps LSB, gamă 12 ns–8 ms, putere 0.5 mW),
 - CAEN V1720 (12-bit ADC+TDC, 3.2 ps),
 - RP2040 PIO (quasi-TDC, 4–8 ns, low-cost).
- Neliniaritate: INL/DNL < 0.5 LSB (calibrare LUT).
- FPGA
 - Principiu: logică programabilă (LUTs, flip-flops) pentru procesare paralelă.
 - Coincidență: AND-gate pe hituri în straturi (fereastră $\pm 30\text{--}100$ ns).
 - Pachet evenimente: FIFO-buffer (ring buffer, 1–10k evenimente).
 - HDL (Verilog/VHDL):
always @(posedge clk)

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

- Procesare: Filtre Bayesian pentru zgomot, clasificator ML (lightweight NN pe LUTs pentru valid track vs noise).
- Clock: 100–500 MHz, latency < 10 μs .
- Tipuri: iCE40UP5K (Lattice: 5k LUTs, 120 kbit RAM, power < 50 mW, pentru low-cost muon); Xilinx Spartan-6 (50k LUTs, pentru logică complexă).
- MCU
 - Principiu: CPU pentru control (ISR pentru hituri, DMA pentru buffere).
 - Configurație: I²C pentru DAC/praguri.
 - Transmitere: UART/SPI la LoRa/SD.
 - Tipuri: RP2040 (dual Cortex-M0+, 133 MHz, PIO pentru custom TDC); STM32H7 (Cortex-M7, 480 MHz, FPU pentru calc).
 - Firmware: C/C++, ring buffer pentru ISR $<$ DMA.

4. Ce tehnologii se folosesc?

- TDC: delay-line (Vernier pentru < 10 ps), time-amplifier (TA pentru întindere Δt), ASIC (Nutt method: coarse+fine). În 2025 — hibrid TDC+ADC în one-chip pentru energy+time.
- FPGA: porți bazate CMOS (7–28 nm nodes), blocuri DSP pentru ML. Tools: IceStorm (open-source pentru iCE40), Vivado pentru Xilinx.

- MCU: ARM Cortex (M0/M4/M7), periferice (TIM pentru counters, DMA pentru high-rate). RTOS (FreeRTOS) pentru multitasking.

5. Câți componente nevoie?

- TDC: 1/canal (sau chip multi-channel, ca TDC7200 pentru 8 canale). În stive: 3–6.
- FPGA: 1/stivă (pentru 16–32 canale). Pentru sistem: 1–2.
- MCU: 1/stivă (sau central pentru multi-stack).

6. Din ce constau componentele?

- TDC: contori, linii delay (invertoare/chains), PLL/DLL, registre. Integrate: ADC pentru calib.
- FPGA: LUTs (4–6 inputs), FFs, BRAM (block RAM), pini I/O (LVDS pentru PPS).
- MCU: nucleu CPU, periferice (ADC/DAC/TIM), flash/RAM (256 kB–1 MB), interfețe (USB/Ethernet opțional).

7. Cost componente

- 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. Calcule adiționale și particularități

- Sincronizare:

$$t_s = PPS + ticks,$$

(64-bit counter, overflow ~584 ani). Dift <1 ppm cu OCXO (oven-controlled oscillator).

- Procesare erori: CRC32 pe evenimente, retransmit. Dead-time <1 % la 1 MHz rate.
- Calcule: pentru baseline 50 cm și $\Delta t = 5$ ns:

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

Propus: 200 evenimente/min la clock 100 MHz.

- Particularități 2025: AI pe FPGA (TensorFlow Lite pentru clasificare track), radiation-hard (SEU mitigation cu TMR — triple modular redundancy). În proiect: PIO-TDC ca fallback, HDL pentru logică custom.

Parametri exemplu: rezoluție TDC 1 ns, FPGA 16–32 canale @200 MHz, MCU 168 MHz cu 1 MB RAM.

Comunicare și sincronizare: Descriere tehnică detaliată

Comunicarea și sincronizarea — este subsistemul care asigură transmiterea datelor între modulele detectoarelor și coordonarea temporală precisă a evenimentelor (sincronizarea) în sistemul tomografului cu muoni. Include atât canale cu fir (cabluri, de exemplu CAT5e pentru semnale PPS), cât și fără fir (LoRa, Wi-Fi, Zigbee), precum și surse de sincronizare (GPS pentru outdoor, IRIG-B sau ceasuri atomice pentru indoor). Scop — asigurarea transmiterii low-latency a evenimentelor compacte (<100 bytes/eveniment) cu pierdere pachete <0,1 % și precizie temporală <10 ns pentru urmărire muoni (rezoluție unghiulară <5°). În condiții extreme (peșteri, tropice) accent pe rezistență: buffer offline (SD) și retransmitere. După starea din septembrie 2025, dezvoltarea rețelelor IoT subliniază abordări hibride: LoRa pentru comunicare low-power pe distanță lungă, cu integrare AI pentru optimizare (de exemplu, modulație adaptivă), și GPS/IRIG-B pentru sincronizare submicrosecundă în instrumente științifice. Consum energie minimizat (<10 mW pentru LoRa), cu luarea în considerare a compatibilității electromagnetice (EMC) pentru aplicații de câmp.

1. Ce este?

Subsistemul comunicării și sincronizării unește transportul datelor (cu fir și fără fir) și referințele temporale.

- Comunicare: transmitere cadre binare (de exemplu, Protobuf/CBOR cu CRC32) de la MCU la gateway/cloud.
- Sincronizare: legătură a timerelor locale la timp global (UTC) pentru corelare evenimente între module (coincidențe în fereastră $\pm 30\text{--}100\text{ ns}$).

Mod de lucru dual: outdoor (GPS 1PPS + 10/20 MHz) și indoor (master-PPS pe LVDS/CAT5e sau IRIG-B/ceasuri atomice). Format evenimente: {ts, id, data} cu confirmare (ACK) și retransmitere. În 2025 se observă integrare cu 5G/LTE pentru soluții hibride, dar focus rămâne pe low-power pentru sisteme remote (de exemplu, LoRa-mesh).

2. Pentru ce se folosește?

- Cabluri (comunicare cu fir): transmitere fiabilă pe distanțe medii (<100 m) cu latentă scăzută (<1 ms), pentru indoor/laboratoare (de exemplu, PPS pe LVDS pentru sincronizare <1 ns).
- Canale fără fir: pentru implementări de câmp (zone remote, fără cabluri), cu consum energie scăzut (de exemplu, LoRa pentru 5–10 km în roci), cu buferizare la pierdere legătură.
- GPS/sincronizare: legătură temporală absolută (precizie <1 μs) pentru corelare în sisteme multi-modul; fallback indoor pentru peșteri (ceasuri atomice/IRIG-B).
- Aplicații:
 - tomografie muoni — sincronizare traiectorii ($\Delta t < 5\text{ ns}$ pentru $\theta < 5^\circ$), transmitere ~200 evenimente/min/stivă;
 - securitate nucleară — alerte realtime;
 - geologie — monitorizare remote vulcani și extracție.

3. Cum funcționează?

Subsistemul are două moduri: high-speed (Wi-Fi pentru demonstrații) și fiabil (LoRa pentru condiții de câmp). Sincronizarea asigură referință globală pentru contori locali.

Canale cabluri comunicării:

- Tipuri:
- Coaxiale (RG-58/RG-6 pentru semnale HF, atenuare <0,5 dB/m la 1 GHz);
- Fibra optică (LC/SC, <0,2 dB/km, insensibil la EMP);
- Ethernet (CAT5e pentru date și PPS).

CAT5e: pereche torsadată (4 perechi, 100 Ohm impedanță), BW până la 100 MHz, distanță <100 m pentru Gigabit (TIA-568). Pentru LVDS-PPS: transmitere diferențială ($V_{diff} = 250 - 400$ mV, suprimare zgomote comune >60 dB) pe pereche (de exemplu, pini 1-2) cu terminator 100 Ohm.

Caracteristici: skew <1 ns/100 m, jitter <50 ps (versiune ecranată pentru EMI).

- Principiu: impulsuri electrice (LVDS pentru PPS: timp front <1 ns, frecvență până la 100 MHz) sau impulsuri optice ($\lambda = 1310/1550$ nm, viteză 10-100 Gbps). Pentru multi-stack: daisy-chain sau stea.

Canale fără fir comunicării:

- Wi-Fi (802.11n/ac/ax): viteză până la 1 Gbps, rază <100 m, putere ~100-500 mW. Pentru demonstrații: 2,4/5/6 GHz, MCS până la 1024-QAM. Întârziere <10 ms, dar instabil în zone remote.
- LoRa (Long Range): modulație CSS, frecvențe 433/868/915/2400 MHz (ISM), BW 7,8-500 kHz, spreading factor 7-12. Viteză 0,3-50 kbps, rază 5-15 km LOS, <5 km în roci. Path loss:

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

unde d în km, f în MHz.

Putere <100 mW (TX 14-27 dBm), duty cycle <1 % (norme UE). Erori <1 % cu FEC. În 2025: LoRaWAN cu ML pentru massive IoT (până la 1000 noduri/km²).

- Zigbee (802.15.4): rază 10-100 m, topologie mesh, viteză 250 kbps la 2,4 GHz, putere <50 mW. Folosit ca fallback în rețele dense indoor.
- Principiu: unde radio (CSS pentru LoRa, O-QPSK pentru Zigbee). Protocol: CBOR/Protobuf (compresie > 50 %), ACK+retransmit (timeout 1-10 s).

GPS-sincronizare și fallback:

- GPS: 1PPS (impuls TTL/LVDS lățime 10-100 ms, fiecare secundă), precizie < 1 μ s. Protocol NMEA (\$GPRMC pentru UTC). Pentru outdoor: 1PPS resetează contor local, frecvență referință 10/20 MHz asigură stabilitate (zgomot fază <-100 dBc/Hz @ 10 Hz).
- IRIG-B: cod temporal (100 bit/s, cadru 1 s), PWM (2/5/8 ms pentru 0/1/index). Precizie < 1 μ s. Interfață RS-422/BNC, distanță < 1 km.
- Ceasuri atomice: Rb/Cs, drift <10⁻¹¹/s (de exemplu, mRO-50 Rb: precizie < 5·10⁻¹¹, putere < 5 W). Allan deviation $\sigma_y(\tau) < 10^{-12}$ la 1 s.
- Principiu: 1PPS/IRIG-B setează început contor pentru timer local:

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

4. Ce tehnologii se folosesc?

- Cabluri: pereche torsadă (CAT5e: 24 AWG, crosstalk <-40 dB @100 MHz); fibră optică (SMF, pierderi <0,2 dB/km).
- Fără fir: LoRa (SX1276, CSS cu BW/SF); Zigbee (CC2530, DSSS); Wi-Fi (ESP32, OFDM).
- Sincronizare: GPS (u-blox NEO-M8, 1PPS jitter <50 ns); IRIG-B (module B12x); ceasuri Rb (mRO-50, ADEV <5·10⁻¹¹).
- 2025: LoRaWAN cu ML-routing; hibrid GPS+5G pentru urban.

5. Câți componente nevoie?

- Cabluri: 1–2 pe stivă (CAT5e pentru PPS și date), 3–6 pentru multi-stack.
- Fără fir: 1 modul/stivă (LoRa + fallback).
- Sincronizare: 1 modul GPS/IRIG-B/atomic sau master.

6. Din ce constau componentele?

- Cabluri: perechi cupru (CAT5e: 4 perechi, izolație PVC/PE), conectori (RJ45/M12).
- Fără fir: transiver RF (SX1276: PA+LNA, cuarț 32 MHz), antenă (whip/PCB).
- Sincronizare: receptor GPS (LNA+antenă), decodor IRIG-B (logică FPGA), ceasuri Rb (celulă vapor + laser).

7. Cost componente

- CAT5e: ~0,5–1 USD/m.
- LoRa (SX1276): ~5–10 USD.
- GPS (u-blox): ~20–50 USD.
- Modul IRIG-B: ~50–200 USD.
- Ceasuri Rb: ~500–1000 USD (miniaturale).

8. Calcule adiționale și particularități

- Întârziere: LoRa ~1–10 s/pachet ($T_{air} = \frac{8+PL}{DR}$, unde PL — payload, DR — data rate); CAT5e <1 μs/100 m.
- Precizie sincronizare: GPS <1 μs; IRIG-B <1 μs; Rb-holdover <1 ns/h.
- Sensibilitate RX pentru LoRa:

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

unde $SNR_{req} = -20$ dB pentru SF12.

- Buget putere:

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

- Particularități 2025: LoRa cu AI pentru suprimare zgomote; ceasuri cuantice pentru stabilitate < 10⁻¹⁵.
- În proiect: dual-radio pentru rezistență, buffer SD >1 GB pentru lucru offline.

Reconstrucție și vizualizare: Descriere tehnică detaliată

Reconstrucția și vizualizarea — este nivelul algoritmic și programatic al sistemului tomografului cu muoni, unde datele brute despre traiectoriile muonilor (timestamps, poziții, ToT) se transformă în hartă 3D a densităților/anomaliilor obiectului, apoi se afișează în interfață interactivă (de exemplu, modele voxel, secțiuni). Acest PO rulează pe laptop/server/tabletă (local sau în cloud), cu focus pe procesare real-time pentru aplicații de câmp (e.g., modele voxel, secțiuni). După starea din septembrie 2025, avansuri cheie includ integrarea ML pentru denoising și superrezoluție (e.g., U-Net/GANs pe datasets reale), algoritmi hibrid cu date geomatrice (GPR/LiDAR) și reconstrucție adaptivă pentru CT cu vedere limitată, ceea ce îmbunătățește calitatea imaginilor cu 30–50 % în arheologie și geologie. Eficiența crescută datorită GPU/edge computing, iar reconstrucția dependentă de impuls asigură ID material mai precis în securitate nucleară.

1. Ce este?

Reconstrucția — inversare matematică: din traiectoriile muonilor (unghiuri, energii) se reconstruiește distribuția densității $\rho(x, y, z)$ obiectului.

Vizualizarea — randare a acestei hărți în 2D/3D (secțiuni, randare volum).

Pipeline: fast live (backprojection) → iterativ (SIRT/ART) → ML-post (denoising).

Format intrare: evenimente $\{ts, pos, \theta, \varphi, ToT\}$.

ieșire: grilă voxel (de exemplu, $100 \times 100 \times 100$ voxeluri, 3–10 cm).

În 2025: voxelizare adaptivă și AI generativă pentru modelare scenarii (de exemplu, „risc prăbușire”).

2. Pentru ce se folosește?

- **Reconstrucție:** Construire imagine 3D goluri/anomalii (de exemplu, camere în piramide, minereuri în mine) fără distrugere. Îmbunătățire: ML pentru superrezoluție (rezoluție < 1 cm din date noisy).
- **Vizualizare:** Vizualizare interactivă (secțiuni XY/XZ/YZ, hărți termice, glisoare prag) pentru analiză de arheologi/geologi. În securitate nucleară — detecție materiale după deviație (MST).
- **Aplicații:** Arheologie (camere ascunse); geologie (goluri/defecte); nuclear (resturi combustibil).

3. Cum funcționează?

Pipeline transformare de la traiectorii brute la model 3D:

intrare — N traiectorii ($\theta, \varphi, pos, energie$);

ieșire — distribuție densitate

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

unde μ — coeficient absorbție/raspunzire.

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

Pentru fiecare muon ray-sum actualizează voxeluri:

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

unde w_i — greutate (1 pentru simple, ToT pentru energy-weighted), L_i — cale în voxel.

Afișare rapidă (secunde pentru demo), dar artefacte. Implementare: NumPy/Numba.

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

ART:

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

unde A — matrice proiecție (cale raze), b — măsurători (unghiuri/ToT), λ — relaxare (0.1–1).

Convergență în 10–50 iterații, dar zgomot.

SIRT:

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

Mai bun pentru unghiuri limitate.

Regularizare: TV (total variation) sau Tikhonov.

În 2025: PoCA integrat impuls pentru cont rasăpândire:

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

unde p — impuls muon, X_0 — lungime radiație.

- **ML-postprocesare:** U-Net/TFLite pentru denoising și superrezoluție; GANs pentru generare simulări; clusterizare pentru măști detecție.
- **Vizualizare:** UI web (Three.js, shaders, hărți termice), secțiuni (XY/XZ/YZ), export (PNG/PLY), AR-overlay prin Unity.

4. Ce tehnologii se folosesc?

- **Reconstrucție:** Python (NumPy/Scipy, Numba, TomoPy), C++/CUDA pentru GPU.
- **ML:** TensorFlow Lite, PyTorch, datasets Geant4.
- **Vizualizare:** Three.js/WebGL pentru 3D, PyQtGraph pentru desktop.
- **În 2025:** ART adaptiv pentru vedere limitată, fusion cu geodate (GPR/LiDAR).

5. Câți componente nevoie?

- **Reconstrucție:** 3–4 module (backproj, iterativ, ML, fusion).
- **Vizualizare:** 1 UI + 2–3 exporturi.
- **Pentru sistem:** 1 server (RPi/laptop), multithreading pentru multi-stack.

6. Din ce constau componentele?

- **Reconstrucție:** algoritmi (operații matrice, optimizatori), grile voxel (ndarray).
- **Vizualizare:** libs JS (Three.js: Scene/Camera/Renderer), HTML/CSS pentru UI.

7. Cost componente

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

8. Calcule adiționale și particularități

- Parametri: dimensiune voxel 3–10 cm, iterații 10–50 până la eroare $< 10^{-3}$.
- Calcule: pentru $N = 10^5$ traiectorii, $M = 10^6$ voxeluri: ART complexitate $O(NM)$, ~minute pe CPU, secunde pe GPU.
- Regularizare TV:

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

- Particularități 2025: tomografie multi-orientație (câteva vederi → +acuratețe), recon dependent de impuls pentru discriminare material, imagistică 3D reactor.

Astfel, reconstrucția și vizualizarea formează modul legat, care unește algoritmi matematici, modele ML și interfețe grafice pentru transformarea evenimentelor brute ale trackerului muon în hărți 3D inteligibile și practic utile ale structurii obiectului.

Aplicații

1. Comparație cu metode analogice

Criteriu	MuoVis	Raze X / Scanare Gamma	Burghiu / Preluare probe	Metode UZ-/Seismo-
Principiu	Muoni naturali	Radiație ionizantă	Penetrare fizică	Metode ondulatorii
Non-distructiv	✓	✓	×	✓
Necesită sursă radiație	×	✓	×	×
Adâncime penetrare	>10 m	1–3 m	Fără limită	1–5 m
Rezoluție (densitate)	Înaltă pe obiecte mari	Bună pe mici	Foarte înaltă	Medie
Risc pentru operator	Scăzut	Mediu-Înalt	Mediu	Scăzut
Mobilitate	Înaltă	Limitată	Scăzută	Medie
Influență mediu	Nesemnificativ	Mediu	Semnificativ	Înalt

2. Cost construcție sistem

a) Configurație de bază MuoVis (1 bloc)

Component	Cant.	Preț per unitate, EUR	Sumă, EUR
Stivă detector (2 scintilatoare + SiPM)	1	450	450
Modul FPGA + TDC	1	350	350
Carcasă și montaj	1	150	150
Alimentare (LiFePO4 50 Ah)	1	200	200
Comunicare (LoRa/Wi-Fi)	1	70	70
Cabluri, suporturi, elemente mici	-	80	80
Total (bloc)	-	-	1 300

b) Sistem din 4 blocuri (kit de câmp)

Component	Cant.	Preț per unitate, EUR	Sumă, EUR
4 × Muoscope 3.0 bloc	4	1 300	5 200
Procesare centralizată	1	400	400
Cutii protective	4	100	400
Documentație și licențe	-	-	200
Total (kit)			6 200

3. Cost întreținere anuală

Indicator	Valoare (EUR)	Justificare
Calibrare regulată	300	O dată pe an
Înlocuire consumabile	150	SiPM, cabluri
Suport PO	250	Actualizări, bug-fix-uri
Întreținere de câmp	300	Logistică, setare
Total/an	1 000	

4. Beneficiu economic (ROI)

Indicator	Raze X/Burghiu	MuoVis
Cost obținere	20 000 EUR	6 200 EUR
Timp obținere	5-10 zile	1-3 zile
Risc anomalii după	Mediu	Scăzut
Cost oprire	2 000 EUR/zi	500 EUR/zi

Indicator	Metode tradiționale	MuoVis
Burghiu probe	15 000 EUR	0 EUR
Timp	>10 zile	2-4 zile
Deteriorare obiect	Probabil	Niciuna
Risc reputațional	Mediu	Scăzut

5. Durată viață componente cheie

Component	Durată viață	Comentariu
Scintilatoare	10+ ani	Uzură scăzută
Fotodetectoare SiPM	7-10 ani	Necesită protecție de temperatură
Electronică FPGA + TDC	8-12 ani	Reprogramare, actualizări
Acumulator LiFePO4	5-8 ani	300-500 cicluri
Carcasă / suporturi	15+ ani	Materiale UV-stabile