TRƯỜNG ĐẠI HỌC SÂN KHẤU – ĐIỆN ẢNH HÀ NỘI
KHOA CÔNG NGHỆ ĐIỆN ẢNH – TRUYỀN HÌNH

KỸ THUẬT AUDIO – VIDEO

CHƯƠNG 2

Tín hiệu analog và chuỗi thiết bị âm thanh

5 tiết · Dành cho sinh viên Đạo diễn âm thanh, Quay phim, Đạo diễn điện ảnh – truyền hình, Dựng phim

Hà Nội – 2026

Chương 1 dừng ở đâu, Chương 2 bắt đầu từ đó

Ở Chương 1, chúng ta theo dõi sóng âm lan trong không khí và dừng lại đúng lúc nó chạm màng rung microphone. Chương 2 đi tiếp đoạn đường còn lại.

- **Chương 1 — trong không khí:** sóng dọc, vận tốc 343 m/s, bước sóng, dB SPL, tai người và ISO 226.
- **Chương 2 — trong dây dẫn:** điện áp v(t), micro và loa, chuỗi thiết bị, mức tín hiệu, nhiễu và dải động.
- **Chương 3 — trong bộ nhớ:** lấy mẫu, lượng tử hóa, Nyquist — nhưng phải đi qua Chương 2 trước.
- Câu hỏi xuyên suốt cả chương: *vì sao ngành âm thanh phải bỏ analog để sang số?* — cuối tiết 4 ta sẽ có bốn lý do định lượng.

BẢN ĐỒ CHƯƠNG

Sáu mảng kiến thức của Chương 2



Mỗi tiết học sẽ sáng lên một nhánh. Hết chương, sáu nhánh khép lại thành một chuỗi tín hiệu hoàn chỉnh.

TIẾT 1

Tín hiệu analog là gì, và vì sao máy tính chịu thua nó

- Định nghĩa tín hiệu liên tục theo thời gian
- Hai tính liên tục: trục thời gian và trục biên độ
- Biểu diễn toán học v(t) và ý nghĩa vật lý
- Vì sao máy tính hữu hạn không xử lý nổi tín hiệu vô hạn điểm



MỤC 2.1

Chuẩn đầu ra của chương

- **Kiến thức:** định nghĩa tín hiệu liên tục; cơ chế chuyển đổi năng lượng của micro và loa; 5 mắt xích chuỗi tín hiệu; 4 cấp mức; nguyên lý triệt nhiễu cân bằng; SNR – Noise Floor – Headroom – Dynamic Range; 4 hạn chế của analog.

- **Kỹ năng:** sơ đồ hóa chuỗi thu âm thực tế; dùng Audacity so phổ bản sạch với bản dính hiss và ù 50 Hz; viết Python đọc siêu dữ liệu WAV và mô phỏng nhiễu nhiệt analog.

- **Năng lực tự chủ:** nối được thế giới phần cứng vật lý với cấu trúc dữ liệu phần mềm; ý thức rằng tầng preamp sạch quyết định chất lượng mọi thuật toán số về sau.

TỪ KHÓA

Thuật ngữ then chốt cần làm chủ

Mười lăm thuật ngữ dưới đây sẽ quay lại suốt bốn tiết còn lại. Ghi vào sổ tay ngay từ hôm nay.

- Continuous-time signal · Transducer · Dynamic mic · Condenser mic · Phantom Power 48V
- Preamplifier · Signal chain · Mic / Instrument / Line / Speaker Level
- Impedance matching · Voltage bridging · Balanced audio · CMRR
- Noise Floor · SNR · Headroom · Dynamic Range · Generation loss
- ADC · Audio Interface · Buffer Size · Buffer Underrun

MỤC 2.2.1

Tín hiệu analog: định nghĩa

Mọi hiện tượng âm thanh tự nhiên đều là quá trình **liên tục**. Dây đàn rung làm mật độ phân tử không khí biến thiên nhịp nhàng; tại mọi thời điểm, dù nhỏ vô cùng, áp suất luôn có một giá trị xác định.

- **Tín hiệu analog** = đại lượng vật lý (điện áp hoặc dòng điện) biến thiên liên tục theo thời gian.
- Chữ *analog* nghĩa là **tương đồng**: điện áp trên dây mô phỏng đúng hình thái sóng áp suất ban đầu.
- Sóng áp suất biến thiên thế nào thì điện thế biến thiên y hệt thế ấy — chỉ khác đơn vị.



Bước đầu của chuỗi: nguồn âm tự nhiên phát ra sóng áp suất cơ học.

Biểu diễn toán học của tín hiệu liên tục

Dưới góc độ giải tích, tín hiệu âm thanh analog là một hàm số liên tục của biến thời gian thực.

$$v(t) \in \mathbb{R}, \quad \forall t \in [t_1, t_2]$$

- **Liên tục trên trục thời gian:** giữa hai mốc t_1 và t_2 bất kỳ luôn tồn tại **vô số** thời điểm trung gian — tập số thực không đếm được.
- **Liên tục trên trục biên độ:** điện áp nhận **bất kỳ** giá trị nào trong giới hạn nguồn nuôi, không bị chia thành bậc rời rạc.
- Hai chữ "liên tục" này chính là hai chỗ mà Chương 3 sẽ phải cắt: cắt trục thời gian gọi là **lấy mẫu**, cắt trục biên độ gọi là **lượng tử hóa**.

CÂU HỎI TẠI LỚP

Một giây âm thanh analog chứa bao nhiêu điểm dữ liệu?

A 44.100 điểm

B 48.000 điểm

C 1 triệu điểm nếu thu ở chất lượng cao

D Vô hạn điểm

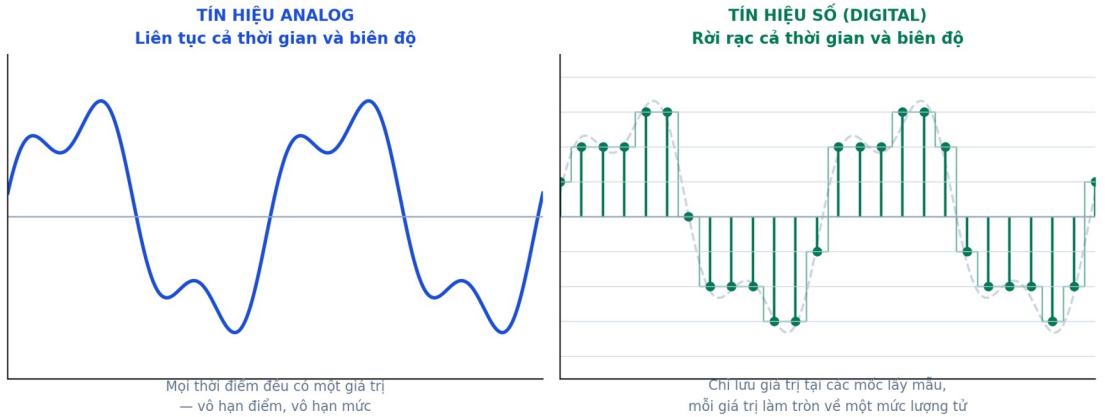
Suy nghĩ 30 giây — rồi trả lời

GIẢI THÍCH

Đáp án D — vô hạn điểm

Tín hiệu analog thật có vô hạn điểm thời gian, và tại mỗi điểm biên độ lại có vô hạn chữ số thập phân.

- 44.100 hay 48.000 là **tần số lấy mẫu** — số điểm ta *chọn giữ lại*, không phải số điểm sẵn có.
- Máy tính là hệ hữu hạn trạng thái: RAM và thanh ghi CPU chỉ 32 hoặc 64 bit.
- Không thể lưu lượng thông tin vô hạn ⇒ **bắt buộc** phải rời rạc hóa.
- Đó là lý do bản chất, không phải giới hạn công nghệ tạm thời. Máy tính năm 2050 vẫn phải lấy mẫu.



CHỐT LẠI MỤC 2.2

Chốt lại: bản chất tín hiệu analog

Analog = tương đồng. Điện áp mô phỏng đúng hình thái sóng áp suất.

Liên tục kép: liên tục theo thời gian VÀ liên tục theo biên độ.

$v(t) \in \mathbb{R}, \forall t \in [t_1, t_2]$ — hàm số liên tục của biến thời gian thực.

Máy tính hữu hạn không lưu nổi vô hạn điểm ⇒ phải lấy mẫu và lượng tử hóa.

TIẾT 2

Hai cửa ngõ: microphone và loa điện động

- Khái niệm bộ chuyển đổi âm điện (transducer)
- Micro điện động — cảm ứng điện từ Faraday
- Micro điện dung — biến thiên điện dung, nguồn 48 V
- Loa điện động — lực từ Lorentz F = B·L·i



MỤC 2.3.1

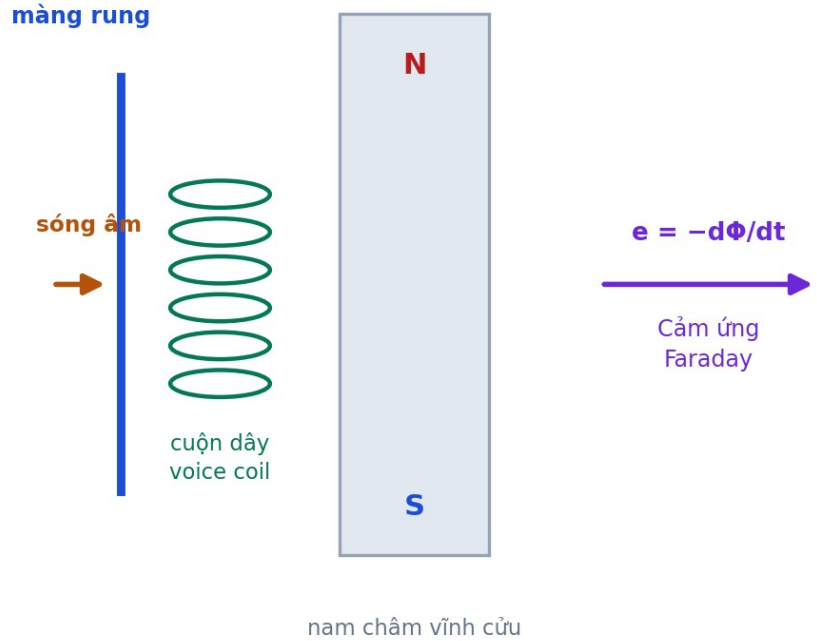
Bộ chuyển đổi âm điện là gì

Hệ thống âm thanh không hoạt động được nếu thiếu mắt xích giao tiếp giữa **môi trường sóng cơ học** và **mạch điện tử**.

- **Transducer** — thiết bị biến năng lượng âm học (sóng áp suất cơ học) thành năng lượng điện (điện áp xoay chiều), hoặc ngược lại.
- **Microphone** — cửa vào: cơ học → điện.
- **Loudspeaker** — cửa ra: điện → cơ học → âm học.
- Hai thiết bị này về nguyên lý là **cùng một cấu trúc chạy ngược chiều nhau**. Cắm một chiếc loa nhỏ vào ngõ mic, nói vào nó — vẫn ra tiếng, chỉ yếu và đục.

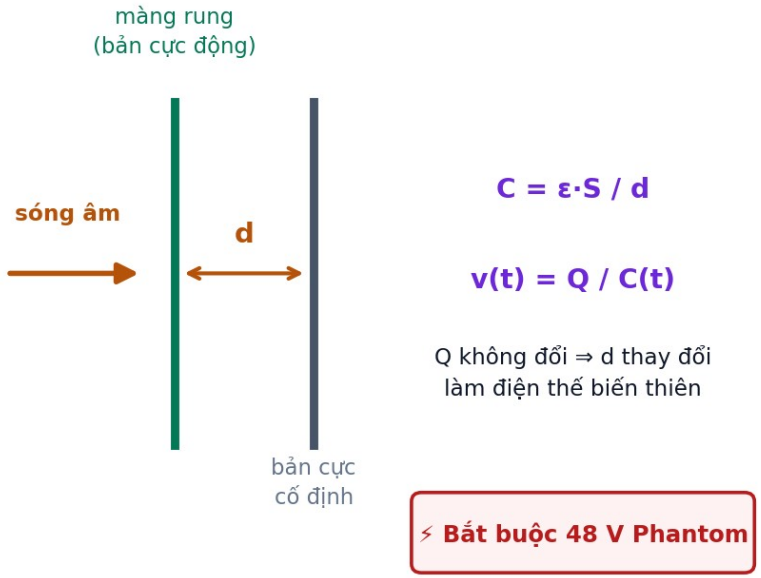
Hai dòng micro — hai nguyên lý vật lý khác hẳn nhau

MICRO ĐIỆN ĐỘNG (Dynamic)



Bền · chịu SPL rất cao · không cần nguồn ngoài

MICRO ĐIỆN DUNG (Condenser)



Chi tiết cao · đáp ứng xung nhanh · cần nguồn 48 V

Trái: cuộn dây cắt đường sức từ sinh suất điện động. Phải: khoảng cách hai bản cực thay đổi làm điện dung — và do đó điện thế — biến thiên.

SO SÁNH NGHIỆP VỤ

Chọn micro nào cho tình huống nào

Tiêu chí	Micro điện động (Dynamic)	Micro điện dung (Condenser)
Nguyên lý	Cảm ứng điện từ Faraday	Biến thiên điện dung C = ε·S/d
Nguồn ngoài	Không cần	Bắt buộc 48 V Phantom
Chịu SPL	Rất cao — trống kick, amply guitar	Vừa phải, dễ quá tải
Chi tiết dải cao	Trung bình	Rất cao, đáp ứng xung nhanh
Độ bền cơ học	Rất bền, chịu va đập	Nhạy cảm với ẩm và va đập
Dùng ở đâu	Sân khấu, hiện trường, nguồn ồn to	Phòng thu, lồng tiếng, thu nhạc cụ mộc

Quy tắc nghề: ***ngoài trời và trên sân khấu → dynamic; trong buồng cách âm → condenser****. Không phải vì cái nào tốt hơn, mà vì môi trường khác nhau.*

Loa điện động — lực từ Lorentz

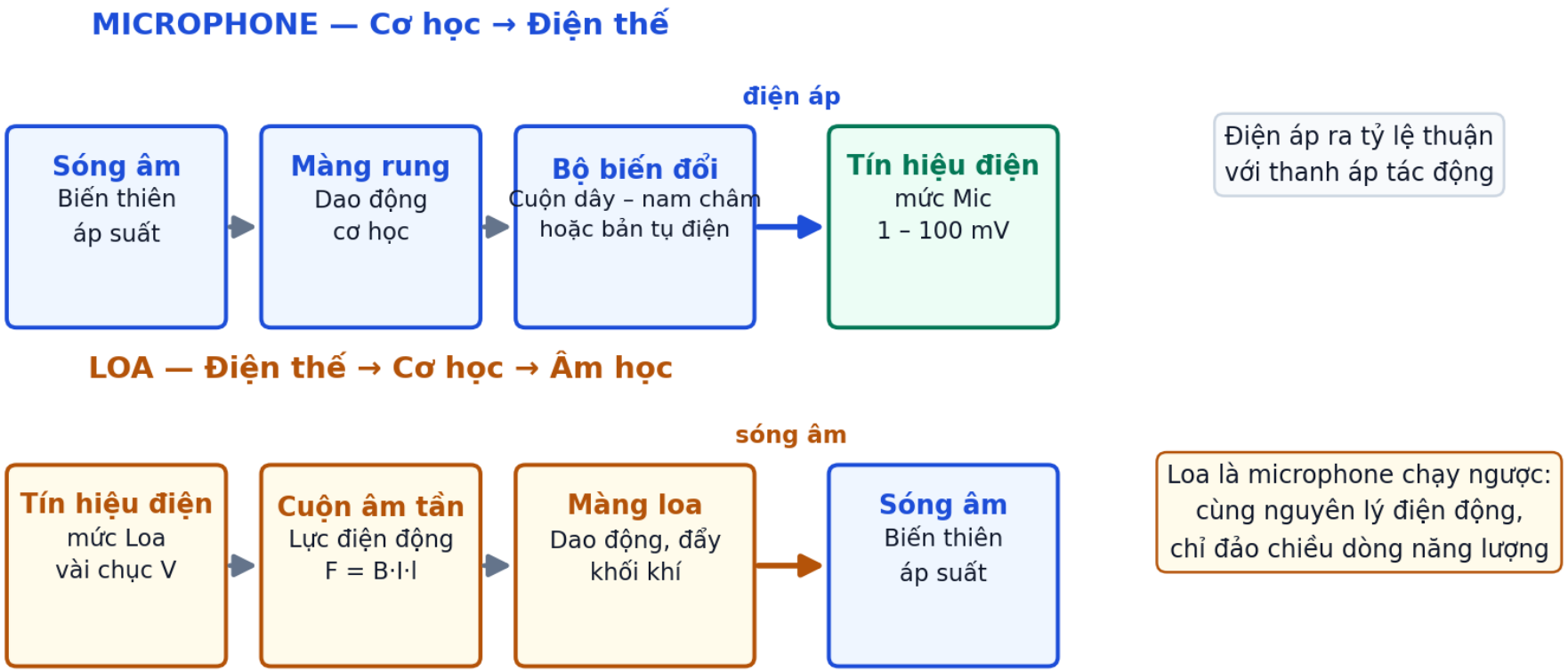
Loa hoạt động **hoàn toàn đảo ngược** so với micro điện động. Dòng điện chạy qua cuộn dây nằm trong từ trường nam châm sinh ra lực cơ học đẩy cuộn dây dao động dọc trục.

$$F(t) = B \cdot L \cdot i(t) \quad (\mathrm{N})$$

- **B** — mật độ từ thông của nam châm vĩnh cửu (tesla).
- **L** — chiều dài dây dẫn của cuộn cảm nằm trong khe từ (mét).
- **i(t)** — dòng điện tức thời do amply công suất cấp (ampe).
- Cuộn dây gắn cứng với **màng loa** (giấy, sợi carbon hoặc polymer). Màng dao động cưỡng bức lớp không khí xung quanh, tái tạo sóng áp suất tới tai người nghe.

HÌNH 2.2

Hai bộ chuyển đổi năng lượng đặt cạnh nhau



Hình 2.2 — Nguyên lý hai bộ chuyển đổi năng lượng cơ bản: microphone và loa điện động.

CÂU HỎI TẠI LỚP

Vì sao micro điện dung bắt buộc phải có nguồn 48 V, còn micro điện động thì không?

Gợi ý: nghĩ xem trong mỗi loại micro, **năng lượng của tín hiệu điện ra đến từ đâu**.

Suy nghĩ 30 giây — rồi trả lời

GIẢI THÍCH

Đáp án — nguồn năng lượng của tín hiệu

Dynamic tự sinh ra điện từ chuyển động; condenser chỉ điều biến một điện tích đã được nạp sẵn từ bên ngoài.

- **Dynamic:** cuộn dây cắt đường sức từ **tự sinh** suất điện động. Năng lượng lấy từ chính sóng âm ⇒ không cần nguồn nào.
- **Condenser:** phải có điện tích Q nạp sẵn trên hai bản cực thì v = Q/C mới có nghĩa. **48 V nạp điện tích đó.**
- Ngoài ra 48 V còn nuôi mạch tiền khuếch đại trở kháng cao đặt ngay trong thân mic (vì tín hiệu ra từ bản cực cực yếu và trở kháng cực cao, không truyền xa được).
- Hệ quả nghề: quên bật 48 V ⇒ mic condenser **im lặng hoàn toàn**, không phải tiếng nhỏ. Đây là lỗi hiện trường phổ biến nhất của sinh viên năm nhất.

CHỐT LẠI MỤC 2.3

Chốt lại: bộ chuyển đổi năng lượng

Transducer nối thế giới sóng cơ học với mạch điện tử — micro vào, loa ra.

Dynamic: Faraday, $e = -d\Phi/dt$, tự sinh điện, bền, chịu SPL cao, sân khấu.

Condenser: $C = \varepsilon \cdot S/d$ và $v = Q/C$, cần 48 V, chi tiết cao, phòng thu.

Loa: Lorentz $F = B \cdot L \cdot i$ — micro chạy ngược. Cần dòng lớn, không chỉ điện áp.

Quy trình an toàn: **cắm cáp → bật 48 V**; **tắt 48 V → rút cáp**.

Chọn micro theo **môi trường**, không theo giá tiền.

TIẾT 3

Chuỗi tín hiệu analog và bốn cấp độ mức tín hiệu

- Năm mắt xích không thể đảo vị trí của chuỗi tín hiệu
- Vai trò sống còn của tầng tiền khuếch đại
- Bốn cấp mức: Mic – Instrument – Line – Speaker
- Trở kháng và quy tắc phối ghép điện áp cầu



Mắt xích 1 — nguồn âm tự nhiên



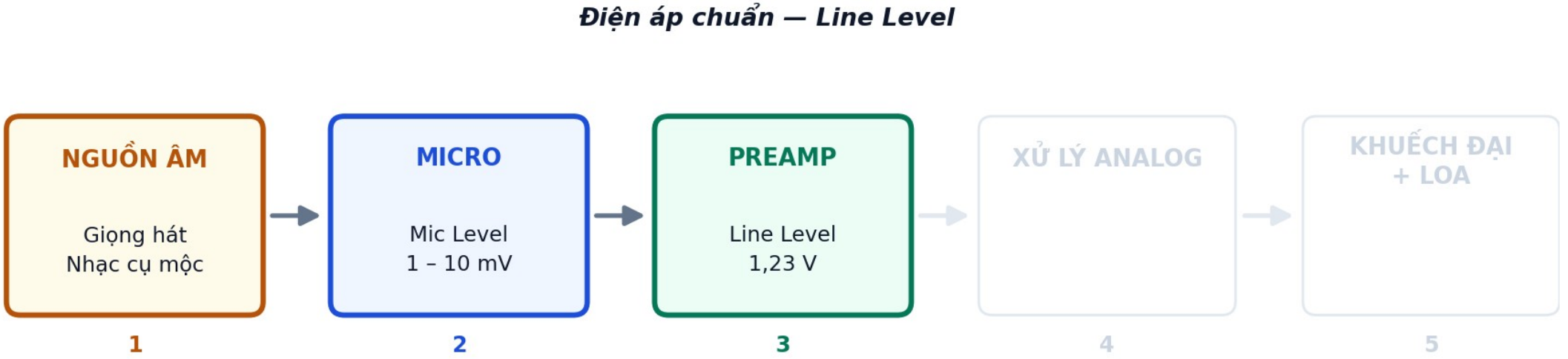
Giọng hát người, nhạc cụ mộc, âm thanh môi trường — phát ra sóng áp suất không khí.

Mắt xích 2 — microphone



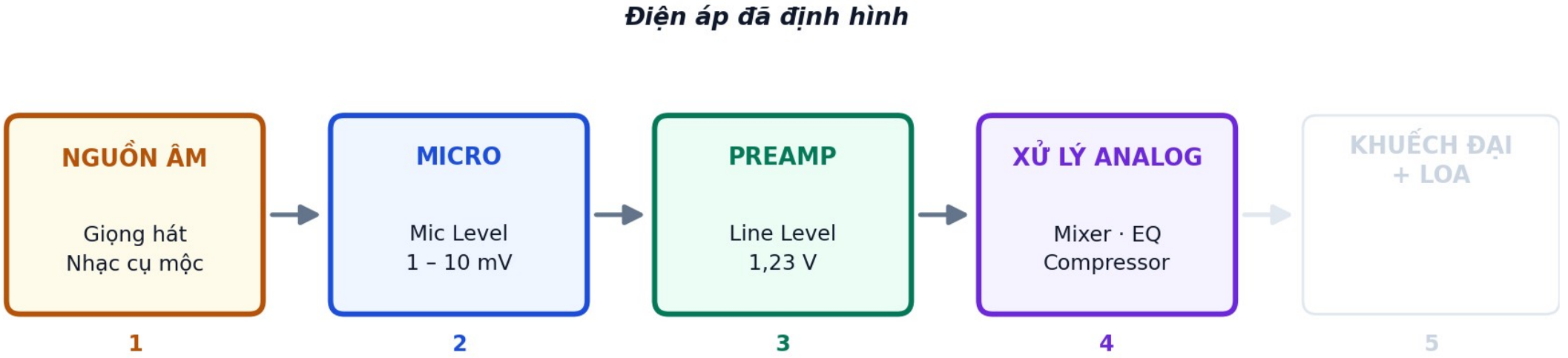
Micro thu sóng áp suất và chuyển thành tín hiệu điện mức vi mô: chỉ 1 – 10 mV.

Mắt xích 3 — tiền khuếch đại



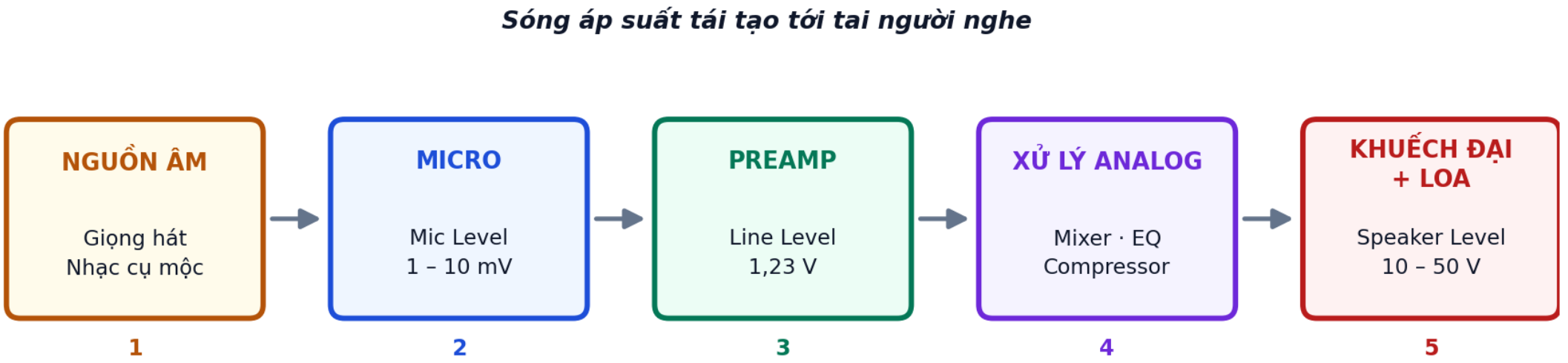
Preamp nâng vài milivolt lên mức chuẩn đường truyền 1,23 V — nhân biên độ hàng nghìn lần.

Mắt xích 4 — xử lý analog



Bàn trộn (Mixer), bộ cân bằng âm sắc (EQ), bộ kiểm soát dải động (Compressor / Limiter).

Mắt xích 5 — khuếch đại công suất và loa



Đẩy dòng điện và điện áp lên Speaker Level (10 – 50 V) để kéo cuộn cảm màng loa.

HÌNH 2.3

Sơ đồ khối chính thức của chuỗi tín hiệu analog



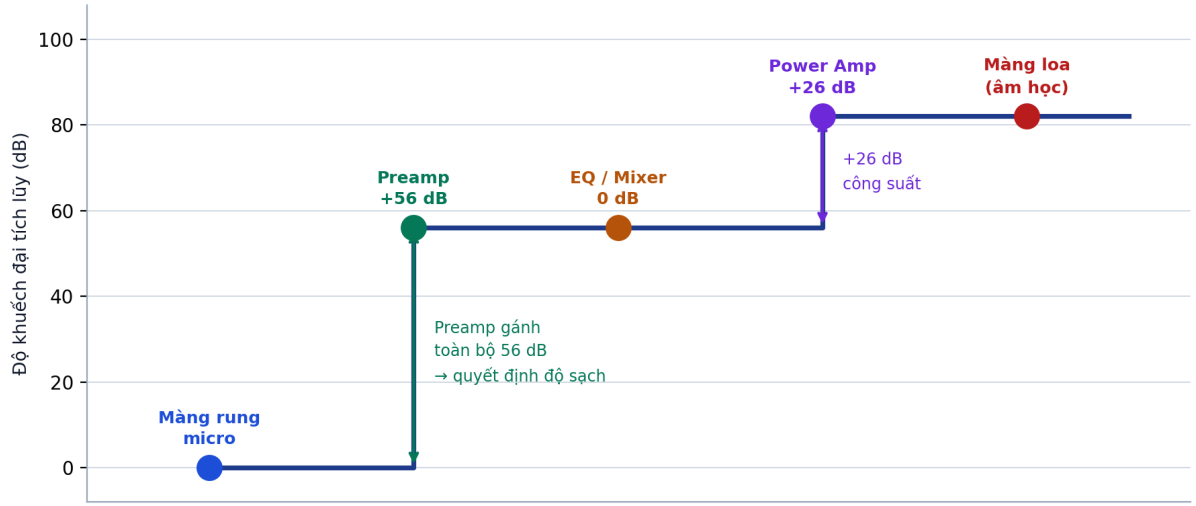
Hình 2.3 — Sơ đồ khối chuỗi tín hiệu âm thanh analog từ nguồn phát tới loa tái tạo.

MỤC 2.4.2

Vì sao preamp quyết định tất cả

Tín hiệu từ màng rung micro chỉ vài **microvolt đến milivolt**. Mức này không đủ kích hoạt bất kỳ mạch xử lý nào, và nếu truyền qua cáp dài sẽ bị nhiễu điện từ nhấn chìm.

- Nhiệm vụ preamp: cấp **hệ số khuếch đại sạch +40 đến +70 dB** — nhân biên độ từ 100 đến hơn 3.000 lần.
- Vị trí preamp **bắt buộc ngay sát đầu ra micro**. Đưa đi xa rồi mới khuếch đại là đã muộn.
- Preamp rẻ tiền khuếch đại **cả tiếng xì nhiễu nhiệt** cùng với tín hiệu — hủy hoại vĩnh viễn bản thu.
- Nhiễu đã lọt vào ở tầng này thì **không thuật toán nào gỡ ra được nguyên vẹn** — AI khử nhiễu chỉ đoán lại phần đã mất.



Preamp gánh 56 trong tổng số 82 dB khuếch đại của cả chuỗi.

Plugin Chain trong DAW chính là chuỗi analog viết bằng toán

Trong máy trạm âm thanh số (DAW) và trong mã Python / C++, khái niệm **Plugin Chain** hay **FX Chain** không phải là phát minh mới — nó là bản mô phỏng toán học của đúng chuỗi phần cứng vừa học.

- `sf.read(file)` → thay cho **nguồn âm + microphone**
- `signal = *gain* (chuẩn hóa) → thay cho tầng preamp*
- `scipy.signal.lfilter(b, a, x)` → thay cho **EQ phần cứng**
- `compressor(x, threshold, ratio)` → thay cho **hardware compressor**
- Hiểu chuỗi vật lý giúp lập trình viên **sắp thứ tự gọi hàm DSP đúng**, tránh tràn số và méo tiếng. Gọi compressor trước khi chuẩn hóa gain cho kết quả khác hẳn gọi sau.

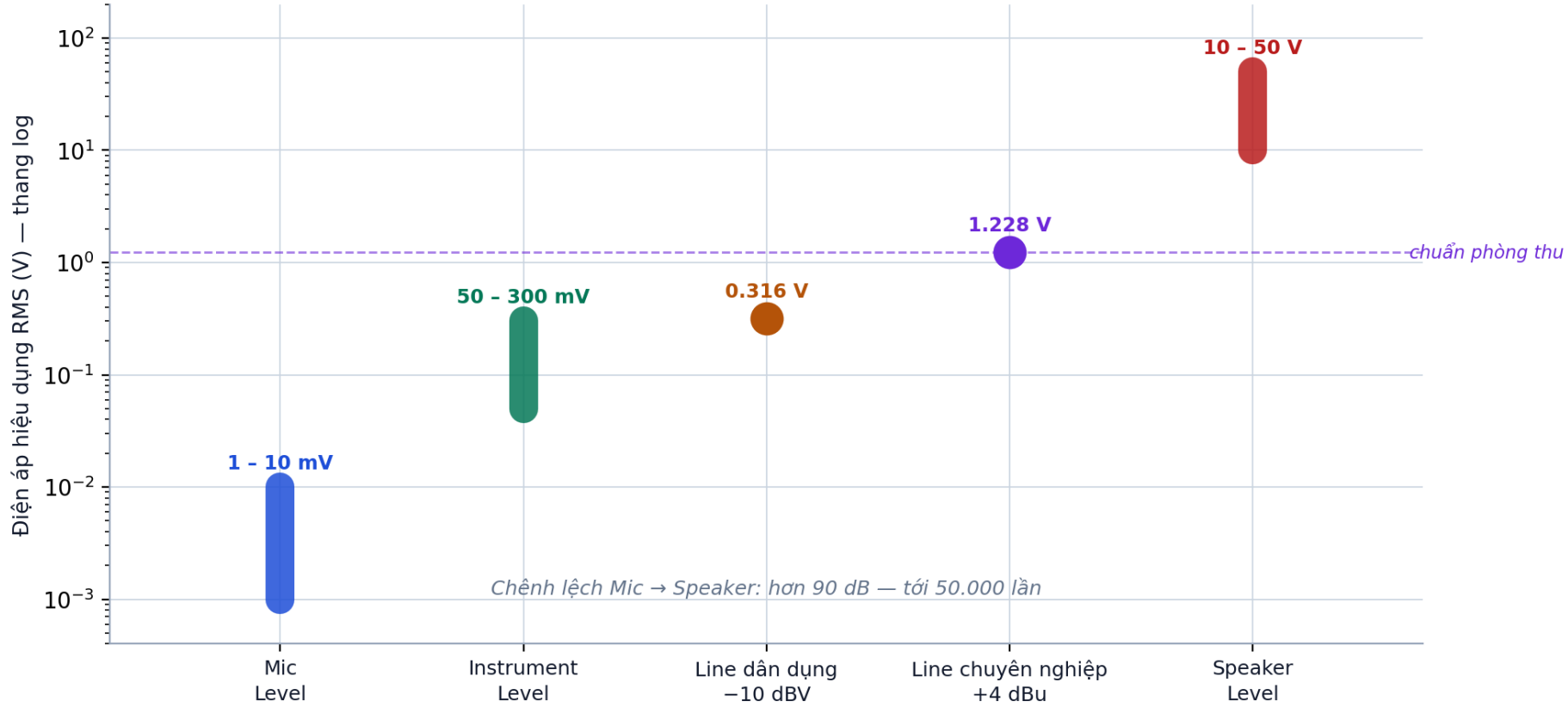
Bốn cấp độ mức tín hiệu tiêu chuẩn

Cấp mức	Điện áp danh định (RMS)	Mức tương đối	Trở kháng & ứng dụng
Mic Level	1 mV – 10 mV	−60 đến −40 dBu	Z thấp 150 – 600 Ω, cực nhạy nhiễu
Instrument	50 mV – 300 mV	−20 đến −10 dBu	Z rất cao Hi-Z 100 kΩ – 1 MΩ (pickup guitar)
Line dân dụng	316 mV (0,89 V p-p)	−10 dBV	Cổng AUX, RCA, TV, điện thoại
Line chuyên nghiệp	1,228 V (3,47 V p-p)	+4 dBu	Mixer, Audio Interface, DSP Rack
Speaker Level	10 V – 50 V + dòng lớn	+20 đến +40 dBu	Z tải rất thấp 4 – 8 Ω, mang năng lượng lớn

*Phối ghép sai cấp mức là **nguyên nhân hàng đầu** gây méo cắt đỉnh dữ dội hoặc tiếng xì ồn không khắc phục được.*

BẢNG 2.1 → BIỂU ĐỒ

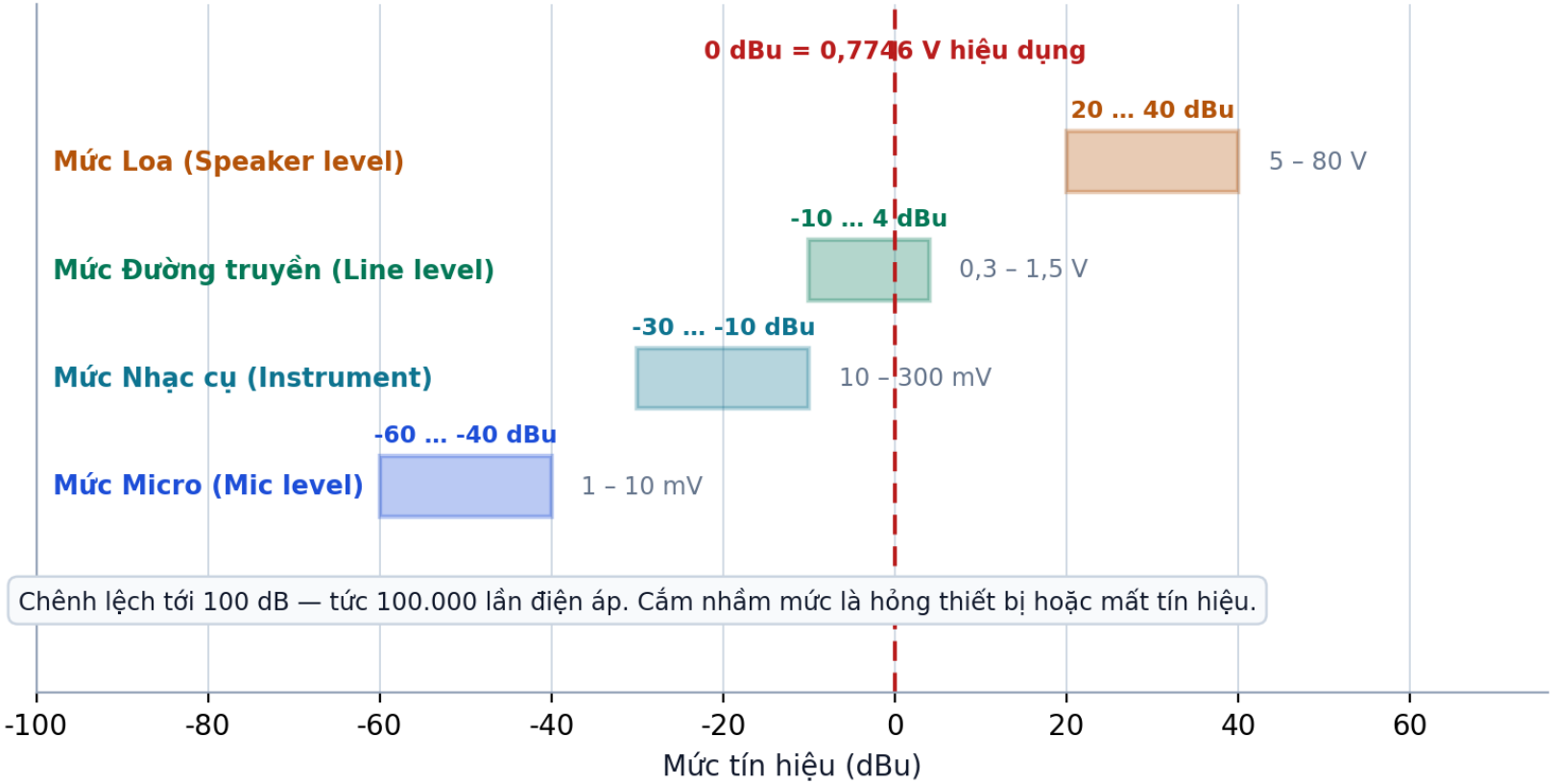
Bốn cấp mức trên thang điện áp logarit



Từ Mic Level tới Speaker Level là hơn 90 dB — biên độ chênh nhau tới 50.000 lần.

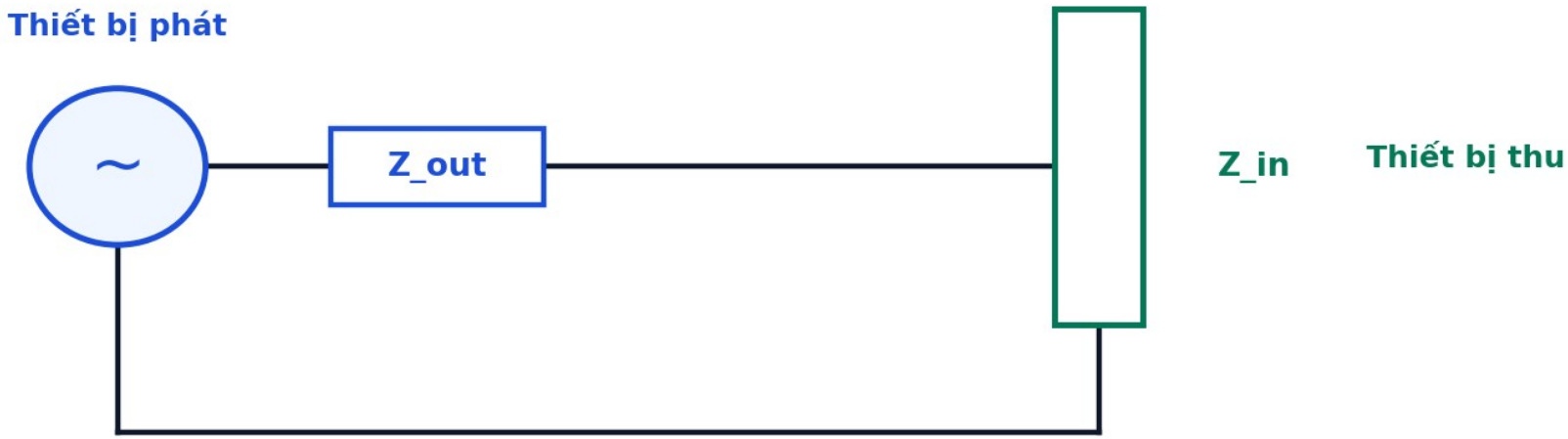
HÌNH 2.4

Bốn cấp mức và dải điện áp tương ứng



Hình 2.4 — Bốn cấp độ mức tín hiệu chuẩn và dải điện áp tương ứng.

Trở kháng — mạch tương đương



Trở kháng Z (đơn vị Ω) là sự cản trở toàn phần với dòng xoay chiều: gồm điện trở thuần R cùng dung kháng và cảm kháng.

Quy tắc phối ghép điện áp cầu

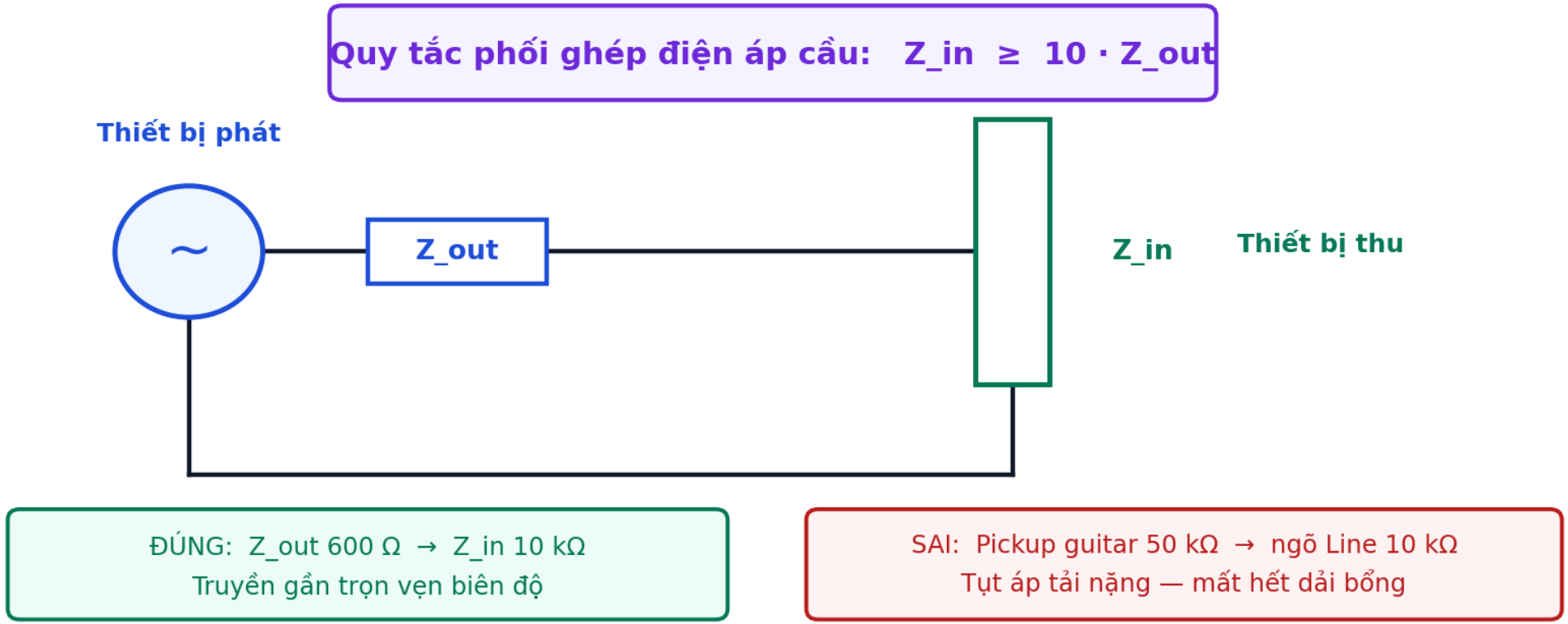
Hệ thống âm thanh hiện đại **không** phối hợp trở kháng bằng nhau (đó là kỹ thuật truyền tải công suất của ngành radio cổ). Ta dùng **phối ghép điện áp cầu** — Voltage Bridging.

$$Z_{in} \geq 10\, Z_{out}$$

- Khi **Z_in ≥ 10 · Z_out**, sụt áp trên trở kháng nội của nguồn phát là không đáng kể.
- Kết quả: truyền tải gần như trọn vẹn **100% biên độ điện áp**, không méo đáp tuyến tần số.
- Ví dụ đúng: mixer Z_out 600 Ω → interface Z_in 10 kΩ (gấp gần 17 lần).

ỨNG DỤNG

Đúng và sai trong thực tế phòng thu



Pickup guitar có trở kháng nội rất lớn — cắm vào ngõ Line thông thường sẽ bị "tải nặng", suy hao toàn bộ dải cao.

VÍ DỤ GIẢI TỪNG BƯỚC

Ví dụ: tính độ khuếch đại preamp cần thiết

Tình huống: Một micro thu âm sinh ra tín hiệu điện áp hiệu dụng **V_mic = 2,0 mV**. Cần đưa lên mức Line chuyên nghiệp **+4 dBu, tức V_line = 1,228 V RMS**. Kỹ sư phải vặn núm Gain của preamp lên bao nhiêu decibel?

1. Xác định công thức: độ khuếch đại điện áp tính bằng decibel là **Gain (dB) = 20 · $\log_{10}$(V_out / V_in)**.

2. Đưa hai giá trị về cùng đơn vị vôn: V_in = 2,0 mV = **0,002 V**; V_out = **1,228 V**.

3. Lập tỷ số biên độ: 1,228 / 0,002 = **614 lần**.

4. Chuyển sang decibel: 20 · $\log_{10}$(614) = 20 × 2,788 = **55,76 dB**.

Kết luận nghề: Preamp cần cung cấp khoảng **+55,8 dB**. Con số này nằm gọn trong dải +40 đến +70 dB mà một preamp chuyên nghiệp cung cấp — nghĩa là thiết bị đủ sức, nhưng núm Gain phải vặn khá cao, và đó chính là lúc chất lượng linh kiện preamp lộ ra.

CÂU HỎI TẠI LỚP

Trong bốn cấp mức, cấp nào có trở kháng CAO nhất?

A Mic Level (150 – 600 Ω)

B Instrument Level (100 kΩ – 1 MΩ)

C Line chuyên nghiệp (+4 dBu)

D Speaker Level (4 – 8 Ω)

Suy nghĩ 30 giây — rồi trả lời

GIẢI THÍCH

Đáp án B — Instrument Level

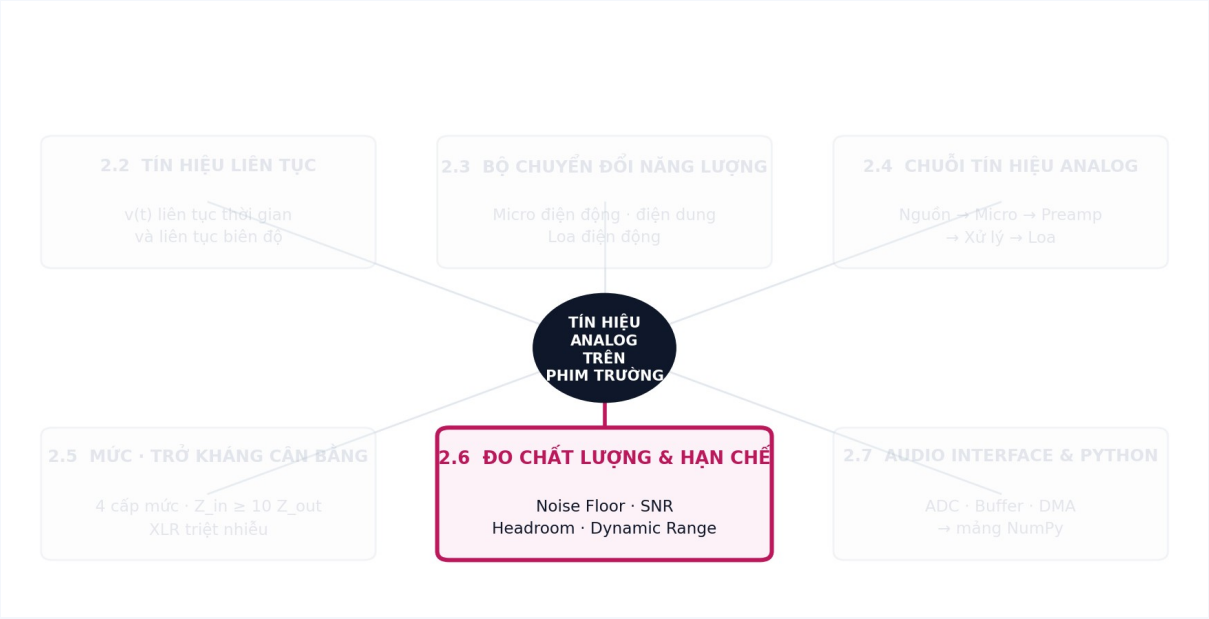
Pickup guitar điện có trở kháng nội 100 kΩ đến 1 MΩ — cao nhất trong bốn cấp, dù điện áp chỉ vài trăm milivolt.

- Điện áp và trở kháng là **hai đại lượng độc lập** — không suy ra nhau được.
- Speaker Level điện áp cao nhất (10–50 V) nhưng trở kháng **thấp nhất** (4–8 Ω), vì loa cần dòng lớn.
- Instrument Level điện áp trung bình nhưng trở kháng **rất cao**, vì pickup là cuộn dây hàng nghìn vòng.
- Đó là lý do interface cần một nút riêng: **Hi-Z**. Không có nút này thì phải dùng hộp DI-Box.

TIẾT 4

Triệt nhiễu, đo chất lượng và bốn hạn chế của analog

- Đường truyền cân bằng XLR và mạch khuếch đại vi sai
- Chứng minh toán học khả năng triệt tiêu nhiễu (CMRR)
- Noise Floor · SNR · Headroom · Dynamic Range
- Bốn hạn chế cố hữu dẫn tới tất yếu số hóa

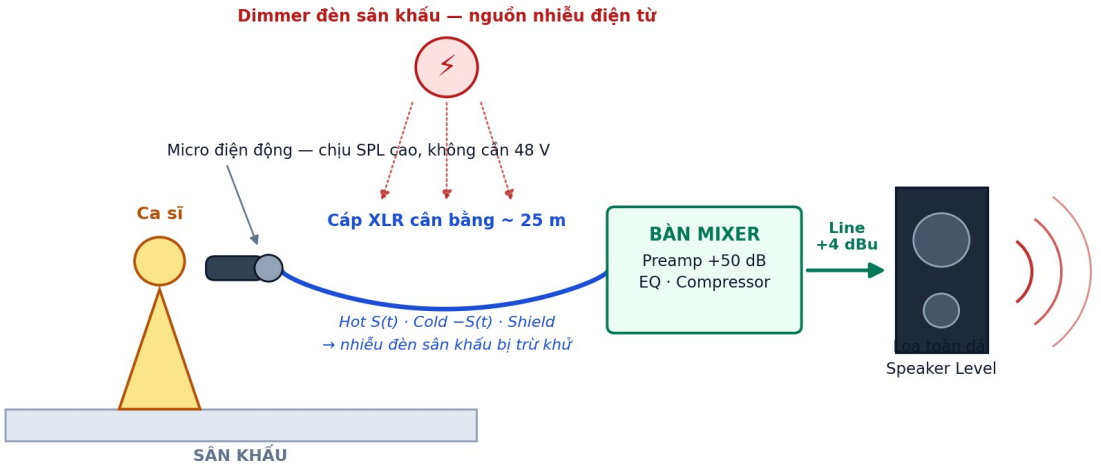


MỤC 2.5.3

Vì sao cáp không cân bằng chỉ dùng được dưới 3 mét

Cáp **không cân bằng** (RCA hoa sen, TS 6,35 mm của đàn guitar) chỉ có 1 dây lõi mang tín hiệu và 1 lớp lưới nối đất.

- Mọi sóng điện từ trong không gian — sóng radio, wifi, nhiễu từ biến áp nguồn, **dimmer đèn sân khấu** — cảm ứng thẳng vào dây lõi.
- Nhiễu đó đi thẳng vào mạch khuếch đại và được khuếch đại cùng tín hiệu.
- Dây càng dài, "ăng-ten" càng lớn. Quá **3 mét** là bắt đầu ù xì rõ rệt.
- Trên sân khấu, khoảng cách từ ca sĩ tới bàn mixer thường 20 – 30 m. Không cân bằng là **không dùng được**.



Cáp XLR 25 m chạy ngay dưới giàn đèn có dimmer — môi trường nhiễu khắc nghiệt nhất.

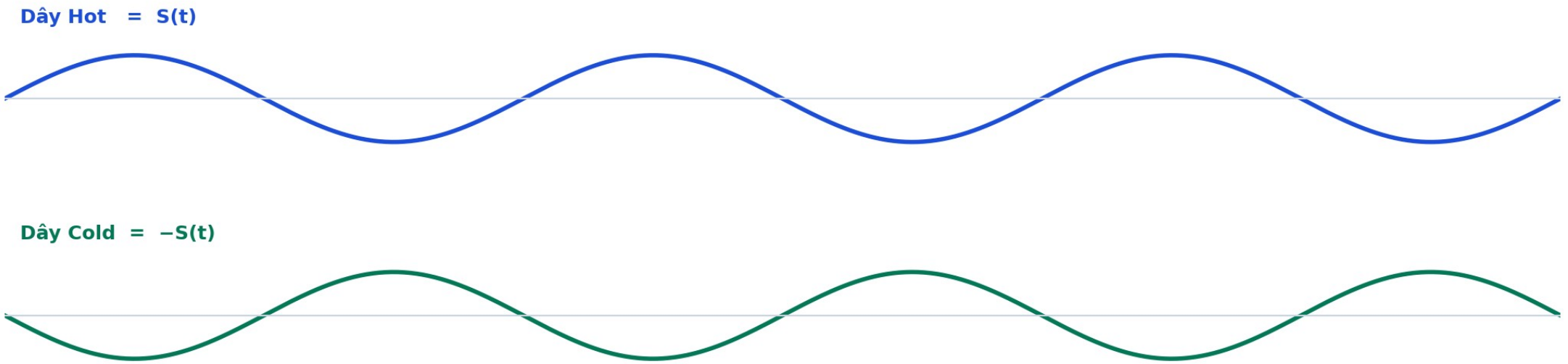
CẤU TẠO

Ba chân của đầu nối XLR cân bằng

Kỹ thuật chuyên nghiệp dùng đầu nối 3 chân chuẩn **XLR (Canon)** hoặc **TRS (Stereo Jack)**.

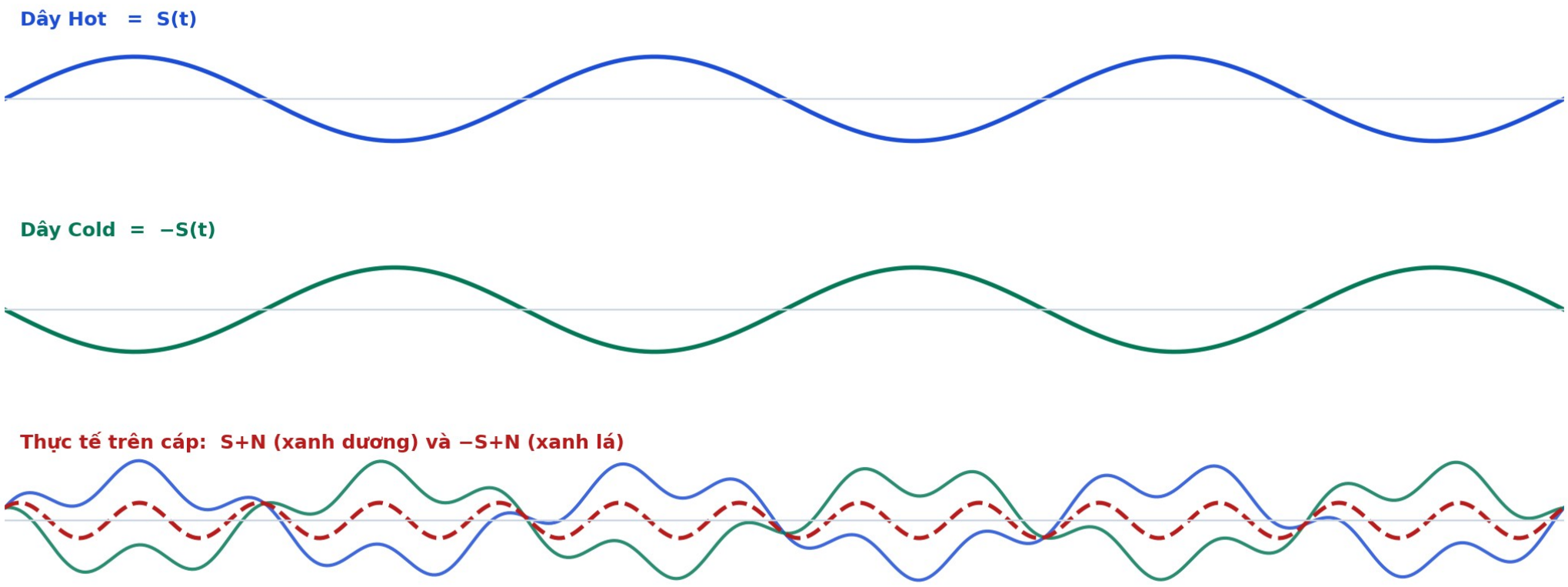
- **Chân 2 — Hot (cực dương):** truyền tải tín hiệu gốc **S(t)**.
- **Chân 3 — Cold (cực âm):** truyền tải bản sao của tín hiệu gốc nhưng **đảo pha 180°**: −S(t).
- **Chân 1 — Shield / Ground:** vỏ lưới bọc kim bao quanh hai dây lõi, chắn nhiễu tĩnh điện.
- Hai dây lõi được **bện xoắn đôi sát nhau** — chi tiết này quan trọng: nó bảo đảm nhiễu cảm ứng vào cả hai dây là **như nhau**.

Hai dây mang hai tín hiệu ngược pha



Hot mang S(t), Cold mang −S(t). Cùng một thông tin, biểu diễn hai chiều ngược nhau.

Nhiễu N(t) cảm ứng đều lên cả hai dây



Vì hai dây bện xoắn sát nhau, nhiễu điện từ N(t) xâm nhập vào cả hai với biên độ và pha như nhau.

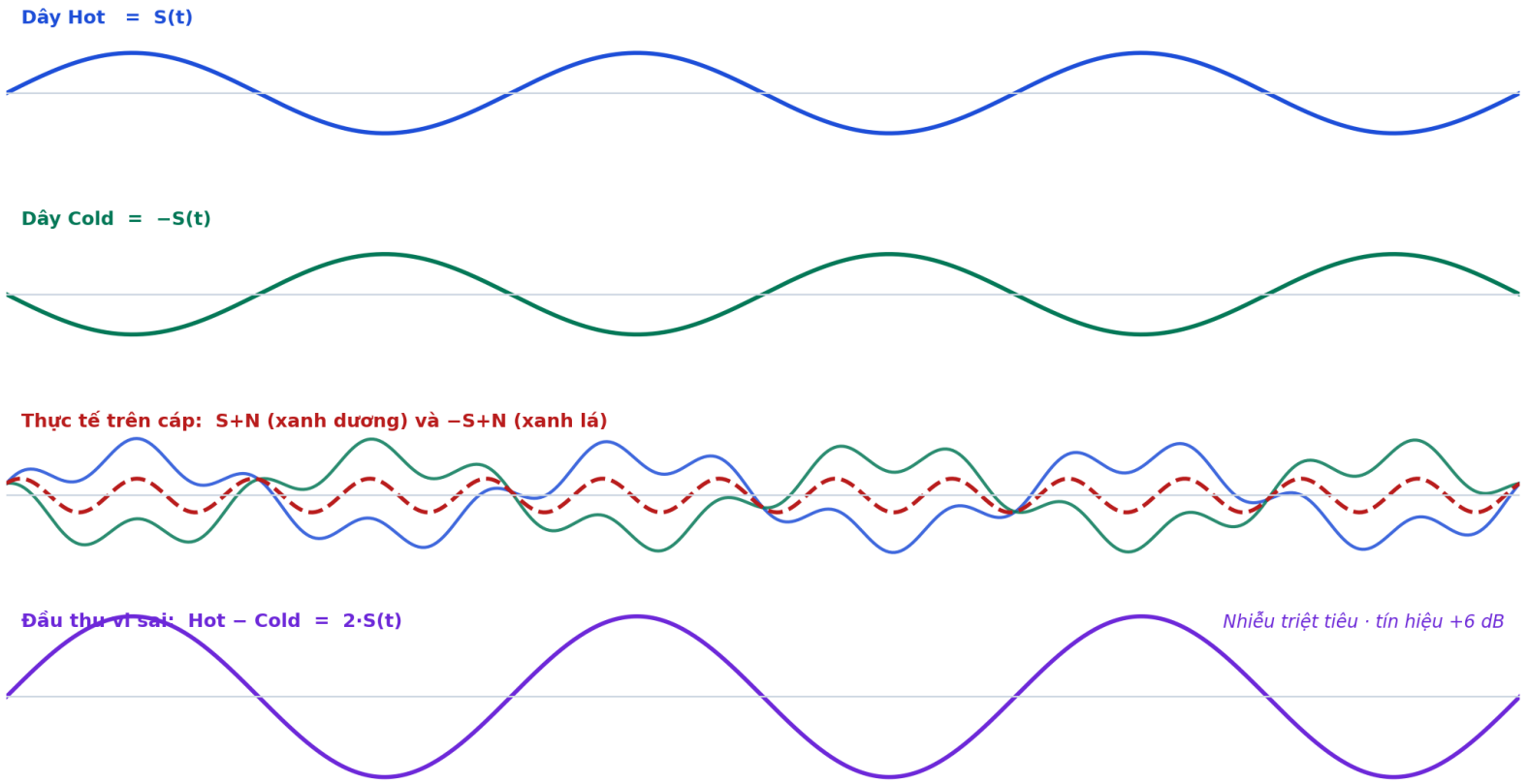
Phép trừ của mạch khuếch đại vi sai

Tại đầu thu, tín hiệu vào **bộ khuếch đại vi sai** (Differential Amplifier). Mạch này thực hiện phép trừ đại số giữa hai đường dây:

$$V_{out}(t) = V_{hot}(t) - V_{cold}(t)$$
$$= [S(t) + N(t)] - [-S(t) + N(t)] = 2\,S(t)$$

- Nhiễu ngoại lai N(t) bị **trừ khử hoàn toàn** — triệt tiêu về 0.
- Tín hiệu hữu ích S(t) được **cộng dồn biên độ lên gấp đôi**, tức lợi thêm **+6 dB**.
- Tỷ số triệt tiêu tín hiệu đồng pha này gọi là **CMRR — Common-Mode Rejection Ratio**.

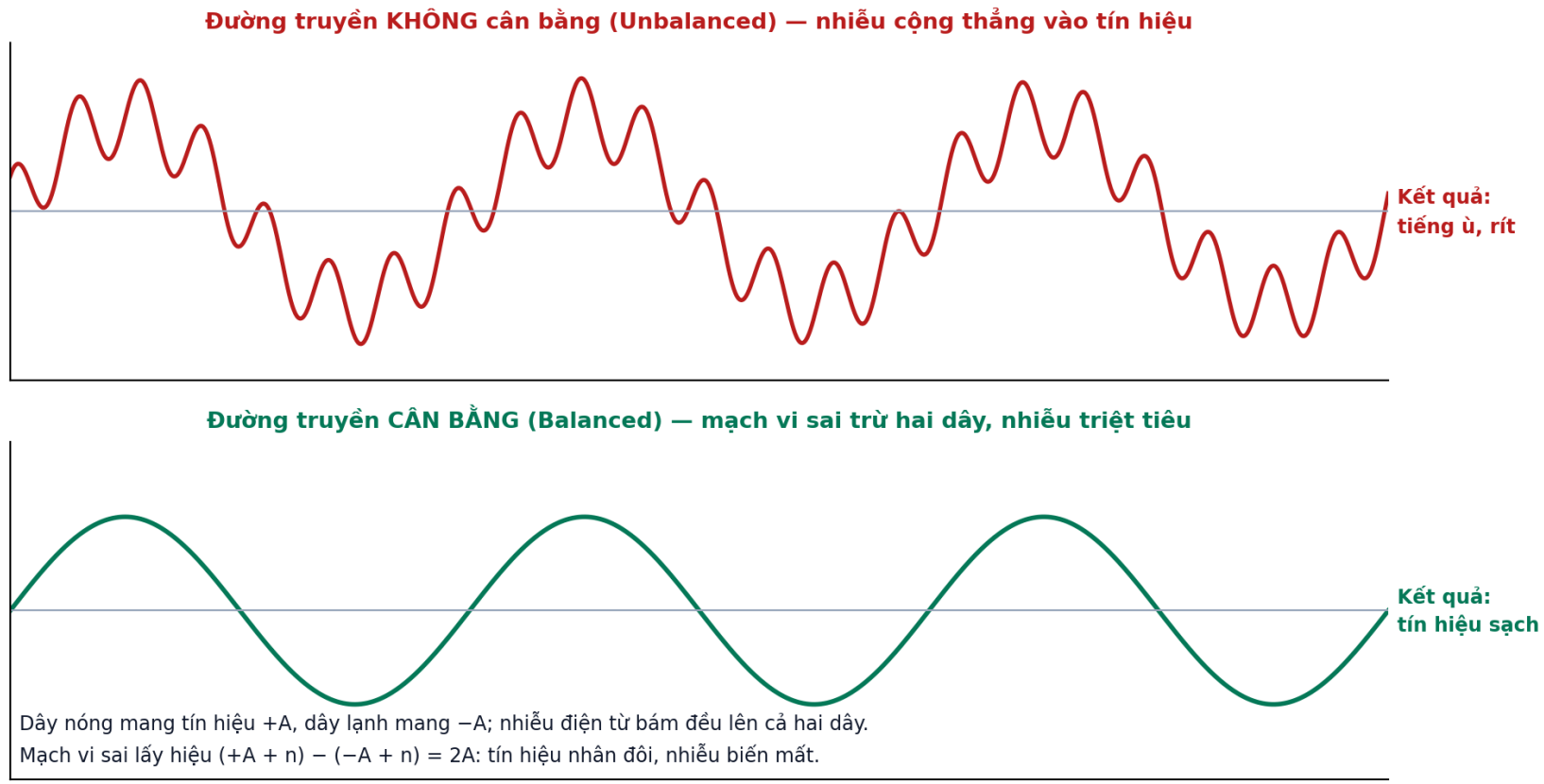
Kết quả: nhiễu biến mất, tín hiệu mạnh gấp đôi



Bốn tầng của quá trình: tín hiệu gốc, bản đảo pha, thực tế trên cáp có nhiễu, và kết quả sau phép trừ vi sai.

HÌNH 2.5

Sơ đồ mạch triệt nhiễu vi sai



Hình 2.5 — Cơ chế truyền dẫn cân bằng và triệt tiêu nhiễu bằng mạch khuếch đại vi sai.

Một phép trừ đại số
giải quyết được vấn đề nhiễu
mà cả ngành âm thanh
vật lộn hàng chục năm.

Đó là lý do mọi thiết bị chuyên nghiệp — không trừ một cái nào — đều dùng đường truyền cân bằng.

MỤC 2.6.1

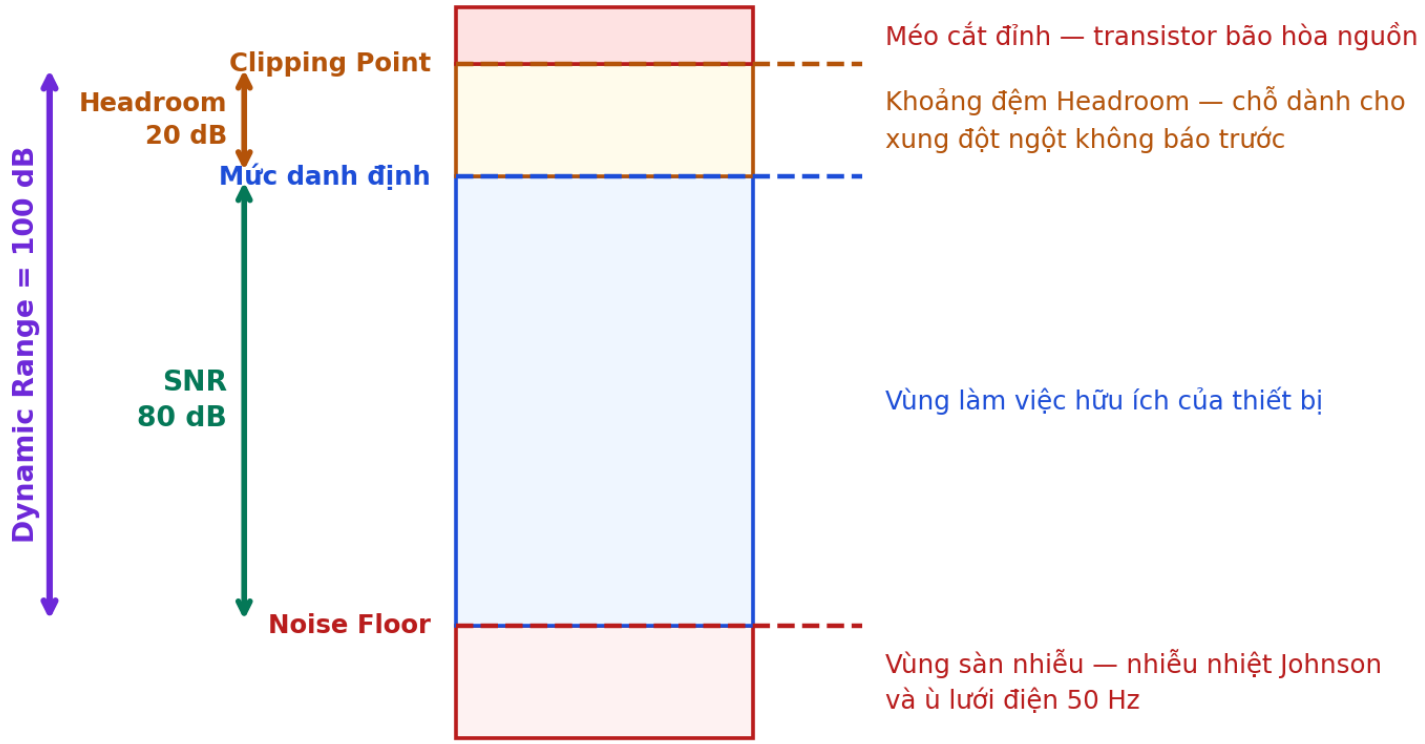
Cấu trúc năng lượng bốn tầng của mọi hệ analog

Bất kỳ hệ thống analog nào cũng bị kẹp giữa hai giới hạn: **dưới** là nhiễu không bao giờ hết, **trên** là ngưỡng méo không được vượt.

- **1. Noise Floor** — tạp âm nền luôn tồn tại ngay cả khi không có tín hiệu. Đến từ chuyển động nhiệt ngẫu nhiên của electron (nhiễu Johnson–Nyquist) và nhiễu rò rỉ từ lưới điện 50/60 Hz.
- **2. SNR** — tỷ số decibel giữa mức tín hiệu danh định và mức sàn nhiễu.
- **3. Clipping Point & Headroom** — ngưỡng điện áp tối đa trước khi transistor bão hòa, và khoảng cách an toàn từ mức danh định lên tới đó.
- **4. Dynamic Range** — khoảng cách decibel từ ngưỡng méo cắt xuống tận sàn nhiễu.

TRỰC QUAN HÓA

Bốn tầng năng lượng trên một thang duy nhất



Dynamic Range = SNR + Headroom. Ba mốc, hai khoảng — hiểu hình này là hiểu toàn bộ mục 2.6.

CÔNG THỨC (2.4)

Tỷ số tín hiệu trên nhiễu SNR

SNR là thước đo trực tiếp "độ sạch" của một thiết bị hoặc một bản thu.

$$\mathrm{SNR} = 20\log_{10}\frac{V_S}{V_N} \quad (\mathrm{dB})$$

- **V_S** — mức điện áp tín hiệu danh định khi thiết bị hoạt động bình thường.
- **V_N** — mức điện áp sàn nhiễu đo được khi không có tín hiệu vào.
- Hệ thống chất lượng cao đòi hỏi **SNR tối thiểu 80 – 100 dB**.
- Nếu SNR thấp dưới **50 dB**, tiếng xì xào lộ rõ ngay khi phát đoạn nhạc êm hoặc khoảng lặng đàm thoại — chính là chỗ khán giả nghe thấy nhất.

VÍ DỤ GIẢI TỪNG BƯỚC

Ví dụ: tính SNR, Headroom và Dynamic Range

Tình huống: Một mạch tiền khuếch đại có sàn nhiễu **V_noise = 10 µV**, mức danh định **V_nom = 1,0 V**, và méo cắt xuất hiện tại **V_max = 10,0 V**. Tính SNR, Headroom và Dynamic Range.

1. Đổi đơn vị: 10 µV = 10 × 10^{-6} V = **10^{-5} V**.

2. **SNR** = 20 · $\log_{10}$(V_nom / V_noise) = 20 · $\log_{10}$(1,0 / 10^{-5}) = 20 · $\log_{10}$(100.000) = 20 × 5 = **100 dB**.

3. **Headroom** = 20 · $\log_{10}$(V_max / V_nom) = 20 · $\log_{10}$(10,0 / 1,0) = 20 × 1 = **20 dB**.

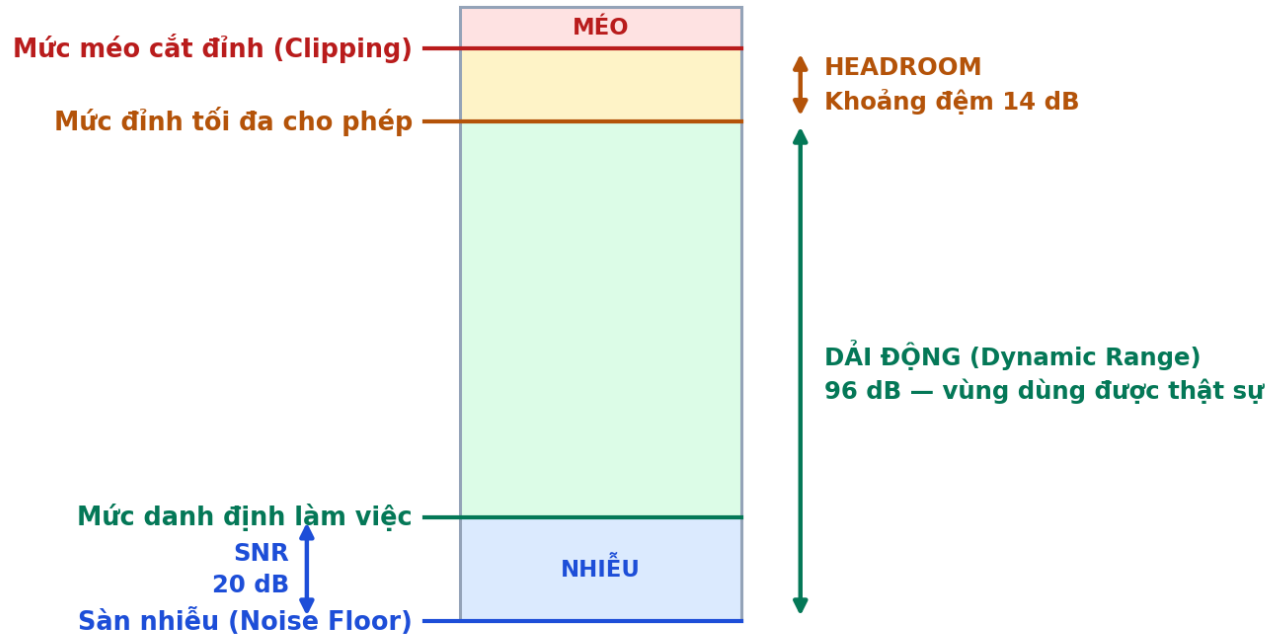
4. **Dynamic Range** = 20 · $\log_{10}$(V_max / V_noise) = 20 · $\log_{10}$(1.000.000) = 20 × 6 = **120 dB**.

5. Kiểm tra chéo: 100 dB + 20 dB = **120 dB** ✓ — đúng quan hệ Dynamic Range = SNR + Headroom.

Kết luận nghề: Thiết bị có SNR 100 dB và dải động 120 dB — thuộc nhóm chất lượng cao. Bước kiểm tra chéo ở cuối là thói quen bắt buộc: nếu tổng không khớp, chắc chắn có một phép tính sai đơn vị.

HÌNH 2.6

Tương quan bốn tầng trong giáo trình



Đặt mức làm việc quá thấp thì nhiễu nổi lên; đặt quá cao thì hết khoảng đệm và méo khi có đỉnh bất ngờ.

Hình 2.6 — Tương quan giữa sàn nhiễu, mức danh định, khoảng đệm và dải động của hệ thống.

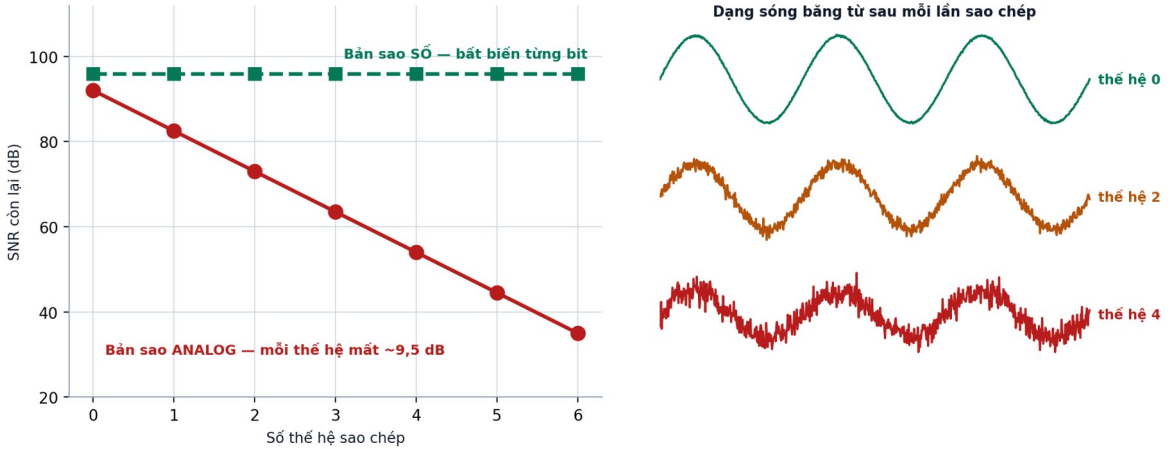
MỤC 2.6.2

Bốn hạn chế cố hữu của analog

- **1. Suy hao thế hệ sao chép:** analog không có "sao chép nguyên bản". Mỗi lần chép, nhiễu nền hai máy cộng dồn, méo hài tăng, dải cao suy giảm. Sau 3 – 4 thế hệ, bản thu đục ngầu và ngập tiếng xì.

- **2. Nhiễu tích lũy trên chuỗi:** mỗi thiết bị thêm vào (EQ, mixer, cáp nối) đều đóng góp nhiễu nhiệt và méo phi tuyến. Chuỗi càng dài, chất lượng càng suy thoái.

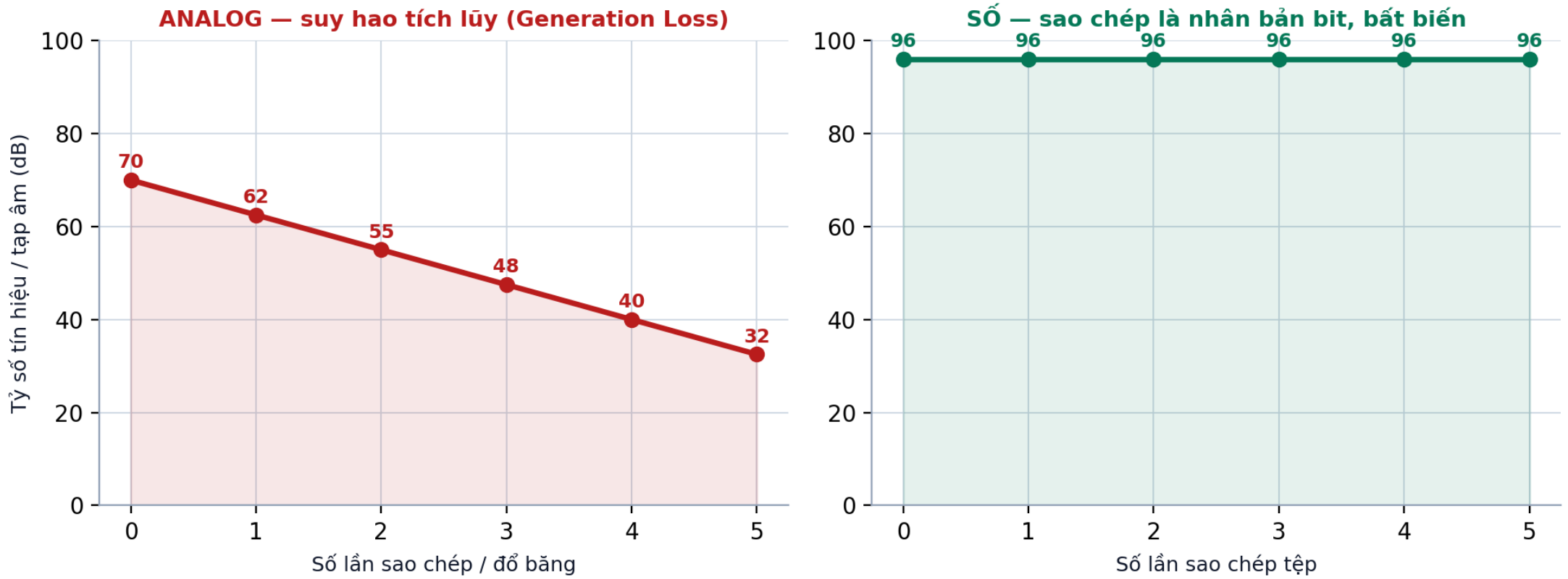
- **3. Trôi dạt và lão hóa vật lý:** điện trở, tụ điện đổi giá trị theo nhiệt độ và thoái hóa hóa học theo thời gian. Hai kênh stereo của mixer analog cổ rất khó giữ cân bằng pha tuyệt đối.



Mỗi thế hệ sao chép analog mất khoảng 9,5 dB SNR; bản sao số bất biến từng bit.

HÌNH 2.7

Suy hao tích lũy so với tính bất biến của dữ liệu số



Hình 2.7 — Suy hao tích lũy qua mỗi lần sao chép của hệ analog so với tính bất biến của dữ liệu số.

CHỐT LẠI MỤC 2.6

Điều thứ tư: động lực số hóa

Sóng âm được **trừu tượng hóa thành chuỗi bit** 0 và 1.

Xử lý bằng **giải thuật toán học** phức tạp mà không sinh thêm một hạt nhiễu vật lý nào.

Sao chép **hàng triệu lần** với độ chính xác từng bit — bit-perfect.

Không trôi dạt theo nhiệt độ, **không lão hóa** theo thời gian.

Lưu trữ **vĩnh cửu** trên đĩa quang hoặc bộ nhớ thể rắn.

Đó là toàn bộ lý do Chương 3 tồn tại — và là lý do ngành đã chuyển dịch.

TIẾT 5

Từ jack cắm analog tới mảng NumPy trong bộ nhớ

- Bảy chặng của dòng dữ liệu qua Audio Interface
- Bộ đệm, độ trễ và lỗi cạn đệm Buffer Underrun
- Ba bài thực hành: sơ đồ hóa · Audacity · Python
- Tổng kết chương và chuẩn bị cho Chương 3



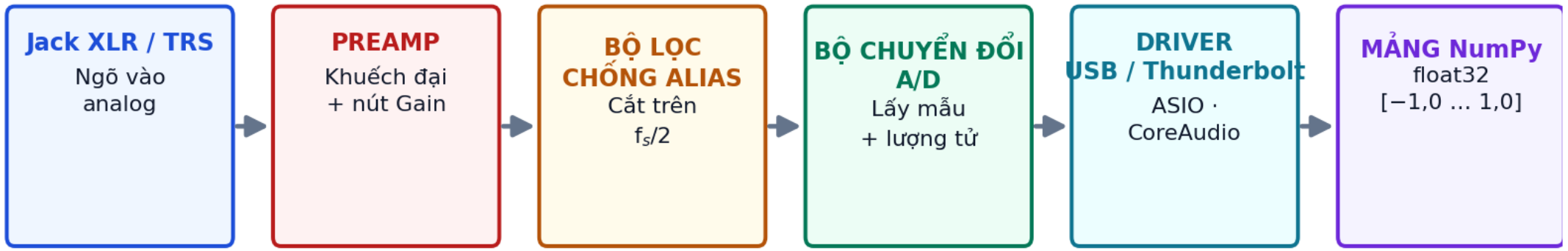
Bảy chặng: từ thanh quản ca sĩ tới mảng số thực

Để một rung động biến thành `numpy.ndarray` trong chương trình Python, tín hiệu phải đi qua một hành trình kỹ thuật chuẩn xác.

- **1.** Điện áp siêu nhỏ từ micro vào jack combo XLR / TRS của Audio Interface.
- **2.** Mạch preamp analog tích hợp khuếch đại lên Line Level.
- **3.** Bộ **lọc thông thấp tương tự** (Anti-Aliasing) triệt mọi tần số vượt nửa tần số lấy mẫu — giới hạn Nyquist.
- **4.** Chip **ADC** lấy mẫu (ví dụ 48.000 mẫu/giây) và lượng tử hóa thành từ mã 24 bit.
- **5.** Dữ liệu vào **bộ đệm vòng phần cứng** (FIFO), truyền qua USB-C / Thunderbolt vào máy tính.
- **6.** Trình điều khiển độ trễ thấp (**ASIO** trên Windows, **ALSA** trên Linux, **CoreAudio** trên macOS) nhận khối mẫu qua **DMA**, lưu vào RAM.
- **7.** Thư viện cấp cao (**SoundFile**, **PyAudio**) đọc bộ đệm, trả về mảng số thực chuẩn hóa **[−1,0 … +1,0]**.

HÌNH 2.8

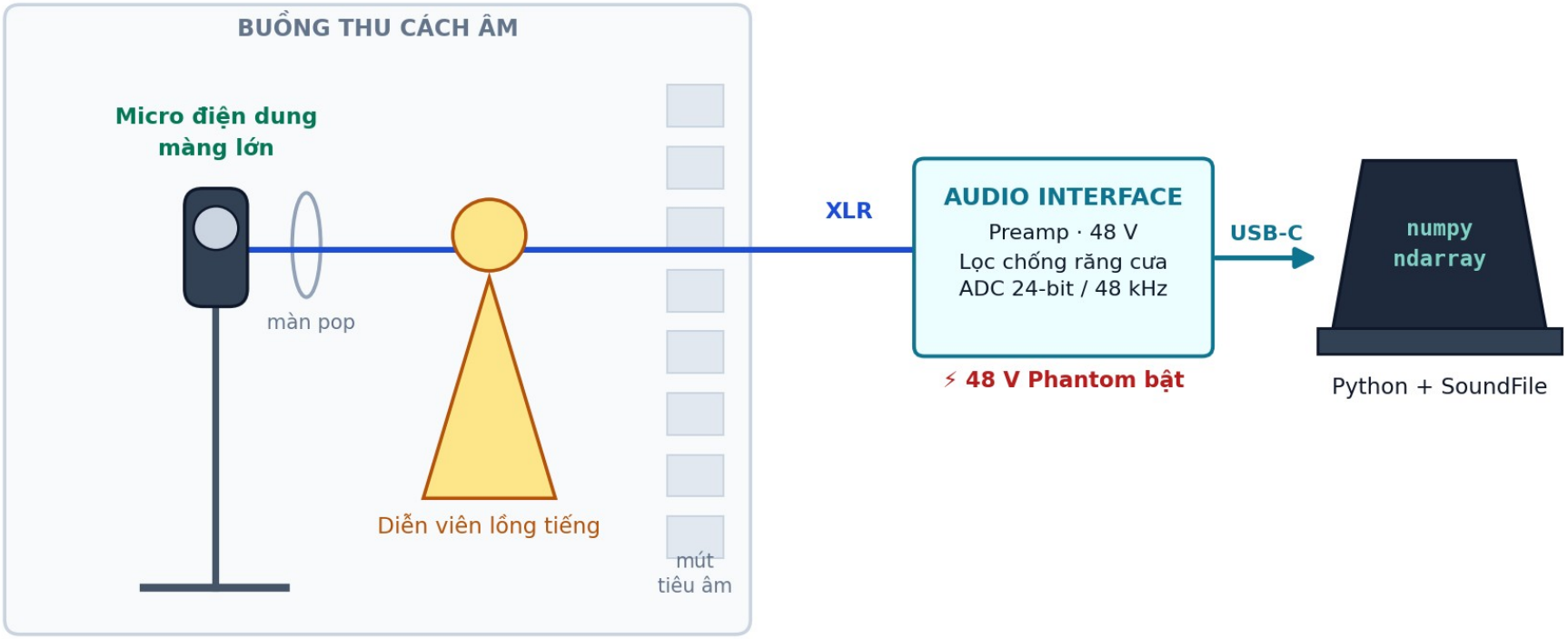
Kiến trúc Audio Interface



Bộ đệm (Buffer): dữ liệu được gom theo khối 64 – 1024 mẫu. Buffer nhỏ → độ trễ thấp nhưng dễ tràn đệm (tiếng nổ lụp bụp); Buffer lớn → chạy ổn định nhưng độ trễ tăng, khó thu chồng lớp trực tiếp.

Hình 2.8 — Kiến trúc phần cứng Audio Interface và dòng chảy dữ liệu tới mảng số trong Python.

Một dây chuyền lồng tiếng hoàn chỉnh



Micro điện dung màng lớn → cáp XLR có 48 V → Audio Interface (preamp, lọc chống răng cưa, ADC 24 bit/48 kHz) → USB-C → mảng NumPy.

Độ trễ bộ đệm

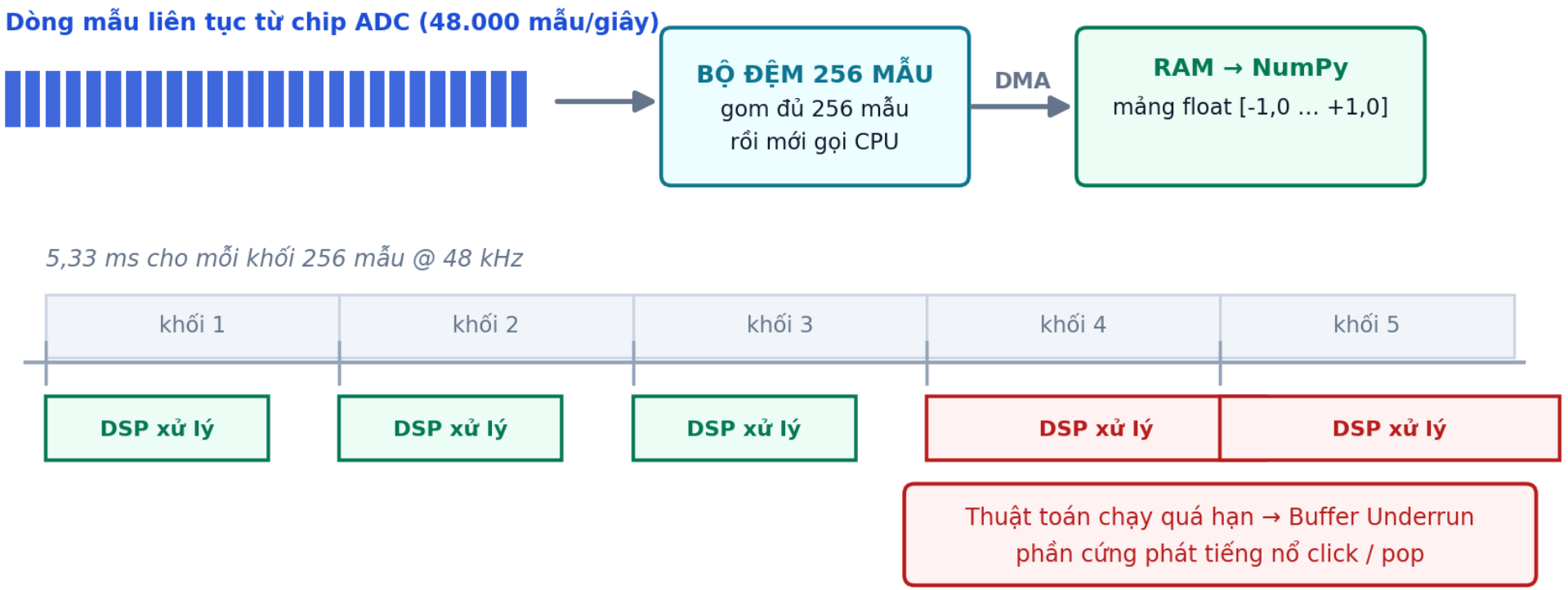
Hệ điều hành là môi trường đa nhiệm — CPU không thể dành 100% chu kỳ đọc từng mẫu đơn lẻ. Âm thanh phải gom thành các gói gọi là **bộ đệm** (Buffer Size), thường là lũy thừa của 2: 64, 128, 256, 512, 1024 mẫu.

$$t_{\text{lat}} = \frac{N_{\text{buffer}}}{f_s} \quad (\text{s})$$

- **N_buffer** — số mẫu trong một khối đệm.
- **f_s** — tần số lấy mẫu (Hz).
- Ví dụ: N = 256 mẫu ở 48.000 Hz ⇒ t = 256 / 48.000 ≈ **5,33 ms**.
- Đặt buffer quá nhỏ để giảm trễ, nhưng thuật toán DSP chạy không kịp ⇒ **Buffer Underrun** — phần cứng phát tiếng nổ click, pop.

TRỰC QUAN HÓA

Cơ chế bộ đệm và thời điểm vỡ tiếng



Ba khối đầu DSP xử lý kịp trong hạn 5,33 ms; khối 4 và 5 chạy quá hạn — phần cứng cạn đệm và phát tiếng nổ.

Ví dụ: tính độ trễ bộ đệm ở ba tần số lấy mẫu

Tình huống: Phần mềm cấu hình khối đệm **N = 512 mẫu**. Tính độ trễ lý thuyết khi chạy ở: (a) 44.100 Hz — chuẩn Audio CD; (b) 48.000 Hz — chuẩn truyền hình; (c) 96.000 Hz — chuẩn phòng thu độ phân giải cao.

1. Áp dụng công thức thời gian làm đầy bộ đệm: **t = N / f_s**.

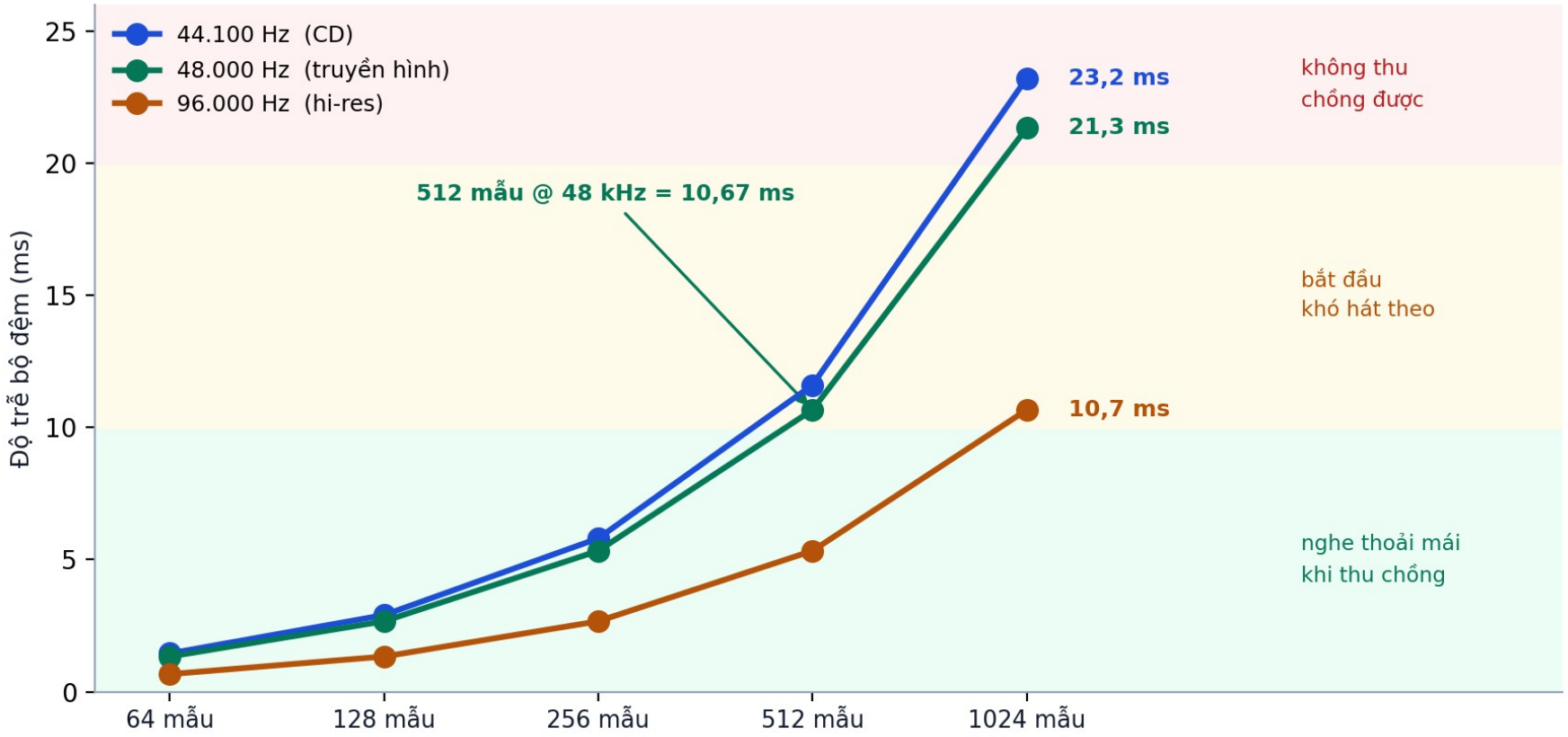
2. (a) Ở 44.100 Hz: t = 512 / 44.100 ≈ 0,01161 s = **11,61 ms**.

3. (b) Ở 48.000 Hz: t = 512 / 48.000 ≈ 0,01067 s = **10,67 ms**.

4. (c) Ở 96.000 Hz: t = 512 / 96.000 ≈ 0,00533 s = **5,33 ms**.

Kết luận nghề: Tần số lấy mẫu càng cao thì cùng một buffer đầy càng nhanh, độ trễ càng thấp. Đó là lý do phòng thu chạy 96 kHz không chỉ vì chất lượng mà còn để **giảm một nửa độ trễ** khi diễn viên thu chồng.

Bảng tra độ trễ theo buffer và tần số lấy mẫu



Dưới 10 ms: nghe thoải mái khi thu chồng. Trên 20 ms: diễn viên không hát theo được.

Mục 2.8 — Hướng dẫn thực hành

Ba bài: sơ đồ hóa chuỗi thu âm · phân tích phổ trong Audacity · lập trình Python đọc siêu dữ liệu và mô phỏng nhiễu

BÀI THỰC HÀNH 2.8.1

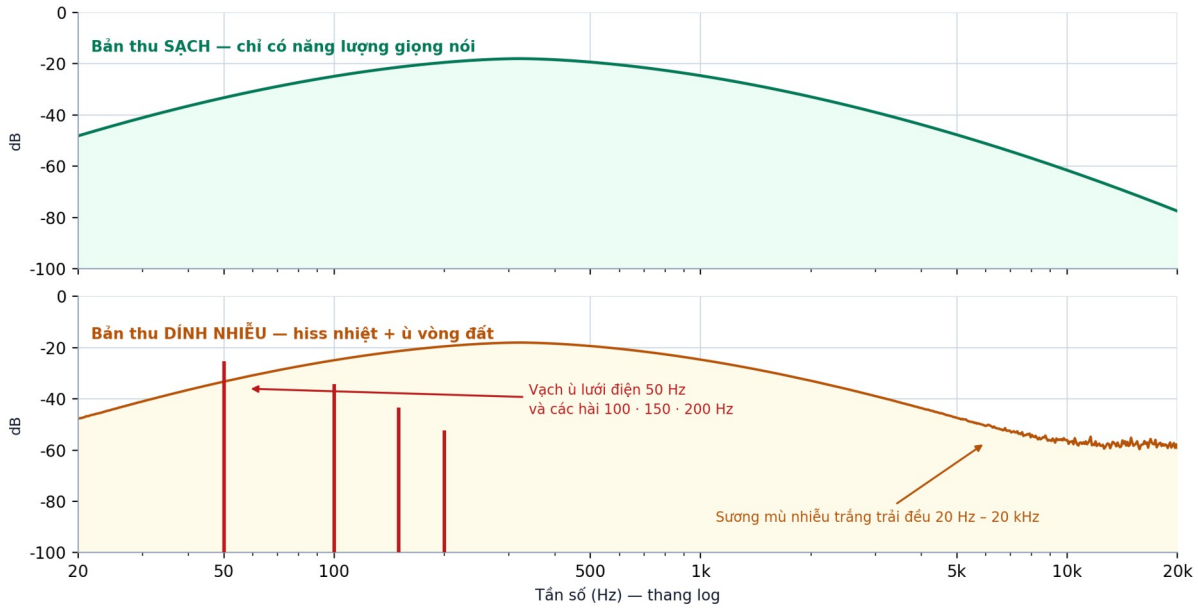
Sơ đồ hóa chuỗi thu âm sân khấu

Sinh viên tự tay vẽ sơ đồ kết nối phần cứng từ một micro ca sĩ biểu diễn trên sân khấu đến máy tính thu âm của kỹ sư.

- **1.** Vị trí đặt micro và chủng loại — dynamic hay condenser, và **lý do chọn**.
- **2.** Chuẩn cáp truyền dẫn — XLR balanced hay TS unbalanced, và lý do.
- **3.** Tầng preamp đặt ở đâu; công tắc **48 V Phantom** có cần bật hay không.
- **4.** Mức tín hiệu đo được **tại từng chặng**: Mic Level, Line Level, Digital Bits.

Phân tích phổ trong Audacity

- **1.** Mở tệp giọng đọc sạch `clean_voice.wav`.
- **2.** Tracks → Add New → Mono Track. Generate → Noise… chọn **White Noise**, biên độ **0.05** — mô phỏng nhiễu nhiệt analog.
- **3.** Thêm track thứ ba: Generate → Tone… chọn **50 Hz** (sóng Sin, biên độ **0.08**) — mô phỏng ù vòng đất do lỗi mass điện lưới.
- **4.** Mix các track lại, chuyển sang chế độ hiển thị **Spectrogram**.
- Quan sát: nhiễu trắng tạo **lớp sương mù trải đều 20 Hz – 20 kHz**; ù xoay chiều tạo **vạch sáng đặc** tại 50 Hz và các bội số hài 100, 150, 200 Hz.



Trên: bản thu sạch. Dưới: bản dính hiss nhiệt và ù lưới điện.

Lập trình Python — hai chương trình mẫu

Sinh viên lưu mã nguồn vào thư mục dự án `src/` và thực thi trên terminal. Hai chương trình phục vụ Mô-đun M1 của học phần Lập trình âm thanh.

- **`src/audio_info.py`** — đọc tệp WAV bằng `soundfile`, trích xuất tần số lấy mẫu, độ sâu bit, số kênh, tổng số mẫu, thời lượng; thống kê biên độ **Peak** và **RMS**, quy ra **dBFS**; cảnh báo clipping hoặc báo headroom còn lại.

- **`src/analog_noise_sim.py`** — mô phỏng thoái hóa analog: sinh nhiễu nhiệt Gauss theo SNR mục tiêu, cộng thêm ù 50 Hz và hài bậc hai 100 Hz, chuẩn hóa chống tràn số rồi ghi ra tệp WAV mới.

- Cả hai script đều thao tác trực tiếp trên mảng NumPy — chính là "mảng số thực chuẩn hóa [−1,0 … +1,0]" ở chặng 7 của Audio Interface.

Thuật toán mô phỏng nhiễu analog hoạt động thế nào

Tình huống: Chương trình `analog_noise_sim.py` cần thêm nhiễu vào một bản thu sạch sao cho tỷ số SNR đạt **đúng** một giá trị đặt trước, ví dụ 35 dB. Làm sao tính được biên độ nhiễu cần sinh?

1. Đo năng lượng tín hiệu sạch: `rms_signal = np.sqrt(np.mean(clean_sig**2))`.
2. Đảo ngược công thức SNR: từ **SNR = 20·log₁₀(rms_signal / rms_noise)** suy ra **rms_noise = rms_signal / 10^(SNR/20)**.
3. Sinh nhiễu nhiệt Gauss đúng năng lượng đó: `np.random.normal(0, rms_noise, num_samples)`.
4. Cộng thêm ù lưới điện Việt Nam: sin 50 Hz biên độ `rms_noise * 0.7`, cộng hài 100 Hz biên độ nhỏ hơn 0,3 lần.
5. Chống tràn số trước khi ghi: nếu `max(|sig|) > 1.0` thì chia toàn mảng cho giá trị đó.

Kết luận nghề: Đây là mẫu tư duy của mọi bài toán DSP: **đo → đảo công thức → sinh → kiểm tra biên**. Bước cuối (chống tràn) là bước sinh viên hay quên nhất, và là nguyên nhân của những bản render méo tiếng không hiểu vì sao.

CÂU HỎI TẠI LỚP

Cắm nhầm micro điện động vào cổng đang bật nguồn 48 V — micro có cháy không?

A Cháy ngay lập tức

B Không sao nếu dùng đúng cáp XLR cân bằng

C Chỉ hỏng nếu để lâu quá 5 phút

D Micro sẽ hoạt động nhưng méo tiếng

Suy nghĩ 30 giây — rồi trả lời

GIẢI THÍCH

Đáp án B — không sao, nếu cáp đúng chuẩn

48 V xuất hiện ĐỒNG PHA trên cả chân 2 và chân 3, nên hiệu điện thế hai đầu cuộn dây micro dynamic bằng 0 V.

- Phantom Power là nguồn DC 48 V truyền **đồng thời qua chân 2 (Hot) và chân 3 (Cold)** của cáp XLR cân bằng.
- Gọi là "ảo" vì **không cần một sợi dây cấp nguồn riêng**.
- Với micro dynamic: 48 V − 48 V = **0 V** giữa hai đầu cuộn dây ⇒ không có dòng chạy qua ⇒ không cháy.
- Nhưng CÓ rủi ro thật khi: dùng **cáp unbalanced bị chập chân**, hoặc cắm **micro Ribbon cổ điển** — 48 V có thể làm cháy đứt dải ruy-băng siêu mảnh.

CHỐT LẠI MỤC 2.8

Tóm tắt Chương 2 — tám điểm cốt lõi

1. Tín hiệu analog liên tục kép: liên tục thời gian và liên tục biên độ. Máy tính hữu hạn buộc phải rời rạc hóa.

2. Transducer: micro dùng cảm ứng điện từ (dynamic) hoặc biến thiên điện dung (condenser); loa dùng lực Lorentz F = B·L·i.

3. Chuỗi 5 mắt xích: Nguồn âm → Micro → Preamp → Xử lý analog → Khuếch đại công suất → Loa.

4. Bốn cấp mức: Mic (1–10 mV) < Instrument (100–300 mV) < Line (1,23 V / +4 dBu) < Speaker (10–50 V).

5. Đường truyền cân bằng: Hot, Cold đảo pha 180°, Ground. Đầu thu vi sai lấy Hot − Cold ⇒ nhiễu triệt tiêu, tín hiệu +6 dB.

6. Đo chất lượng: Noise Floor, SNR, Headroom, Dynamic Range — và Dynamic Range = SNR + Headroom.

7. Hạn chế analog: suy hao thế hệ sao chép, nhiễu tích lũy, lão hóa linh kiện ⇒ tất yếu số hóa.

8. Cầu nối lập trình: Audio Interface lọc chống răng cưa → ADC → buffer → DMA → RAM → mảng NumPy.

Chuẩn bị cho Chương 3 — Số hóa âm thanh

Chương tiếp theo bước hoàn toàn vào thế giới số: **lấy mẫu, lượng tử hóa và định lý Nyquist–Shannon** (Mô-đun M2). Ba nhiệm vụ chuẩn bị bắt buộc:

- **1. Bài tập về nhà:** vẽ sơ đồ chuỗi thu âm podcast gồm 2 người nói, 1 Audio Interface USB 2 cổng, 1 laptop. Ghi rõ chủng loại micro, cáp nối và mức tín hiệu tại từng chặng.

- **2. Cài đặt môi trường:** hoàn tất `soundfile`, `numpy`, `scipy` trong môi trường ảo Python 3.12. Chạy thử thành công cả hai script `src/audio_info.py` và `src/analog_noise_sim.py`.

- **3. Đọc trước:** tìm hiểu vì sao tần số lấy mẫu bắt buộc phải lớn hơn ít nhất **2 lần** tần số cao nhất của tín hiệu ($f_s \geq 2 \cdot f_{max}$), và hiện tượng **răng cưa méo phổ (Aliasing)** xảy ra như thế nào.

Hết Chương 2.

Chương 3 — Số hóa âm thanh: lấy mẫu, lượng tử hóa và định lý Nyquist–Shannon.

Tài liệu tham khảo đầy đủ ở cuối Chương 2, trang 26 giáo trình.