MỤC LỤC

Chương 2. Tín hiệu analog và chuỗi thiết bị âm thanh.....7
2.1 Tín hiệu liên tục theo thời gian và bản chất âm thanh analog.....8
2.2 Nguyên lý hoạt động của các bộ chuyển đổi năng lượng.....9
2.3 Cấu trúc và vận hành chuỗi tín hiệu analog.....10
2.4 Mức tín hiệu, trở kháng và đường truyền cân bằng.....12
2.5 Thông số đo lường chất lượng và hạn chế của analog.....16
2.6 Kiến trúc Audio Interface và kết nối với lập trình Python.....19
2.7 Hướng dẫn thực hành.....21
2.8 Câu hỏi thường gặp.....24
2.9 Câu hỏi ôn tập và bài tập.....26
2.10 Thuật ngữ chuyên ngành và hướng dẫn chuẩn bị.....27

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 2.1 Bản chất tín hiệu analog liên tục và quá trình rời rạc hóa thành tín hiệu số trong bộ nhớ máy tính.....9
Hình 2.2 Nguyên lý hai bộ chuyển đổi năng lượng cơ bản: microphone và loa điện động.....10
Hình 2.3 Phòng điều khiển với bàn trộn analog, giá thiết bị tiền khuếch đại – nén và máy ghi băng từ.....11
Hình 2.4 Sơ đồ khối chuỗi tín hiệu âm thanh analog từ nguồn phát tới loa tái tạo.....11
Hình 2.5 Cặp đồng hồ chỉ mức kiểu VU với thang chia từ −20 đến +5.....12
Hình 2.6 Bốn cấp độ mức tín hiệu chuẩn và dải điện áp tương ứng.....13
Hình 2.7 So sánh các đầu giắc cắm âm thanh, thước đo làm chuẩn kích thước.....14
Hình 2.8 Các ổ cắm RCA (hoa sen) ở mặt sau bộ khuếch đại dân dụng.....15
Hình 2.9 Cặp đầu nối XLR ba chân: đầu đực và đầu cái.....15
Hình 2.10 Cơ chế truyền dẫn cân bằng và triệt tiêu nhiễu bằng mạch khuếch đại vi sai 16
Hình 2.11 Dạng sóng và thanh đo mức của bản thu mức vừa phải (nửa đầu) và bản thu quá tải bị cắt đỉnh (nửa sau) trong Audacity.....17
Hình 2.12 Tương quan giữa sàn nhiễu, mức danh định, khoảng đệm và dải động của hệ thống.....18
Hình 2.13 Suy hao tích lũy qua mỗi lần sao chép của hệ analog so với tính bất biến của dữ liệu số (số liệu minh họa).....19
Hình 2.14 Các bộ giao tiếp âm thanh (Audio Interface) USB với ngõ vào micro/line và núm khuếch đại.....19
Hình 2.15 Kiến trúc phần cứng Audio Interface và dòng chảy dữ liệu tới mảng số trong Python.....20
Hình 2.16 Cấu hình thiết bị thu và tham số bộ đệm trong Audacity (Edit > Preferences > Audio Settings).....21
Hình 2.17 Phổ tần số của bản thu sạch (trái) và bản thu dính nhiễu ù 50 Hz (phải) trong hộp thoại Frequency Analysis của Audacity.....22

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 2.1 Thông số kỹ thuật định lượng của 4 cấp mức tín hiệu âm thanh.....13
Bảng 2.2 Đối chiếu thuật ngữ chuyên ngành Analog và Chuỗi thiết bị.....27

DANH MỤC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

Ký hiệu viết tắt	Thuật ngữ tiếng Anh đầy đủ	Ý nghĩa chuyên môn trong kỹ thuật Audio - Video
ADSR	Attack - Decay - Sustain - Release	Mô hình đường bao biên độ 4 giai đoạn theo thời gian trong thiết kế tiếng động
AES	Audio Engineering Society	Hội Kỹ sư Âm thanh Quốc tế — tổ chức ban hành các tiêu chuẩn âm thanh chuyên nghiệp
DAW	Digital Audio Workstation	Trạm làm việc âm thanh số (Pro Tools, DaVinci Resolve Fairlight, Nuendo, Reaper)
dB	Decibel	Đơn vị logarit biểu diễn tỷ số giữa hai đại lượng biên độ hoặc công suất
dB SPL	Decibel Sound Pressure Level	Mức áp suất âm thanh trong không khí quy chiếu theo ngưỡng nghe 20 µPa
dBFS	Decibels Relative to Full Scale	Thang đo decibel số toàn dải; 0 dBFS là trần tuyệt đối của hệ thống kỹ thuật số
dBTP	Decibels True Peak	Mức đỉnh thực của tín hiệu số có tính toán hiện tượng liên mẫu (inter-sample peaks)
dBA / dBC	A-weighted / C-weighted Decibels	Mức đo decibel qua mạch lọc bù trừ đặc tuyến độ nhạy của tai người
EBU	European Broadcasting Union	Hiệp hội Phát thanh Truyền hình Châu Âu (tác giả tiêu chuẩn EBU R128)
HRTF	Head-Related Transfer Function	Hàm truyền liên quan đến đầu người — cơ sở định vị không gian 3 chiều và âm thanh nhị nhĩ
ILD	Interaural Level Difference	Độ chênh lệch mức áp suất âm thanh giữa hai tai (chủ đạo ở tần số cao > 1,5 kHz)
ITD	Interaural Time Difference	Độ chênh lệch thời gian âm thanh truyền đến hai tai (chủ đạo ở tần số thấp < 1,5 kHz)
ITU-R	ITU Radiocommunication Sector	Phân ban Vô tuyến của Liên minh Viễn thông Quốc tế (tác giả chuẩn BS.1770)
LKFS / LUFS	Loudness K-weighted / Units Full Scale	Đơn vị đo lường độ to cảm nhận chuẩn hóa theo ITU-R BS.1770
LRA	Loudness Range	Dải độ to — chỉ số mô tả độ động giữa đoạn to và đoạn nhỏ của chương trình (đơn vị LU)
NC / NR	Noise Criteria / Noise Rating	Đường cong tiêu chí đánh giá mức độ ồn nền của phòng thu

Ký hiệu viết tắt	Thuật ngữ tiếng Anh đầy đủ	Ý nghĩa chuyên môn trong kỹ thuật Audio - Video
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health	Viện Quốc gia về An toàn và Sức khỏe Nghề nghiệp Hoa Kỳ
RMS	Root Mean Square	Giá trị căn bậc hai trung bình bình phương (năng lượng hiệu dụng của tín hiệu)
RT60	Reverberation Time 60 dB	Thời gian để năng lượng âm vang suy giảm 60 dB sau khi ngắt nguồn âm
SMPTE	Society of Motion Picture and Television Engineers	Hiệp hội Kỹ sư Điện ảnh và Truyền hình Quốc tế
SNR	Signal-to-Noise Ratio	Tỷ số tín hiệu trên tạp âm (đo bằng dB)

CHƯƠNG 2
TÍN HIỆU ANALOG VÀ CHUỖI THIẾT BỊ ÂM THANH

Chương 2 nối tiếp nền tảng vật lý của Chương 1 và chuyển từ sóng âm trong không gian sang tín hiệu điện chạy trong dây dẫn. Chương trình bày bản chất tín hiệu liên tục theo thời gian, nguyên lý của hai bộ chuyển đổi năng lượng cơ bản là microphone và loa điện động, cấu trúc chuỗi thiết bị analog, bốn cấp độ mức tín hiệu, khái niệm trở kháng và đường truyền cân bằng, các thông số đo lường chất lượng, cùng những hạn chế cố hữu đã dẫn tới bước chuyển sang kỹ thuật số.

Mục tiêu của chương

Sau khi đọc xong chương này, người đọc có thể:

1. **Về kiến thức lý thuyết:** Định nghĩa chính xác bản chất của tín hiệu liên tục theo thời gian; phân tích cơ chế chuyển đổi năng lượng âm học – cơ học – điện từ của micro và loa; mô tả các khối cấu thành chuỗi tín hiệu analog từ nguồn phát đến thiết bị tái tạo; phân biệt bản chất kỹ thuật của 4 cấp độ mức tín hiệu (Mic, Instrument, Line, Speaker); giải thích nguyên lý triệt tiêu nhiễu của đường truyền cân bằng; phân tích các thông số chất lượng SNR, Noise Floor, Headroom, Dynamic Range và chỉ ra 4 hạn chế cố hữu của hệ thống analog dẫn tới yêu cầu tất yếu phải số hóa.
2. **Về kỹ năng chuyên môn:** Sơ đồ hóa chuỗi tín hiệu phòng thu thực tế; sử dụng phần mềm Audacity để phát hiện, phân tích và so sánh phổ tín hiệu sạch với bản thu dính tạp âm nền (hiss) và ù xoay chiều (ground hum); viết chương trình Python với thư viện SoundFile và NumPy để đọc tệp WAV, trích xuất cấu trúc siêu dữ liệu âm thanh (sample rate, bit depth, kênh) và lập trình giải thuật mô phỏng việc pha trộn nhiễu nhiệt analog.
3. **Về tư duy hệ thống: Kết nối được thế giới phần cứng vật lý với các cấu trúc dữ liệu phần mềm; hiểu** rõ tầm quan trọng của tầng tiền khuếch đại sạch đối với chất lượng của mọi thuật toán học máy và xử lý âm thanh số về sau.

Các thuật ngữ then chốt cần nắm vững: Tín hiệu liên tục (Continuous-time signal) · Bộ chuyển đổi âm điện (Transducer) · Micro điện động (Dynamic mic) · Micro điện dung (Condenser mic) · Tiền khuếch đại (Preamplifier) · Chuỗi tín hiệu (Signal chain) · Mức tín hiệu (Signal levels: Mic/Instrument/Line/Speaker) · Phối hợp trở kháng (Impedance matching) · Đường truyền cân bằng (Balanced audio) · Tỷ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) · Dải động (Dynamic range) · Khoảng đệm an toàn (Headroom) · Suy hao thế hệ sao chép (Generation loss) · Bộ chuyển đổi tương tự - số (ADC) · Audio Interface.

2.1 Tín hiệu liên tục theo thời gian và bản chất âm thanh analog

2.1.1 Khái niệm tín hiệu liên tục theo thời gian

Trong thế giới vật lý, mọi hiện tượng âm thanh tự nhiên đều tồn tại dưới dạng các quá trình liên tục. Khi một nhạc cụ phát ra âm thanh hoặc một ca sĩ cất tiếng hát, dây đàn dao động hoặc thanh đới rung động làm biến đổi mật độ phân tử không khí một cách nhịp nhàng. Biến thiên áp suất này lan truyền trong không gian dưới dạng sóng cơ học, và tại mọi thời điểm bất kỳ, dù nhỏ đến mức nào, áp suất không khí luôn có một giá trị xác định và biến thiên trơn tru.

Tín hiệu analog (tín hiệu tương tự) được định nghĩa là một đại lượng vật lý, thông thường là điện áp hoặc dòng điện, có biên độ biến thiên liên tục theo thời gian và tỷ lệ tương đồng (analogous) với biến thiên áp suất của sóng âm ban đầu. Nghĩa là sóng áp suất không khí biến thiên theo quy luật nào thì điện thế xuất hiện trên hai đầu dây dẫn của hệ thống analog cũng biến thiên mô phỏng chính xác theo hình thái đó [3].

2.1.2 Biểu diễn toán học của tín hiệu liên tục

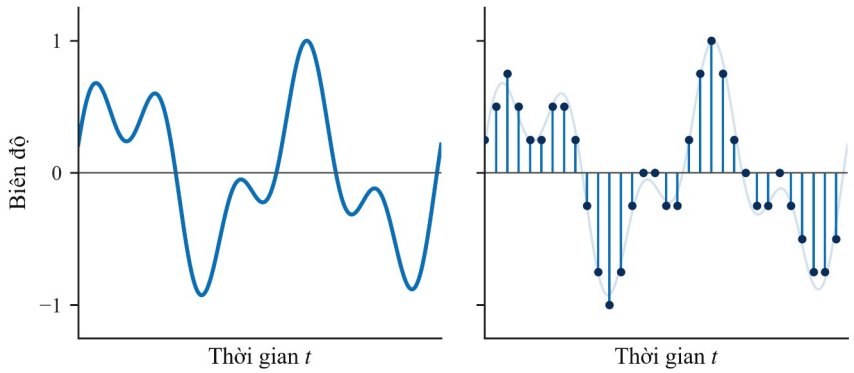
Dưới góc độ toán học giải tích, một tín hiệu âm thanh analog được mô tả bởi một hàm số liên tục của biến số thời gian thực:

$$v(t) \in \mathbb{R}, \quad \forall\, t \in [t_1,\ t_2] \tag{2.1}$$

Hàm số v(t) có hai đặc tính toán học căn bản:

- **Tính liên tục trên trục thời gian:** Tập xác định của biến số thời gian t là một khoảng số thực liên tục không đếm được, nên giữa hai mốc thời gian bất kỳ t_1 và t_2 (với $t_1 < t_2$) luôn tồn tại vô số thời điểm trung gian.
- **Tính liên tục trên trục biên độ:** Tập giá trị của biên độ v(t) cũng là một dải số thực liên tục, do đó điện áp tín hiệu có thể nhận bất kỳ giá trị nào trong giới hạn vật lý của nguồn cung cấp năng lượng mà không bị chia cắt thành các bậc rời rạc.

> **CẦU NỐI LẬP TRÌNH 2.1 — VÌ SAO MÁY TÍNH KHÔNG THỂ XỬ LÝ TRỰC TIẾP TÍN HIỆU ANALOG LIÊN TỤC?**
>
> Một giây âm thanh analog trong thế giới thực chứa vô hạn điểm thời gian, và tại mỗi điểm thời gian, giá trị biên độ điện áp có độ chính xác vô hạn chữ số sau dấu phẩy thập phân.
>
> Máy tính điện tử là một hệ thống số có kiến trúc hữu hạn (Finite State Machine), với bộ nhớ RAM và thanh ghi CPU chỉ có dung lượng hữu hạn (32-bit hoặc 64-bit). Do đó, máy tính không thể lưu trữ hay xử lý một lượng thông tin gồm vô hạn điểm.
>
> **Vì vậy cần thực hiện hai phép biến đổi:** lấy mẫu (Sampling, chọn lọc một số hữu hạn điểm thời gian) và lượng tử hóa (Quantization, làm tròn biên độ thành các số nhị phân hữu hạn); hai phép biến đổi này mở ra kỷ nguyên kỹ thuật số.



(a) tín hiệu analog: liên tục (b) tín hiệu số: các mẫu rời rạc

Hình 2.1 Bản chất tín hiệu analog liên tục và quá trình rời rạc hóa thành tín hiệu số trong bộ nhớ máy tính

2.2 Nguyên lý hoạt động của các bộ chuyển đổi năng lượng

Một hệ thống âm thanh không thể hoạt động nếu thiếu các mắt xích giao tiếp giữa môi trường sóng cơ học và mạch điện tử. Các thiết bị đảm nhiệm vai trò cầu nối này được gọi là bộ chuyển đổi năng lượng (transducers).

2.2.1 Khái niệm bộ chuyển đổi âm điện

Bộ chuyển đổi âm điện là thiết bị kỹ thuật có chức năng biến đổi năng lượng âm học (sóng áp suất cơ học trong không khí) thành năng lượng điện (tín hiệu điện áp xoay chiều) hoặc thực hiện quá trình chuyển đổi ngược lại. Hai bộ chuyển đổi kinh điển và quan trọng nhất trong chuỗi âm thanh là Microphone (thu âm) và Loudspeaker (phát âm).

2.2.2 Microphone: chuyển đổi cơ học sang điện thế

Microphone đóng vai trò là cửa ngõ đón nhận sóng âm. Khi sóng âm truyền đến mặt trước micro, sự chênh lệch áp suất làm màng rung (diaphragm) dao động cơ học. Tùy thuộc vào cơ chế biến đổi dao động cơ thành điện áp, micro được phân loại thành hai dòng chính [1]:

1. **Micro điện động (Dynamic Microphone):** Hoạt động dựa trên định luật cảm ứng điện từ Faraday. Màng rung cơ học được gắn liền với một cuộn dây đồng siêu mảnh (voice coil) treo trong khe hẹp của một nam châm vĩnh cửu. Khi sóng âm làm màng rung chuyển động tịnh tiến, cuộn dây cắt qua các đường sức từ trường và sinh ra một suất điện động cảm ứng tỷ lệ thuận với vận tốc dao động của màng rung. Dòng micro này có độ bền cơ học cao, chịu được áp lực âm thanh rất lớn (SPL cao từ trống kick hoặc amply guitar) và không đòi hỏi nguồn cấp điện ngoài.
2. **Micro điện dung (Condenser Microphone):** Hoạt động dựa trên nguyên lý biến thiên điện dung của tụ điện phẳng. Màng rung kim loại siêu nhẹ đóng vai trò là bản cực chuyển động, đặt cách một bản cực cố định (backplate) bằng kim loại một khoảng cách d rất nhỏ (vài micromet). Điện dung của tụ điện được xác định bởi công thức $C = \varepsilon \cdot S / d$. Khi màng rung chuyển dịch dưới tác động của sóng âm, khoảng cách d biến thiên làm điện dung C thay

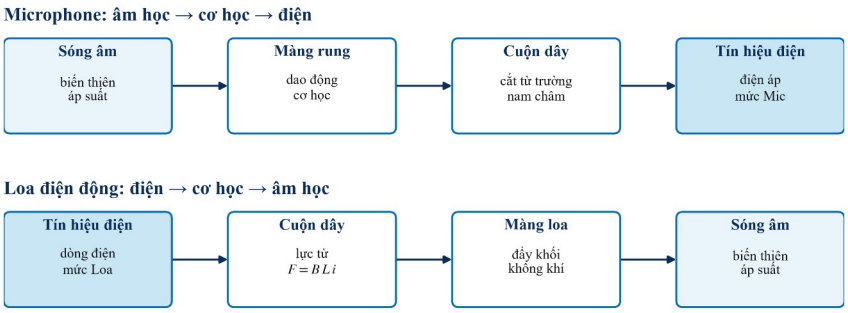
đổi; do điện tích Q được nạp không đổi, hiệu điện thế trên hai bản cực v(t) = Q / C(t) biến thiên theo sóng âm. Micro điện dung có đáp ứng tần số rất chi tiết và tốc độ đáp ứng xung (transient response) tốt, nhưng đòi hỏi nguồn điện một chiều 48V (Phantom Power) để nạp điện tích cho bản cực và nuôi mạch tiền khuếch đại trở kháng cao bên trong thân mic.

2.2.3 Loa điện động: chuyển đổi điện thế sang cơ học và âm học

Loa điện động (Moving-coil Loudspeaker) hoạt động theo nguyên lý đảo ngược so với micro điện động, dựa trên định luật lực từ Lorentz. Khi dòng điện xoay chiều công suất lớn chạy qua cuộn dây âm (voice coil) nằm trong từ trường của nam châm vĩnh cửu, từ trường do dòng điện sinh ra tương tác với từ trường nam châm và tạo nên lực cơ học đẩy cuộn dây dao động dọc trục [1]:

$$F(t) = B \cdot L \cdot i(t) \quad \text{(N)} \tag{2.2}$$

Trong đó B là mật độ từ thông, L là chiều dài dây dẫn cuộn cảm, và i(t) là dòng điện tức thời. Cuộn dây được gắn cứng với màng loa (cone) bằng giấy, sợi carbon hoặc polymer. Màng loa dao động sẽ cưỡng bức các lớp không khí xung quanh dao động theo, tái tạo lại sóng áp suất âm học truyền đến tai người nghe.



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

2.3 Cấu trúc và vận hành chuỗi tín hiệu analog

2.3.1 Sơ đồ khối tổng quát của chuỗi tín hiệu

Chuỗi tín hiệu analog (Analog Signal Chain) là một chuỗi mắc nối tiếp các thiết bị điện tử, qua đó tín hiệu âm thanh được chuyển đổi, khuếch đại, định hình và tái tạo. Một chuỗi tín hiệu tiêu chuẩn gồm 5 mắt xích tuần tự có vị trí cố định [1]:

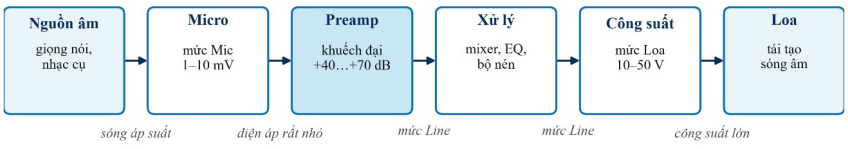
Hình 2.3 cho thấy một phòng điều khiển thực tế, trong đó bàn trộn analog nhiều kênh, giá thiết bị tiền khuếch đại – nén và máy ghi băng từ là các mắt xích điển hình của chuỗi tín hiệu analog.



Hình 2.3 Phòng điều khiển với bàn trộn analog, giá thiết bị tiền khuếch đại – nén và máy ghi băng từ

Nguồn: Marco Tucconi, CC BY-SA 4.0, Wikimedia Commons (truy cập 05/11/2026).

1. **Nguồn âm tự nhiên (Acoustic Sound Source):** Giọng hát người, nhạc cụ mộc và âm thanh môi trường phát ra sóng áp suất không khí.
2. **Bộ chuyển đổi đầu vào (Input Transducer):** Microphone thu sóng áp suất và chuyển thành tín hiệu điện mức vi mô (Mic Level).
3. **Tầng tiền khuếch đại (Preamplifier):** Tăng điện áp rất nhỏ của micro lên mức tiêu chuẩn (Line Level).
4. **Tầng xử lý tín hiệu analog (Processing Stage):** Gồm bàn trộn (Mixer), bộ cân bằng âm sắc (Equalizer - EQ) và bộ kiểm soát dải động (Dynamic Compressor/Limiter).
5. **Tầng khuếch đại công suất và tái tạo (Power Amplification & Playback):** Đưa dòng điện và điện áp lên mức công suất lớn (Speaker Level) để dẫn động cuộn dây của màng loa.



Hình 2.4 Sơ đồ khối chuỗi tín hiệu âm thanh analog từ nguồn phát tới loa tái tạo

2.3.2 Vai trò của tầng tiền khuếch đại

Tín hiệu điện do màng rung micro sinh ra rất yếu, chỉ dao động từ vài microvolt (µV) đến vài milivolt (mV), nên không đủ để kích hoạt các mạch xử lý analog như EQ hay đưa vào chip chuyển đổi số ADC. Ngoài ra, nếu truyền một tín hiệu vài milivolt qua dây cáp dài, năng lượng tín hiệu sẽ nhanh chóng bị nhiễu điện từ xung quanh lấn át hoàn toàn.

Nhiệm vụ của Preamp là cung cấp hệ số khuếch đại điện áp sạch (Gain) từ +40 dB đến +70 dB (tương đương nhân biên độ điện áp lên từ 100 đến hơn 3.000

lần), đưa tín hiệu lên mức chuẩn đường truyền (Line Level ~ 1,23 V). Vị trí của Preamp phải nằm sát đầu ra của micro. Chất lượng linh kiện op-amp và thiết kế mạch của Preamp quyết định trực tiếp độ sạch của toàn bộ chuỗi thu âm: một Preamp chất lượng thấp sẽ khuếch đại cả tiếng xì nhiễu nhiệt (thermal hiss) và làm suy giảm vĩnh viễn chất lượng bản thu [2].

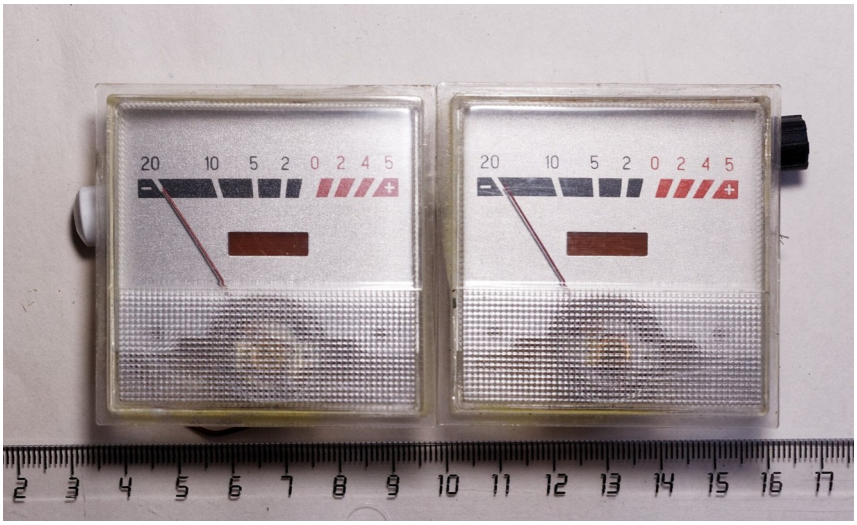
> **CẦU NỐI LẬP TRÌNH 2.2 — MÔ PHỎNG CHUỖI PHẦN CỨNG BẰNG PHẦN MỀM (DSP PLUGIN CHAIN)**
>
> Trong các máy trạm âm thanh số (DAW) và trong mã nguồn xử lý âm thanh (Python / C++), người đọc thường gặp khái niệm 'Plugin Chain' hay chuỗi hiệu ứng (FX Chain).
>
> Plugin Chain thực chất là sự mô phỏng bằng toán học toàn bộ chuỗi thiết bị analog: hàm đọc file thay cho nguồn và mic, hàm chuẩn hóa Gain thay cho Preamp, mảng các thuật toán bộ lọc số thay cho EQ phần cứng, và mạch nén số thay cho Hardware Compressor.
>
> Hiểu rõ chuỗi tín hiệu vật lý giúp lập trình viên sắp xếp thứ tự gọi các hàm xử lý DSP một cách tối ưu, tránh hiện tượng tràn số và méo tiếng.

2.4 Mức tín hiệu, trở kháng và đường truyền cân bằng

2.4.1 Bốn cấp độ mức tín hiệu tiêu chuẩn

Trong kỹ thuật âm thanh, việc phối ghép sai cấp độ mức tín hiệu là nguyên nhân hàng đầu gây ra hiện tượng méo cắt đỉnh (clipping) nghiêm trọng hoặc tiếng xì ồn không thể khắc phục. Hệ thống analog phân chia tín hiệu thành 4 cấp độ điện áp chuẩn như sau [2]:

Hình 2.5 trình bày cặp đồng hồ chỉ mức kiểu VU, thiết bị hiển thị cơ điện dùng để theo dõi mức tín hiệu theo thang decibel trên các thiết bị âm thanh analog.

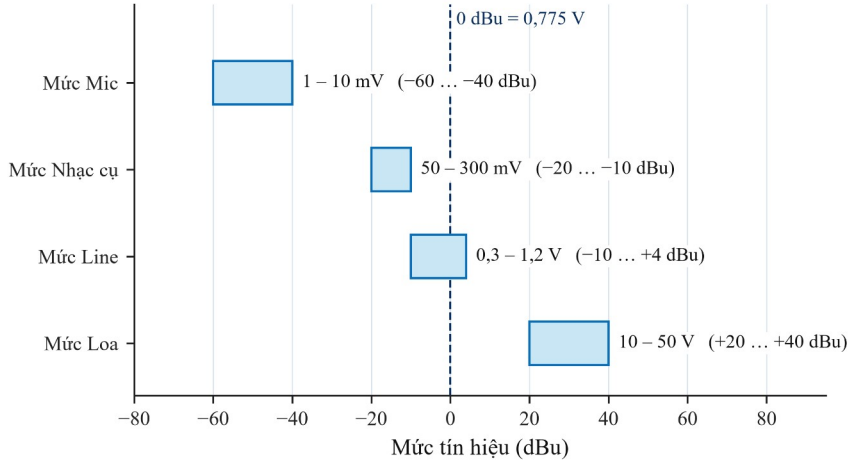


Hình 2.5 Cặp đồng hồ chỉ mức kiểu VU với thang chia từ −20 đến +5

Nguồn: Retired electrician, CC0, Wikimedia Commons (truy cập 05/11/2026).

Bảng 2.1 Thông số kỹ thuật định lượng của 4 cấp mức tín hiệu âm thanh

Cấp mức tín hiệu	Điện áp danh định (RMS)	Mức tương đối (dB)	Đặc tính trở kháng & Ứng dụng
Mức Micro (Mic Level)	1 mV – 10 mV	−60 dBu đến −40 dBu	Trở kháng thấp (150 – 600 Ω), cực kỳ nhạy nhiễu
Mức Nhạc cụ (Instrument)	50 mV – 300 mV	−20 dBu đến −10 dBu	Trở kháng rất cao Hi-Z (100 kΩ – 1 MΩ, Pickup guitar)
Mức Line Dân dụng (Consumer)	316 mV RMS (0,89 V p-p)	−10 dBV	Cổng AUX, RCA, TV, điện thoại, máy nghe nhạc
Mức Line Chuyên nghiệp (Pro)	1,228 V RMS (3,47 V p-p)	+4 dBu	Bàn Mixer, Audio Interface, DSP Rack chuyên nghiệp
Mức Loa (Speaker Level)	10 V – 50 V (+ dòng lớn)	+20 dBu đến +40 dBu	Trở kháng tải rất thấp (4 – 8 Ω), mang năng lượng lớn



Hình 2.6 Bốn cấp độ mức tín hiệu chuẩn và dải điện áp tương ứng

2.4.2 Trở kháng và nguyên tắc phối ghép điện áp

Trở kháng (ký hiệu Z, đơn vị Ohm - Ω) là sự cản trở toàn phần của mạch điện đối với dòng điện xoay chiều, bao gồm cả điện trở thuần R và dung kháng, cảm kháng. Trong hệ thống âm thanh hiện đại, quy tắc phối ghép tín hiệu áp dụng là phối ghép điện áp cầu (Voltage Bridging): trở kháng đầu ra của thiết bị phát (Z_{out}) phải rất nhỏ so với trở kháng đầu vào của thiết bị thu (Z_{in}), thường tuân theo tỷ lệ [2]:

Hình 2.7 so sánh các đầu giắc cắm có kích thước khác nhau, trong đó đầu giắc 6,35 mm ở dưới cùng có ba phần dẫn điện (dạng TRS), thường dùng để truyền tín hiệu cân bằng hoặc tín hiệu âm thanh nổi.



Hình 2.7 So sánh các đầu giắc cắm âm thanh, thước đo làm chuẩn kích thước

Nguồn: Benlisquare, CC BY-SA 4.0, Wikimedia Commons (truy cập 05/11/2026).

$$Z_{in} \geq 10\, Z_{out} \tag{2.3}$$

Khi Z_{in} lớn gấp tối thiểu 10 lần Z_{out}, sụt áp trên trở kháng trong của nguồn phát là không đáng kể, bảo đảm truyền tải gần như trọn vẹn 100% biên độ điện áp tín hiệu mà không làm méo đáp tuyến tần số. Guitar điện là một trường hợp đặc biệt: cuộn cảm pickup có trở kháng nội rất lớn, do đó đầu vào của Audio Interface phải có chế độ Hi-Z (High Impedance, $Z_{in} \approx 1$ MΩ). Nếu cắm guitar vào ngõ Line thông thường ($Z_{in} \approx 10$ kΩ), hiện tượng 'tải nặng' sẽ làm suy hao nghiêm trọng toàn bộ dải tần số cao và khiến âm thanh bị đục, mờ.

2.4.3 Đường truyền cân bằng và triệt tiêu nhiễu vi sai

Đường truyền không cân bằng (Unbalanced - cáp RCA hoa sen, cáp TS 6.35mm đàn guitar) chỉ sử dụng 1 dây dẫn lõi mang tín hiệu và 1 lớp lưới kim loại bọc ngoài nối đất (ground). Mọi sóng điện từ trong không gian (sóng radio, sóng wifi, nhiễu từ biến áp nguồn) cảm ứng vào dây lõi sẽ đi thẳng vào mạch khuếch đại và sinh ra tiếng ù xì lớn nếu dây dài quá 3 mét [1].

Hình 2.8 cho thấy các ổ cắm RCA ở mặt sau bộ khuếch đại dân dụng, dùng cho các ngõ vào như PHONO, CD, AUX và TAPE.



Hình 2.8 Các ổ cắm RCA (hoa sen) ở mặt sau bộ khuếch đại dân dụng

Nguồn: Muzzlbock, CC BY-SA 3.0, Wikimedia Commons (truy cập 05/11/2026).

Để khắc phục vấn đề này, kỹ thuật chuyên nghiệp sử dụng đường truyền cân bằng (Balanced Audio) với đầu nối 3 chân chuẩn XLR (Canon) hoặc TRS (Stereo Jack):

Hình 2.9 thể hiện cặp đầu nối XLR ba chân, trong đó đầu đực ở bên trái và đầu cái ở bên phải; đây là chuẩn đầu nối của đường truyền cân bằng chuyên nghiệp.



Hình 2.9 Cặp đầu nối XLR ba chân: đầu đực và đầu cái

Nguồn: Jud McCranie, CC BY-SA 4.0, Wikimedia Commons (truy cập 05/11/2026).

- **Dây Hot (Cực dương / Chân 2 XLR):** Truyền tải tín hiệu gốc S(t).
- **Dây Cold (Cực âm / Chân 3 XLR):** Truyền tải bản sao của tín hiệu gốc nhưng bị đảo pha 180 độ: −S(t).
- **Dây Shield / Ground (Nối đất / Chân 1 XLR):** Vỏ lưới bọc kim bao quanh hai dây lõi nhằm chắn nhiễu tĩnh điện.

PHÂN TÍCH TOÁN HỌC 2.1 — CHỨNG MINH KHẢ NĂNG TRIỆT TIÊU NHIỄU CỦA ĐẦU THU VI SAI

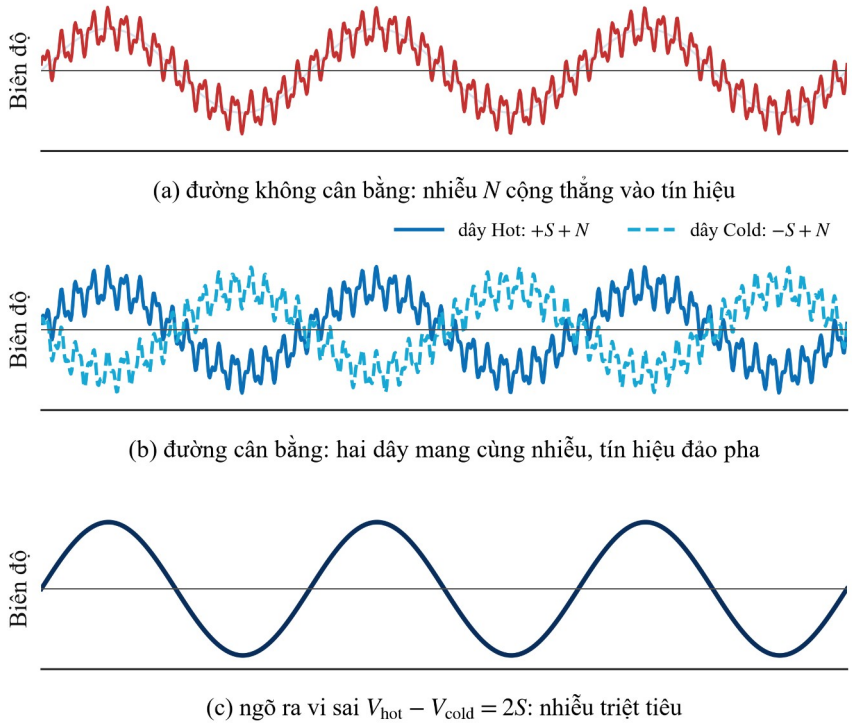
Giả sử trên đường truyền dẫn, một nguồn nhiễu điện từ N(t) xâm nhập và cảm ứng đồng đều vào cả hai dây dẫn Hot và Cold (do hai dây được bọc xoắn đôi sát nhau).

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

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

$V_{out}(t) = S(t) + N(t) + S(t) - N(t) = 2 \cdot S(t)$

Kết luận toán học: Nhiễu ngoại lai N(t) bị trừ khử hoàn toàn (triệt tiêu về 0), trong khi tín hiệu âm thanh hữu ích S(t) được cộng dồn biên độ lên gấp đôi (+6 dB). Tỷ số triệt tiêu tín hiệu đồng pha này được gọi là CMRR (Common-Mode Rejection Ratio).



(a) đường không cân bằng: nhiễu *N* cộng thẳng vào tín hiệu

(b) đường cân bằng: hai dây mang cùng nhiễu, tín hiệu đảo pha

(c) ngõ ra vi sai $V_{hot} - V_{cold} = 2S$: nhiễu triệt tiêu

Hình 2.10 Cơ chế truyền dẫn cân bằng và triệt tiêu nhiễu bằng mạch khuếch đại vi sai

2.5 Thông số đo lường chất lượng và hạn chế của analog

2.5.1 Sàn nhiễu, tỷ số tín hiệu trên nhiễu và dải động

Mọi hệ thống analog đều bị giới hạn bởi một cấu trúc năng lượng nghiêm ngặt gồm 4 tầng [2]:

1. **Mức sàn nhiễu (Noise Floor):** Là mức năng lượng tạp âm nền tồn tại trong mạch điện ngay cả khi không có tín hiệu âm thanh nào được đưa vào. Nhiễu sàn xuất phát từ chuyển động nhiệt ngẫu nhiên của các electron tự do bên trong linh kiện điện trở và chất bán dẫn (nhiễu nhiệt Johnson-Nyquist) [7], [8] và nhiễu từ trường rò rỉ từ lưới điện 50Hz/60Hz.

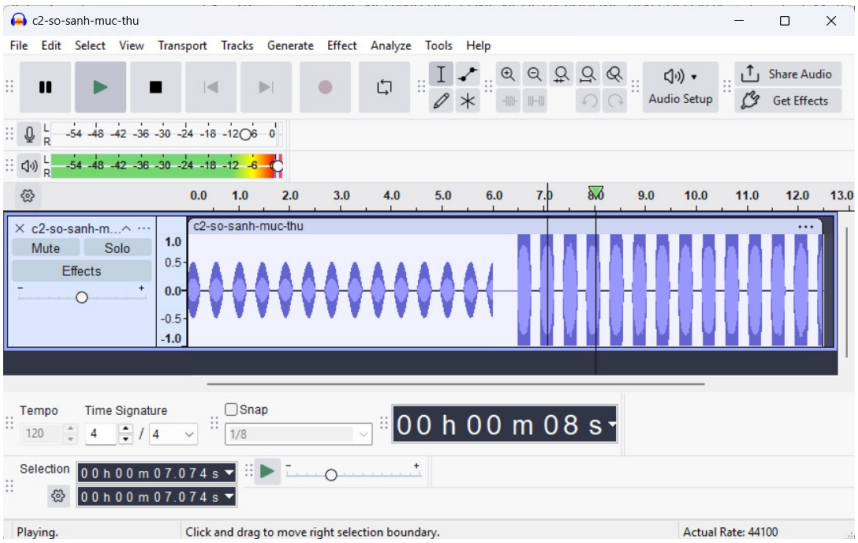
2. **Tỷ số Tín hiệu trên Nhiễu (Signal-to-Noise Ratio - SNR):** Là tỷ số tính bằng decibel giữa mức tín hiệu danh định (hoạt động bình thường) và mức sàn nhiễu:

$$\text{SNR} = 20\log_{10}\frac{V_S}{V_N} \quad \text{(dB)} \tag{2.4}$$

Một hệ thống âm thanh chất lượng cao đòi hỏi chỉ số SNR tối thiểu phải đạt trên 80 dB đến 100 dB. Nếu SNR thấp (< 50 dB), tiếng xì xào của nhiễu nền sẽ lộ rõ khi phát các đoạn nhạc êm dịu hoặc những khoảng lặng đàm thoại.

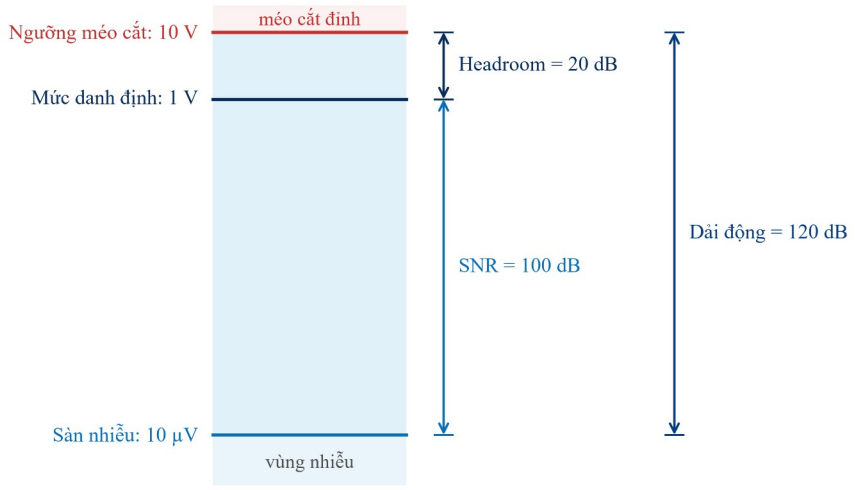
3. **Ngưỡng méo cắt đỉnh (Clipping Point) và Khoảng đệm (Headroom):** Ngưỡng méo cắt là giới hạn điện áp tối đa mà mạch điện có thể cung cấp trước khi các transistor bị bão hòa nguồn cung cấp. Headroom là khoảng cách an toàn bằng decibel giữa mức danh định (Nominal Level) và ngưỡng méo cắt. Headroom đóng vai trò như một 'vùng đệm chống va đập', đảm bảo những xung âm thanh đột ngột phát ra (tiếng gõ dùi trống, tiếng hét ca sĩ) không bị cắt đỉnh gây méo tiếng.
4. **Dải động (Dynamic Range):** Là khoảng cách decibel từ mức tín hiệu cực đại không méo (Clipping Point) xuống mức sàn nhiễu (Noise Floor). Dải động đặc trưng cho năng lực tái hiện sự tương phản giữa âm thanh thì thầm nhỏ nhất và tiếng nổ lớn nhất mà hệ thống có thể xử lý an toàn.

Hình 2.11 so sánh hai đoạn tín hiệu giọng nói: đoạn đầu có mức vừa phải còn đoạn sau bị khuếch đại quá mức nên đỉnh sóng bị cắt phẳng ở ±1,0 và thanh đo mức chạm vạch 0 dB (vùng màu đỏ).



Hình 2.11 Dạng sóng và thanh đo mức của bản thu mức vừa phải (nửa đầu) và bản thu quá tải bị cắt đỉnh (nửa sau) trong Audacity

Nguồn: ảnh chụp màn hình do người soạn thực hiện (Audacity 3.7.7), 07/11/2026.

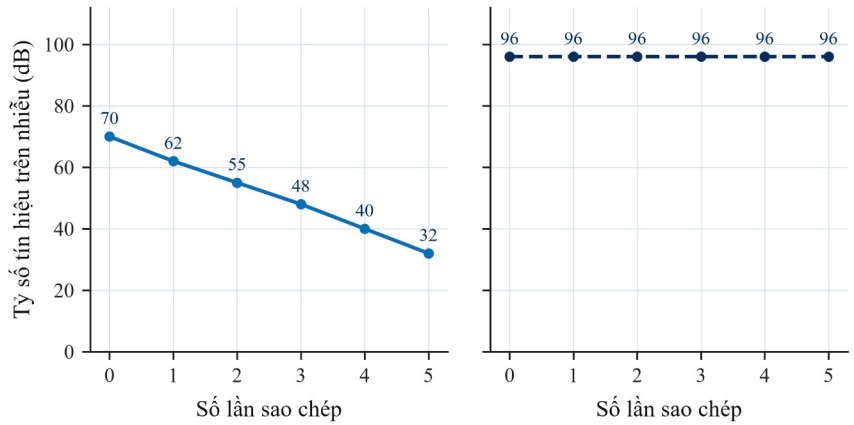


Hình 2.12 Tương quan giữa sàn nhiễu, mức danh định, khoảng đệm và dải động của hệ thống

2.5.2 Hạn chế cố hữu của analog và động lực số hóa

Mặc dù các thiết bị analog cao cấp mang lại chất âm ấm áp nhờ méo hài bậc hai êm dịu, công nghệ analog bộc lộ 4 hạn chế nghiêm trọng khiến ngành công nghiệp chuyển dịch sang kỷ nguyên kỹ thuật số:

1. **Suy hao thế hệ sao chép (Generation Loss):** Trong thế giới analog, không có khái niệm 'sao chép nguyên bản'. Khi sao chép một cuộn băng từ sang cuộn băng khác, nhiễu nền của máy phát cộng dồn với nhiễu nền của máy thu, đồng thời méo hài tăng lên và dải cao bị suy giảm. Sau 3 đến 4 thế hệ sao chép, bản thu analog trở nên đục và nhiều tiếng xì.
2. **Nhiễu tích lũy trên chuỗi thiết bị:** Mỗi thiết bị analog gắn thêm vào chuỗi tín hiệu (EQ, Mixer, Cáp nối) đều đóng góp thêm một lượng nhiễu nhiệt và méo phi tuyến nhất định. Chuỗi thiết bị càng dài, chất lượng âm thanh tổng thể càng suy thoái.
3. **Độ trôi dạt và lão hóa vật lý:** Giá trị điện trở, tụ điện analog thay đổi theo nhiệt độ môi trường và bị lão hóa hóa học theo thời gian. Hai kênh stereo của một bàn mixer analog cổ điển khó duy trì sự cân bằng pha tuyệt đối.
4. **Động lực số hóa âm thanh:** Trong thế giới số, toàn bộ sóng âm được trừu tượng hóa thành các chuỗi bit nhị phân (0 và 1). Dữ liệu số có thể sao chép hàng triệu lần với độ chính xác tuyệt đối từng bit (Bit-perfect), lưu trữ vĩnh cửu trên đĩa quang hoặc bộ nhớ thể rắn, và được xử lý bằng các giải thuật toán học phức tạp mà không sinh thêm vật lý nào.



(a) analog: nhiễu cộng dồn (b) số: bản sao giống hệt

Hình 2.13 Suy hao tích lũy qua mỗi lần sao chép của hệ analog so với tính bất biến của dữ liệu số (số liệu minh họa)

2.6 Kiến trúc Audio Interface và kết nối với lập trình Python

Đối với kỹ sư lập trình âm thanh, soundcard chuyên nghiệp (Audio Interface) là cầu nối phần cứng quan trọng nhất giữa các hiện tượng sóng điện áp vật lý và các cấu trúc dữ liệu trong bộ nhớ RAM của máy tính.

2.6.1 Dòng chảy dữ liệu từ jack cắm analog tới mảng NumPy

Để một rung động từ thanh quản ca sĩ biến thành một mảng số thực `numpy.ndarray` trong chương trình Python, tín hiệu phải đi qua một hành trình kỹ thuật chuẩn xác [5]:

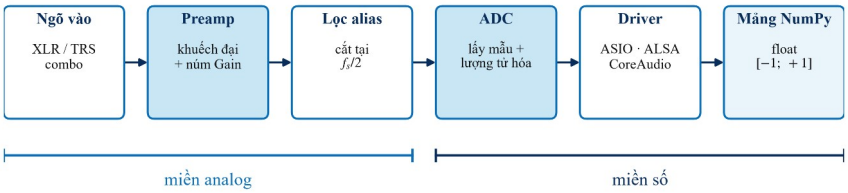
Hình 2.14 giới thiệu các bộ giao tiếp âm thanh USB để bàn, với ngõ vào micro/line ở mặt trước, núm điều chỉnh độ khuếch đại và núm âm lượng đầu ra.



Hình 2.14 Các bộ giao tiếp âm thanh (Audio Interface) USB với ngõ vào micro/line và núm khuếch đại

Nguồn: Matt Vanacoro, CC BY 2.0, Wikimedia Commons (truy cập 05/11/2026).

1. Tín hiệu điện áp siêu nhỏ từ micro đi vào jack combo XLR/TRS của Audio Interface.
2. Mạch Preamp analog tích hợp bên trong interface khuếch đại điện áp lên mức Line Level.
3. Tín hiệu đi qua bộ lọc thông thấp tương tự (Anti-Aliasing Filter) để triệt tiêu mọi tần số vượt quá nửa tần số lấy mẫu (giới hạn Nyquist).
4. Chip ADC (Analog-to-Digital Converter) thực hiện lấy mẫu với tần số chuẩn (ví dụ 48.000 mẫu/giây) và lượng tử hóa thành các từ mã 24-bit.
5. Dữ liệu số được đưa vào bộ đệm vòng phần cứng (FIFO Hardware Buffer) rồi truyền qua cổng giao tiếp tốc độ cao (USB-C / Thunderbolt) vào máy tính dưới sự điều khiển của vi điều khiển chuyên dụng.
6. Trình điều khiển âm thanh độ trễ thấp (ASIO trên Windows, ALSA trên Linux, CoreAudio trên macOS) tiếp nhận các khối mẫu qua cơ chế truy cập bộ nhớ trực tiếp (DMA) và lưu vào bộ đệm RAM hệ thống.
7. Thư viện lập trình cấp cao (SoundFile, PyAudio) đọc bộ đệm này và trả về cho lập trình viên dưới dạng một mảng số thực chuẩn hóa trong khoảng [-1.0, +1.0].

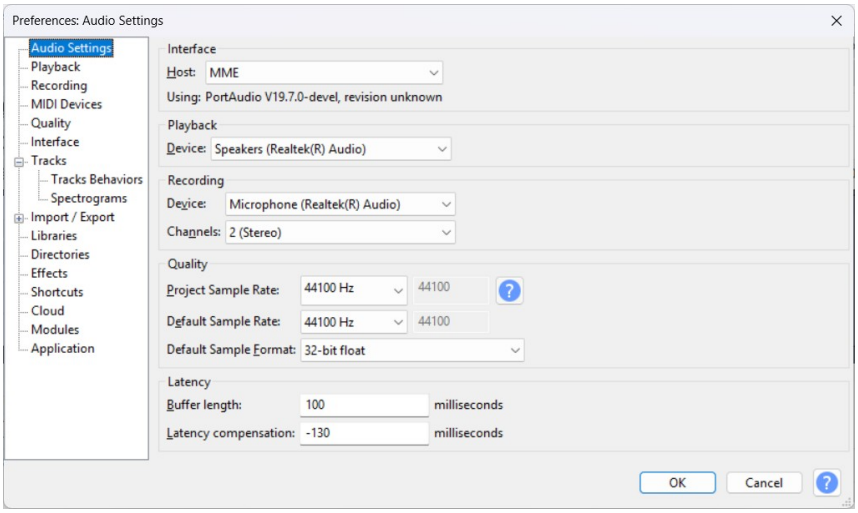


Hình 2.15 Kiến trúc phần cứng Audio Interface và dòng chảy dữ liệu tới mảng số trong Python

2.6.2 Bộ đệm âm thanh, độ trễ và lỗi tràn đệm

Hệ điều hành máy tính là môi trường đa nhiệm (multitasking), do đó CPU không thể dành 100% chu kỳ thời gian để đọc từng mẫu âm thanh đơn lẻ từ Audio Interface; thay vào đó, âm thanh được gom thành các gói dữ liệu gọi là bộ đệm (Buffer Size), thường có kích thước là lũy thừa của 2: 64, 128, 256, 512 hoặc 1024 mẫu [5].

Hình 2.16 là trang Audio Settings trong hộp thoại Preferences của Audacity, nơi người dùng chọn giao diện âm thanh (Host), thiết bị thu, số kênh, tần số lấy mẫu của dự án và các tham số độ trễ như độ dài bộ đệm (Buffer length) và bù trễ (Latency compensation).



Hình 2.16 Cấu hình thiết bị thu và tham số bộ đệm trong Audacity (Edit > Preferences > Audio Settings)

Nguồn: ảnh chụp màn hình do người soạn thực hiện (Audacity 3.7.7), 07/11/2026.

Độ trễ xử lý (Latency) được tính bằng thời gian làm đầy bộ đệm:

$$t_{\text{lat}} = \frac{N_{\text{buffer}}}{f_s} \quad \text{(s)} \tag{2.5}$$

Ví dụ với Buffer Size = 256 mẫu ở tần số lấy mẫu 48.000 Hz, độ trễ đệm là 256 / 48.000 ≈ 5,33 ms. Nếu lập trình viên thiết lập Buffer Size quá nhỏ để giảm độ trễ, nhưng thuật toán DSP trong mã nguồn chạy quá chậm không xử lý kịp trước khi bộ đệm kế tiếp đến, phần cứng sẽ rơi vào trạng thái cạn đệm (Buffer Underrun), phát ra những tiếng nổ tanh tách (clicks, pops) gây khó chịu.

2.7 Hướng dẫn thực hành

2.7.1 Sơ đồ hóa chuỗi thu âm và nhận diện các mắt xích

Mục tiêu: Người đọc tự vẽ lại sơ đồ kết nối phần cứng từ một micro ca sĩ biểu diễn trên sân khấu đến máy tính thu âm của kỹ sư âm thanh, chỉ rõ:

1. Vị trí đặt micro và chủng loại micro (Dynamic hay Condenser).
2. Chuẩn cáp truyền dẫn (XLR Balanced hay TS Unbalanced) và lý do lựa chọn.
3. Tầng tiền khuếch đại Preamp đặt ở đâu và công tắc 48V Phantom Power có cần bật hay không.
4. Mức tín hiệu đo được tại từng chặng đo (Mic Level, Line Level, Digital Bits).

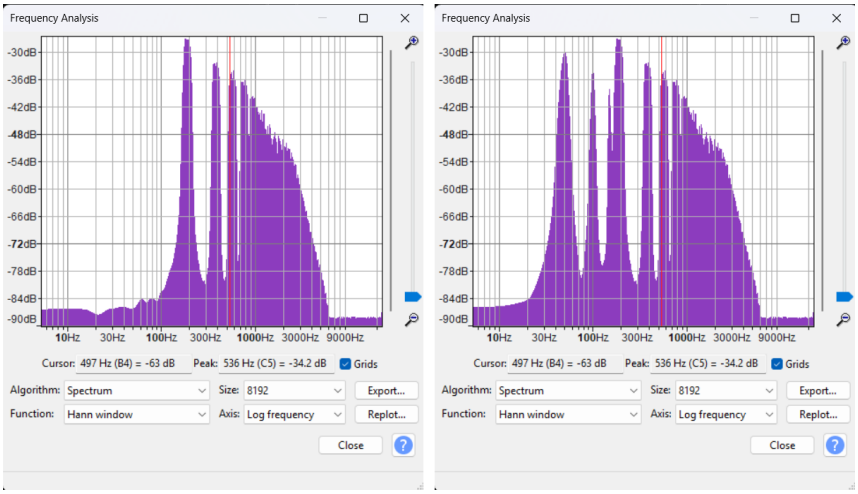
2.7.2 Phân tích phổ so sánh bản thu sạch và bản thu dính nhiễu

Thao tác thực nghiệm:

1. Khởi động phần mềm Audacity, mở một tệp âm thanh giọng đọc sạch (clean_voice.wav).
2. Truy cập menu Tracks → Add New → Mono Track. Nhấp menu Generate → Noise... Chọn loại nhiễu 'White Noise' với biên độ 0.05 để mô phỏng nhiễu nhiệt analog.

3. **Tạo tiếp một track thứ 3:** Generate → Tone... Chọn tần số 50 Hz hoặc 60 Hz (dạng sóng Sin, biên độ 0.08) để mô phỏng tiếng ù vòng đất (ground loop hum) do lỗi mass điện lưới.
4. Trộn (Mix) các track lại với nhau và chuyển sang chế độ hiển thị phổ tần số (Spectrogram). Quan sát hiện tượng: tiếng xì trắng tạo một lớp năng lượng trải dài từ 20 Hz đến 20 kHz, trong khi tiếng ù xoay chiều tạo thành một vạch sáng đậm tập trung tại tần số 50 Hz/60 Hz và các bội số hài của nó (100 Hz, 150 Hz, 180 Hz).

Hình 2.17 đối chiếu phổ của hai bản thu cùng nội dung giọng nói: bản sạch (trái) và bản bị cộng thêm nhiễu ù lưới điện 50 Hz cùng các hài 100 Hz, 150 Hz (phải), làm xuất hiện các đỉnh phổ ở vùng tần số thấp mà bản sạch không có.



Hình 2.17 Phổ tần số của bản thu sạch (trái) và bản thu dính nhiễu ù 50 Hz (phải) trong hộp thoại Frequency Analysis của Audacity

Nguồn: ảnh chụp màn hình do người soạn thực hiện (Audacity 3.7.7), 07/11/2026.

2.7.3 Lập trình đọc siêu dữ liệu và mô phỏng nhiễu bằng Python

Dưới đây là hai chương trình Python hoàn chỉnh. Người đọc lưu các file mã nguồn vào thư mục dự án `src/` và thực thi trên terminal.

Liệt kê 2.1 src/audio_info.py — Trích xuất siêu dữ liệu và phân tích biên độ tín hiệu số

```
"""
File: src/audio_info.py
Sách: Kỹ thuật Audio - Video - Chương 2
Chức năng: Đọc tệp WAV, trích xuất cấu trúc siêu dữ liệu kỹ thuật và thống kê
biên độ
"""
import soundfile as sf
import numpy as np
import sys

def inspect_audio(file_path):
    print(f"=== ĐANG PHÂN TÍCH TỆP: {file_path} ===")
    try:
        # Đọc dữ liệu mẫu và tần số lấy mẫu bằng soundfile
        data, samplerate = sf.read(file_path)
        info = sf.info(file_path)

        # Trích xuất các thông số kỹ thuật cốt lõi
```

```
        num_channels = data.shape[1] if data.ndim > 1 else 1
        num_samples = len(data)
        duration_sec = num_samples / samplerate
        bit_depth = info.subtype

        # Thống kê biên độ toán học trên mảng NumPy
        peak_val = np.max(np.abs(data))
        rms_val = np.sqrt(np.mean(data**2))

        # Tính toán mức decibel toàn dải (dBFS)
        peak_dbfs = 20 * np.log10(peak_val) if peak_val > 0 else -np.inf
        rms_dbfs = 20 * np.log10(rms_val) if rms_val > 0 else -np.inf

        print(f"• Tần số lấy mẫu (Sample Rate) : {samplerate:,} Hz")
        print(f"• Định dạng mẫu (Subtype/Bits) : {bit_depth}")
        print(f"• Số lượng kênh (Channels)     : {num_channels} ({'Stereo' if
num_channels==2 else 'Mono'})")
        print(f"• Tổng số mẫu rời rạc          : {num_samples:,} samples")
        print(f"• Thời lượng bản thu           : {duration_sec:.3f} giây")
        print(f"• Biên độ cực đại (Peak)       : {peak_val:.4f}
({peak_dbfs:.2f} dBFS)")
        print(f"• Biên độ hiệu dụng (RMS)      : {rms_val:.4f} ({rms_dbfs:.2f}
dBFS)")

        if peak_val >= 1.0:
            print("  [Cảnh báo]: Phát hiện méo cắt đỉnh (Clipping) tại 0
dBFS!")
        else:
            headroom_db = -peak_dbfs
            print(f"  [An toàn]: Khoảng đệm an toàn (Headroom) còn lại:
{headroom_db:.2f} dB")

    except Exception as e:
        print(f"Lỗi khi đọc tệp âm thanh: {e}")

if __name__ == '__main__':
    # Chạy thử nghiệm với tệp WAV mẫu
    test_file = sys.argv[1] if len(sys.argv) > 1 else "clean_voice.wav"
    inspect_audio(test_file)
```

Liệt kê 2.2 src/analog_noise_sim.py — Mô phỏng pha trộn nhiễu nhiệt và tiếng ù lưới điện

```
"""
File: src/analog_noise_sim.py
Sách: Kỹ thuật Audio - Video - Chương 2
Chức năng: Mô phỏng thêm nhiễu sàn analog (Thermal Hiss) và ù điện lưới (Hum)
vào tín hiệu sạch
"""
import soundfile as sf
import numpy as np

def simulate_analog_degradation(input_wav, output_wav, target_snr_db=40.0,
add_hum=True):
    print(f"Mô phỏng thoái hóa Analog trên tệp: {input_wav}")
    # Đọc tín hiệu sạch gốc
    clean_sig, fs = sf.read(input_wav)
    if clean_sig.ndim > 1:
        clean_sig = clean_sig[:, 0] # Lấy kênh mono đầu tiên để thử nghiệm

    num_samples = len(clean_sig)
    t = np.arange(num_samples) / fs
```

```
    # 1. Tính toán năng lượng tín hiệu sạch (RMS)
    rms_signal = np.sqrt(np.mean(clean_sig**2))

    # 2. Tính toán năng lượng nhiễu tương ứng theo chỉ số SNR mong muốn
    # SNR = 20 * log10(rms_signal / rms_noise) => rms_noise = rms_signal /
(10^(SNR/20))
    rms_noise = rms_signal / (10 ** (target_snr_db / 20))

    # 3. Tạo nhiễu nhiệt trắng (Gaussian Thermal Noise)
    white_noise = np.random.normal(0, rms_noise, num_samples)

    # 4. Mô phỏng tiếng ù xoay chiều 50 Hz từ lưới điện dân dụng Việt Nam
    hum_signal = np.zeros(num_samples)
    if add_hum:
        # Tiếng ù gồm tần số cơ bản 50Hz và hài bậc hai 100Hz
        hum_amp = rms_noise * 0.7
        hum_signal = hum_amp * np.sin(2 * np.pi * 50 * t) + (hum_amp * 0.3) *
np.sin(2 * np.pi * 100 * t)

    # 5. Pha trộn tín hiệu: Tổng hợp tín hiệu suy thoái Analog
    degraded_sig = clean_sig + white_noise + hum_signal

    # 6. Kiểm tra chống tràn số trước khi ghi
    max_amp = np.max(np.abs(degraded_sig))
    if max_amp > 1.0:
        degraded_sig = degraded_sig / max_amp # Chuẩn hóa tránh méo clipping
        print("  Đã chuẩn hóa tín hiệu để tránh vượt ngưỡng 0 dBFS.")

    # Ghi tệp kết quả ra đĩa
    sf.write(output_wav, degraded_sig, fs)
    print(f"✓ Đã xuất thành công tệp âm thanh mô phỏng: {output_wav}")
    print(f"  Tỷ số SNR thiết lập: {target_snr_db:.1f} dB | Có kèm tiếng ù
50Hz: {add_hum}")

if __name__ == '__main__':
    # Tạo một sóng sin thử nghiệm nếu chưa có file đầu vào
    fs = 44100
    t = np.linspace(0, 3, fs * 3)
    test_tone = 0.5 * np.sin(2 * np.pi * 440 * t)
    sf.write("test_clean.wav", test_tone, fs)

    # Thực thi hàm mô phỏng nhiễu
    simulate_analog_degradation("test_clean.wav", "test_analog_degraded.wav",
target_snr_db=35.0, add_hum=True)
```

2.8 Câu hỏi thường gặp

Câu hỏi 1: Tại sao dây đàn guitar điện (Instrument Level) không thể cắm trực tiếp vào cổng Mic hoặc Line thông thường mà phải qua cổng Hi-Z hoặc hộp DI-Box?

Giải đáp: Pickup của đàn guitar điện được chế tạo từ hàng ngàn vòng dây quấn quanh nam châm, sở hữu trở kháng đầu ra Z_{out} rất cao (từ 10 kΩ đến hơn 50 kΩ). Cổng Line thông thường chỉ có trở kháng Z_{in} khoảng 10 kΩ. Nếu cắm trực tiếp, do trở kháng vào không lớn hơn tối thiểu 10 lần trở kháng ra (vi phạm quy tắc Voltage Bridging), mạch sẽ bị 'tụt áp tải nặng', triệt tiêu toàn bộ tần số bổng làm tiếng đàn mất độ trong. Cổng Hi-Z hoặc hộp DI-Box (Direct Injection) cung

cấp trở kháng vào lên tới 1 MΩ (1.000.000 Ω), giúp bảo toàn 100% năng lượng và độ chi tiết của tiếng đàn.

Câu hỏi 2: Nguồn ảo Phantom Power 48V là gì? Nếu cắm nhầm micro điện động (Dynamic) vào cổng đang bật 48V thì có bị cháy micro hay không?

Giải đáp: Phantom Power là nguồn điện một chiều DC 48V [6] được truyền đồng thời qua chân 2 (Hot) và chân 3 (Cold) của dây cáp cân bằng XLR để nuôi bản cực và mạch khuếch đại bên trong micro điện dung. Tên gọi 'ảo' (Phantom) là do nguồn này không cần một sợi dây cấp nguồn riêng biệt. Nếu sử dụng đúng dây cáp Balanced XLR tiêu chuẩn, điện thế 48V xuất hiện đồng pha trên cả chân 2 và chân 3, do đó hiệu điện thế giữa hai đầu cuộn dây của micro Dynamic bằng 0V (48V − 48V = 0V), cuộn dây hoàn toàn không có dòng điện chạy qua nên không bị cháy. Tuy nhiên, nếu dùng cáp Unbalanced bị chập chân hoặc kết nối micro Ribbon cổ điển, nguồn 48V có thể làm cháy đứt dải ruy-băng rất mảnh.

Câu hỏi 3: Trong các phòng thu âm hiện đại, người ta vẫn chi hàng chục ngàn USD để mua các thiết bị tiền khuếch đại và bộ nén Analog đèn điện tử (Tube/Valve). Nếu kỹ thuật số tốt như vậy, tại sao họ không số hóa hoàn toàn ngay từ đầu?

Giải đáp: Kỹ thuật số sở hữu độ chính xác toán học tuyệt đối và không suy thoái tín hiệu. Tuy nhiên, khi các linh kiện analog cao cấp (bóng đèn điện tử chân không, biến áp lõi sắt) bị kích thích ở mức biên độ cao, chúng sinh ra hiện tượng bão hòa hòa âm (Saturation) rất đặc trưng, bổ sung các sóng hài bậc chẵn (hài 2, hài 4) tạo cảm giác âm thanh dày dặn, ấm áp và sống động mà đôi tai con người ưa chuộng. Hiện nay, các thuật toán DSP hiện đại trong lập trình âm thanh đang phát triển mạnh lĩnh vực mô phỏng phi tuyến (Analog Modeling) [4] để tái tạo chính xác hiện tượng vật lý này bằng các phương trình vi phân số.

TÓM TẮT CHƯƠNG 2

1. **Tín hiệu liên tục (Analog):** Là tín hiệu vật lý biến thiên liên tục theo thời gian và biên độ điện áp v(t). Máy tính số không thể xử lý trực tiếp vô hạn điểm dữ liệu nên bắt buộc phải rời rạc hóa qua phép lấy mẫu và lượng tử hóa.
2. **Bộ chuyển đổi Transducers:** Micro chuyển dao động sóng áp suất cơ học thành điện áp xoay chiều (Dynamic dùng cảm ứng điện từ; Condenser dùng biến thiên điện dung). Loa thực hiện quá trình ngược lại nhờ lực từ Lorentz $F = B \cdot L \cdot i$.
3. **Chuỗi tín hiệu analog:** Gồm 5 mắt xích tuần tự: Nguồn âm → Micro → Tiền khuếch đại Preamp → Xử lý analog (Mixer, EQ, Comp) → Khuếch đại công suất (Power Amp) → Loa tái tạo.
4. **Bốn mức tín hiệu tiêu chuẩn:** Mic Level (~1-10 mV) < Instrument Level (~100-300 mV) < Line Level (1,23 V / +4 dBu) < Speaker Level (10-50 V). Việc cắm sai cấp mức có thể gây méo tiếng hoặc cháy thiết bị.
5. **Đường truyền cân bằng (Balanced):** Đường truyền sử dụng 3 chân (Hot, Cold đảo pha 180°, Ground); tại đầu thu, bộ khuếch đại vi sai thực hiện phép

trừ V_{out} = Hot − Cold, nhờ đó triệt tiêu hoàn toàn tạp âm cảm ứng đồng pha (CMRR) và tăng gấp đôi biên độ tín hiệu gốc.

6. **Đo lường chất lượng:** gồm Noise Floor (mức sàn nhiễu nhiệt), SNR (tỷ số tín hiệu trên nhiễu), Headroom (khoảng đệm an toàn chống méo cắt) và Dynamic Range (dải động).
7. **Hạn chế của analog và động lực số hóa:** tín hiệu analog chịu suy thoái qua các thế hệ sao chép (Generation Loss), nhiễu nhiệt tích lũy và sự lão hóa của linh kiện, trong khi kỹ thuật số bảo toàn nguyên bản dữ liệu nhị phân một cách lâu dài (Bit-perfect).
8. **Cầu nối lập trình:** Audio Interface thực hiện lọc chống răng cưa, chuyển đổi ADC và truyền các khối đệm (Buffer Size) qua DMA vào RAM, nhờ đó các thư viện Python (SoundFile, NumPy) xử lý được tín hiệu dưới dạng mảng số thực.

2.9 Câu hỏi ôn tập và bài tập

2.9.1 Câu hỏi ôn tập lý thuyết

Câu 1: Phân tích sự khác biệt bản chất giữa tín hiệu liên tục theo thời gian (Analog) và tín hiệu rời rạc (Digital) về tập xác định thời gian và miền giá trị biên độ.

Câu 2: Trình bày nguyên lý cảm ứng điện từ trong micro Dynamic và nguyên lý biến thiên điện dung trong micro Condenser, đồng thời giải thích lý do micro Condenser cần nguồn Phantom Power 48V.

Câu 3: Giải thích vai trò kỹ thuật then chốt của tầng Tiền khuếch đại (Preamp) trong chuỗi tín hiệu thu âm, và nêu hậu quả khi đưa trực tiếp tín hiệu Mic Level vào bộ chuyển đổi ADC.

Câu 4: So sánh sự khác nhau về biên độ điện áp và trở kháng giữa hai chuẩn tín hiệu Line Level dân dụng (−10 dBV) và Line Level chuyên nghiệp (+4 dBu).

Câu 5: Vẽ sơ đồ và chứng minh bằng biểu thức toán học khả năng triệt tiêu tạp âm của đường truyền cân bằng (Balanced Audio) với đầu nối XLR 3 chân.

Câu 6: Định nghĩa các thông số: Mức sàn nhiễu (Noise Floor), Tỷ số SNR, Dải động (Dynamic Range) và Khoảng đệm (Headroom); đồng thời xác định nguyên nhân gây ra hiện tượng suy hao thế hệ (Generation Loss) trong hệ thống analog.

2.9.2 Bài tập tính toán định lượng kỹ thuật

Bài tập 1: Tính toán hệ số khuếch đại điện áp của Tiền khuếch đại (Preamp)

Đề bài: Một micro thu âm sinh ra tín hiệu điện áp hiệu dụng V_{mic} = 2,0 mV. Để đưa tín hiệu này lên mức Line Level chuyên nghiệp chuẩn (+4 dBu, tương đương V_{line} = 1,228 V RMS), kỹ sư âm thanh cần điều chỉnh núm Gain của Preamp tới một độ khuếch đại bằng bao nhiêu decibel?

Lời giải chi tiết: Độ khuếch đại điện áp Gain tính bằng decibel được xác định theo công thức tỷ số biên độ: Gain (dB) = $20 \cdot \log_{10}(V_{out} / V_{in}) = 20 \cdot$

$\log_{10}(1{,}228 / 0{,}002) = 20 \cdot \log_{10}(614) \approx 20 \times 2{,}788 = 55{,}76$ dB. Như vậy, Preamp cần cung cấp một độ khuếch đại xấp xỉ +55,8 dB.

Bài tập 2: Tính toán tỷ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) và Dải động (Dynamic Range)

Đề bài: Một mạch tiền khuếch đại có mức sàn nhiễu đo được là $V_{noise} = 10$ µV (10×10^{-6} V). Mạch hoạt động ở mức điện áp danh định $V_{nom} = 1{,}0$ V và bắt đầu xuất hiện méo cắt đỉnh (Clipping) khi điện áp đạt $V_{max} = 10{,}0$ V, vì vậy cần tính các đại lượng sau: (a) Tỷ số SNR của mạch; (b) Khoảng đệm an toàn Headroom; (c) Dải động toàn phần Dynamic Range của thiết bị.

Lời giải chi tiết:

- (a) Tỷ số SNR = $20 \cdot \log_{10}(V_{nom} / V_{noise}) = 20 \cdot \log_{10}(1{,}0 / 10^{-5}) = 20 \cdot \log_{10}(100.000) = 20 \times 5 = 100$ dB.
- (b) Khoảng đệm Headroom = $20 \cdot \log_{10}(V_{max} / V_{nom}) = 20 \cdot \log_{10}(10{,}0 / 1{,}0) = 20 \cdot \log_{10}(10) = 20$ dB.
- (c) Dải động Dynamic Range = $20 \cdot \log_{10}(V_{max} / V_{noise}) = 20 \cdot \log_{10}(10{,}0 / 10^{-5}) = 20 \cdot \log_{10}(1.000.000) = 20 \times 6 = 120$ dB; kết quả này phù hợp với quan hệ Dynamic Range = SNR + Headroom = 100 dB + 20 dB = 120 dB.

Bài tập 3: Tính toán độ trễ xử lý bộ đệm (Buffer Latency) trong lập trình âm thanh

Đề bài: Một phần mềm xử lý âm thanh viết bằng Python cấu hình kích thước khối đệm phần cứng là N = 512 mẫu (samples). Hãy tính độ trễ lý thuyết của bộ đệm khi hệ thống vận hành ở: (a) Tần số lấy mẫu tiêu chuẩn Audio CD $f_s = 44.100$ Hz; (b) Tần số lấy mẫu fs = 48.000 Hz; (c) Tần số lấy mẫu độ phân giải cao $f_s = 96.000$ Hz.

Lời giải chi tiết: Áp dụng công thức thời gian làm đầy bộ đệm $t_latency = N / f_s$:

- (a) Ở 44.100 Hz: t = 512 / 44.100 ≈ 0,01161 giây = 11,61 ms.
- (b) Ở 48.000 Hz: t = 512 / 48.000 ≈ 0,01067 giây = 10,67 ms.
- (c) Ở 96.000 Hz: t = 512 / 96.000 ≈ 0,00533 giây = 5,33 ms. Như vậy, tần số lấy mẫu càng cao thì thời gian đáp ứng của bộ đệm càng ngắn, nhờ đó độ trễ phần cứng càng giảm.

2.10 Thuật ngữ chuyên ngành và hướng dẫn chuẩn bị

Bảng 2.2 Đối chiếu thuật ngữ chuyên ngành Analog và Chuỗi thiết bị

Thuật ngữ tiếng Anh	Thuật ngữ tiếng Việt chuẩn	Định nghĩa và ngữ cảnh sử dụng
Continuous-Time Signal	Tín hiệu liên tục theo thời gian	Tín hiệu xác định tại mọi thời điểm t thuộc dải số thực
Transducer	Bộ chuyển đổi năng lượng	Thiết bị chuyển đổi giữa năng lượng cơ/âm học và năng lượng điện
Dynamic Microphone	Micro điện động	Micro cảm ứng điện từ cuộn dây di động trong từ trường

Thuật ngữ tiếng Anh	Thuật ngữ tiếng Việt chuẩn	Định nghĩa và ngữ cảnh sử dụng
Condenser Microphone	Micro điện dung	Micro biến thiên điện dung giữa màng rung và bản cực cố định
Phantom Power (48V)	Nguồn ảo 48V một chiều	Nguồn điện DC nuôi mạch và nạp bản cực cho micro điện dung
Preamplifier (Preamp)	Tầng tiền khuếch đại	Mạch khuếch đại điện áp vi mô lên mức chuẩn đường truyền
Line Level	Mức tín hiệu đường truyền	Mức điện áp tiêu chuẩn (+4 dBu hoặc −10 dBV) trong phòng thu
Speaker Level	Mức tín hiệu loa công suất	Mức điện áp và dòng điện lớn sau tầng khuếch đại công suất
Balanced Audio	Đường truyền tín hiệu cân bằng	Phương thức truyền dẫn 3 dây (Hot, Cold, Ground) chống nhiễu
Common-Mode Rejection (CMRR)	Triệt tiêu tín hiệu đồng pha	Khả năng loại bỏ nhiễu cảm ứng của mạch khuếch đại vi sai
Noise Floor	Mức sàn tạp âm nền	Năng lượng nhiễu nhiệt và tạp âm tự nhiên của mạch điện tử
Headroom	Khoảng đệm an toàn	Khoảng cách decibel từ mức danh định đến điểm méo bão hòa
Generation Loss	Suy hao thế hệ sao chép	Hiện tượng tích lũy tạp âm và méo dạng khi sao chép analog
Audio Interface	Bộ giao tiếp âm thanh số	Thiết bị phần cứng chứa preamp, ADC/DAC giao tiếp máy tính
Buffer Underrun	Lỗi cạn bộ đệm âm thanh	Sự cố CPU không cấp kịp mẫu âm thanh, gây tiếng nổ click/pop

Chương tiếp theo (Chương 3: Lấy mẫu, Lượng tử hóa và Định lý Nyquist-Shannon) chuyển hoàn toàn sang miền số. Để đọc chương tiếp theo hiệu quả, người đọc nên chuẩn bị trước các việc sau:

1. **Tự luyện tập:** Vẽ lại sơ đồ một chuỗi thu âm podcast gồm 2 người nói, 1 Audio Interface USB 2 cổng và 1 máy tính xách tay, đồng thời ghi rõ chủng loại micro, cáp nối và các mức tín hiệu.
2. Cài đặt hoàn tất các thư viện `soundfile`, `numpy` và `scipy` trong môi trường ảo Python 3.12 cá nhân, sau đó chạy thử thành công 2 script mẫu `src/audio_info.py` và `src/analog_noise_sim.py`.
3. **Đọc trước tài liệu về Định lý lấy mẫu Nyquist-Shannon:** Tìm hiểu lý do 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 cơ chế xuất hiện hiện tượng răng cưa méo phổ (Aliasing).

TÀI LIỆU THAM KHẢO CHƯƠNG 2

[1] Huber, D. M., & Runstein, R. E. (2018). *Modern Recording Techniques* (9th ed.). New York: Routledge / Focal Press.

[2] Rumsey, F., & McCormick, T. (2021). *Sound and Recording: Applications and Theory* (8th ed.). London: Routledge.

[3] Oppenheim, A. V., & Schafer, R. W. (2010). *Discrete-Time Signal Processing* (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

[4] Smith, J. O. (2011). *Physical Audio Signal Processing: For Virtual Musical Instruments and Digital Audio Effects*. Stanford University: W3K Publishing.

[5] Pohlmann, K. C. (2010). *Principles of Digital Audio* (6th ed.). New York: McGraw-Hill.

[6] International Electrotechnical Commission (IEC). (2018). *IEC 61938:2018 — Multimedia systems — Guide to the recommended characteristics of analogue interfaces to achieve interoperability*. Geneva: IEC.

[7] Johnson, J. B. (1928). Thermal agitation of electricity in conductors. *Physical Review*, 32(1), 97–109.

[8] Nyquist, H. (1928). Thermal agitation of electric charge in conductors. *Physical Review*, 32(1), 110–113.