TRƯỜNG ĐẠI HỌC XÂY DỰNG HÀ NỘI
KHOA CÔNG NGHỆ THÔNG TIN

LẬP TRÌNH ÂM THANH

CHƯƠNG 9

Hiệu ứng phần 2

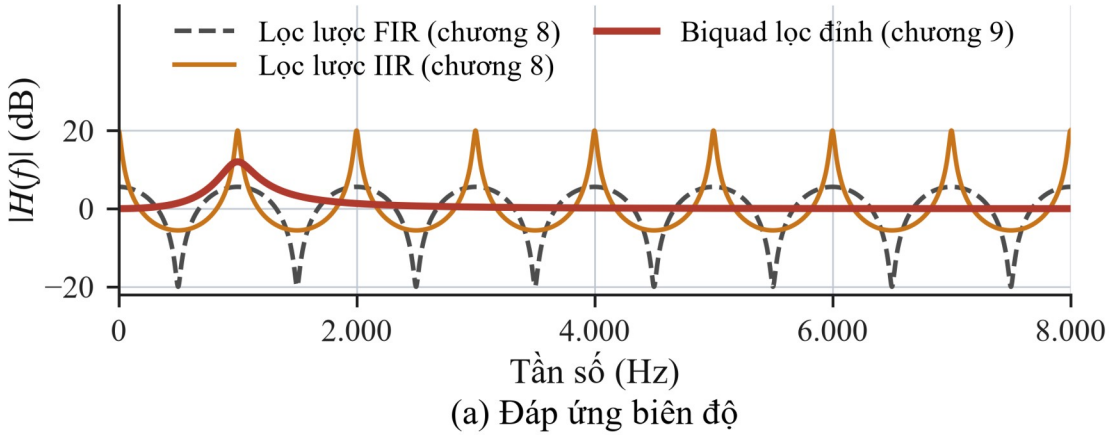
Sau chương này người học phải làm được

- Cài đặt phép trễ phân số bằng ba kiểu nội suy; đo cái giá của từng kiểu.
- Giải thích bằng một con số vì sao flanger dùng nội suy tuyến tính nghe đục.
- Sinh hệ số của bảy kiểu biquad từ ba tham số; kiểm tính ổn định.
- Đọc đáp ứng biên độ; giải thích vai trò của Q ở ba cách nhìn.
- Dựng chuỗi EQ (equalizer – bộ cân bằng tần số) nhiều dải; kiểm đáp ứng đo được so với thiết kế; nêu vì sao cắt an toàn hơn nâng.
- Phân biệt tremolo và điều chế vòng; giải thích vì sao điều chế vòng làm mất cao độ.
- Dựng bộ vang Schroeder, đo lại RT60 (thời gian để âm vang giảm 60 dB); cài đặt tích chập theo khối bằng FFT (Fast Fourier Transform – biến đổi Fourier nhanh).

MỤC 9.1

Vị trí chương học trong học phần

- Chương 8 chỉ dùng phép nhân gain và phép cộng với bản trễ.
- Chương 8 không chọn được tần số: mọi thứ loại ra đều là răng lược cách đều.
- Chương 9 thêm đúng khối còn thiếu: bộ lọc bậc hai (biquad).
- Từ khối ấy ra EQ, wah và phần đọc đáp ứng của bộ vang.



(a) Đáp ứng biên độ

Chương 8 — họ thời gian

Trễ và mức. Đổi phổ chỉ là hệ quả, và chỉ thành răng lược cách đều.

→

Chương 9 — họ tần số

Chọn thẳng: nâng chỗ nào, hạ chỗ nào, rộng bao nhiêu. Một khối bậc hai làm được cả bảy việc.

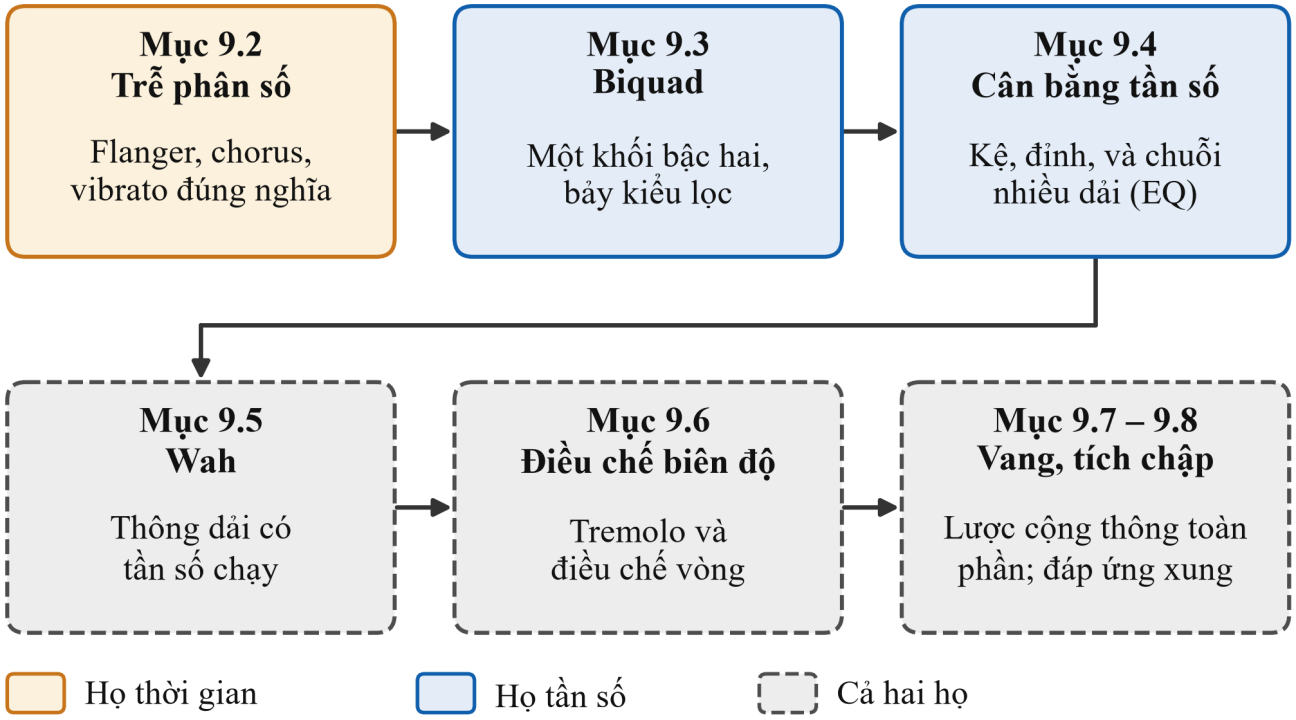
Hai họ gặp lại nhau ở mục 9.7: bộ vang

Khối trễ của chương 8, đọc bằng đáp ứng tần số.

(b) Quan hệ giữa hai chương

Sáu mục kỹ thuật của chương

- Chương 8 cho nén, giới hạn, cổng, lọc lược, flanger, tiếng vọng.
- Việc chương 8 chưa làm được: hạ riêng dải 300 Hz mà giữ nguyên 3 kHz.
- Chương 9 trả lời câu hỏi: ở tần số này tín hiệu bị nâng hay hạ, và bao nhiêu.
- Chỉ một khối mới thật sự: bộ lọc bậc hai của mục 9.3.



Hình 9.1 — Sáu mục kỹ thuật của chương 9

Sáu mục của chương 9 thuộc họ nào

Mục	Nội dung	Họ	Dựng trên
9.2	Trễ phân số, flanger, chorus, vibrato	Thời gian	Khối trễ mục 6.4, 8.7
9.3	Bộ lọc bậc hai — biquad	Tần số	Hoàn toàn mới
9.4	Cân bằng tần số — EQ	Tần số	Biquad ở 9.3
9.5	Wah — thông dải có tần số chạy	Cả hai	Biquad, hệ số đổi từng mẫu
9.6	Tremolo, điều chế vòng	Cả hai	Phép nhân
9.7 – 9.8	Bộ vang và tích chập	Cả hai	Trễ chương 8, đọc bằng công cụ tần số

Chương 8 hỏi tín hiệu to bao nhiêu và trễ bao lâu; chương 9 hỏi tần số này bị nâng hay hạ bao nhiêu.

Ba thứ gần giống mà thuộc chương khác

Dễ gộp nhầm	Vì sao không thuộc chương 9	Chương
Panning, âm thanh không gian, HRTF	Dùng trễ và mức để đặt nguồn; chương này chỉ dựng một phòng	10
Nén đa băng	Cần bộ lọc phân băng ghép bộ nén, và bài toán bù pha	14
FIR bậc cao, thiết kế cửa sổ	Chủ đề thiết kế riêng; chương này chỉ dùng cấu trúc bậc hai	Ngoài học phần

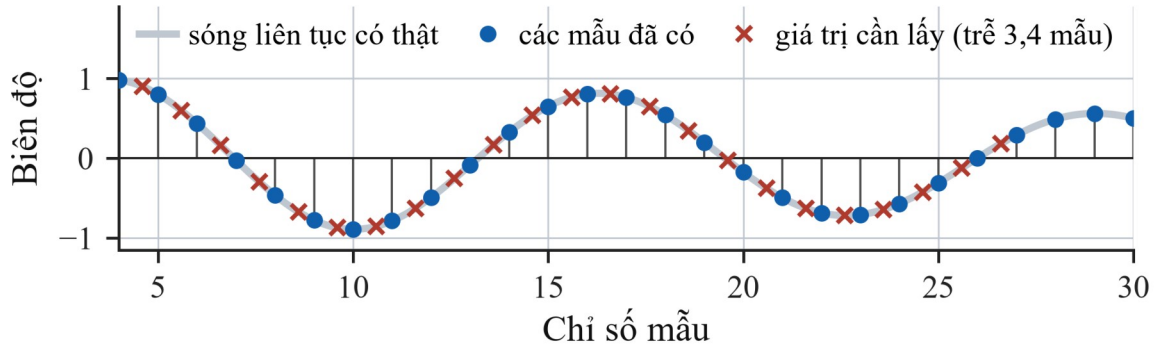
Ba nguyên tắc học

- **Ba con số, ba câu hỏi:** tần số, lượng nâng, Q — ở đâu, bao nhiêu, rộng bao nhiêu.
- **Nhìn đáp ứng, không nhìn hệ số:** đường |H(f)| nói tất cả; năm hệ số thì không.
- **Ba phép kiểm bằng số:** nội suy trễ (9.2), chuỗi EQ (9.4), RT60 (9.7); đều đo lại được trên máy.

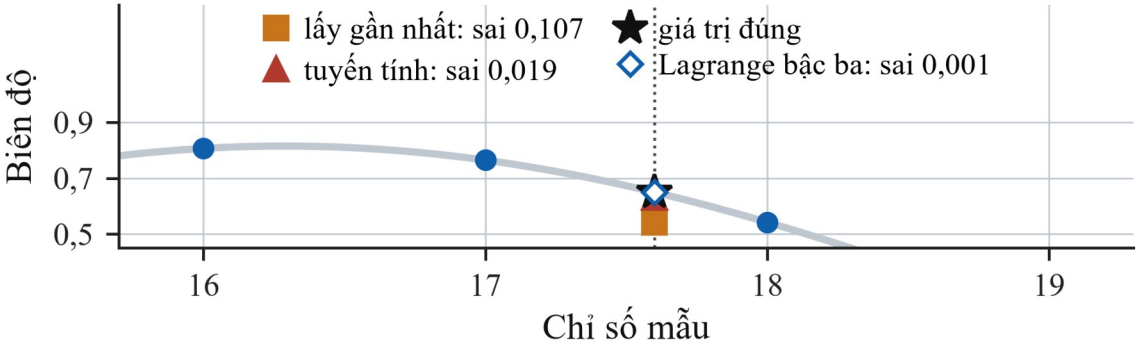
MỤC 9.2

Trễ phân số và họ điều biến

- Độ trễ chạy liên tục hầu như không bao giờ rơi đúng số nguyên mẫu.
- Có ba cách đoán giá trị nằm giữa hai mẫu.
- Nội suy tuyến tính là một bộ lọc thông thấp, và mức mất thay đổi theo phần lẻ.
- Flanger, chorus, vibrato chỉ khác nhau ở đường độ trễ.



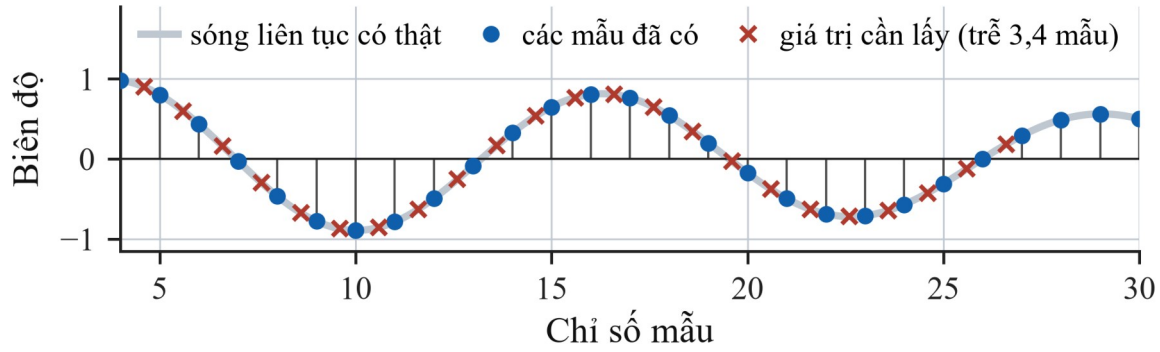
(a) Trễ 3,4 mẫu: mọi giá trị cần lấy nằm giữa hai mẫu



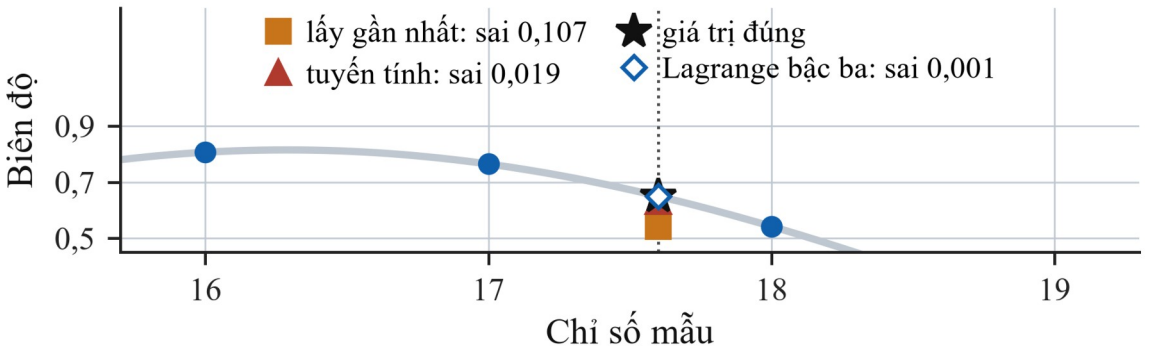
(b) Ba cách đoán giá trị tại 17,6, và sai số của từng cách

Giá trị cần lấy nằm giữa hai mẫu

- Mục 8.7 dựng bộ trễ điều biến nhưng bỏ qua chỗ độ trễ không nguyên.
- Chương 8 dùng np.interp, tức nội suy tuyến tính.
- Cách ấy chạy được nhưng có giá.
- Giá ấy quyết định flanger nghe sạch hay nghe đục.



(a) Trễ 3,4 mẫu: mọi giá trị cần lấy nằm giữa hai mẫu



(b) Ba cách đoán giá trị tại 17,6, và sai số của từng cách

Hình 9.3 — Mọi giá trị cần lấy đều nằm giữa hai mẫu đã có

Nội suy tuyến tính

$$y[n] = (1 - f)\,x[n - i] + f\,x[n - i - 1], \qquad i = \lfloor D \rfloor,\ f = D - i$$

(9.1)

- D là độ trễ mong muốn tính bằng mẫu; i là phần nguyên, f là phần lẻ.
- Với f bằng 0, công thức trở về phép trễ nguyên của chương 8.
- Một phép nhân và một phép cộng; đủ cho phần lớn công việc.

Ba kiểu nội suy và sai số

- **Lấy mẫu gần nhất:** làm tròn D, không có phép nhân; sai tới nửa mẫu, nghe ra tiếng rè.
- **Tuyến tính:** một phép nhân, một phép cộng; sai 0,019 ở ô (b) Hình 9.3.
- **Lagrange bậc ba:** đa thức qua bốn mẫu liền nhau; thêm chừng ba phép nhân; sai 0,001.
- **Lấy gần nhất sai 0,107:** mỗi bậc tốt hơn bậc trước chừng hai mươi lần.

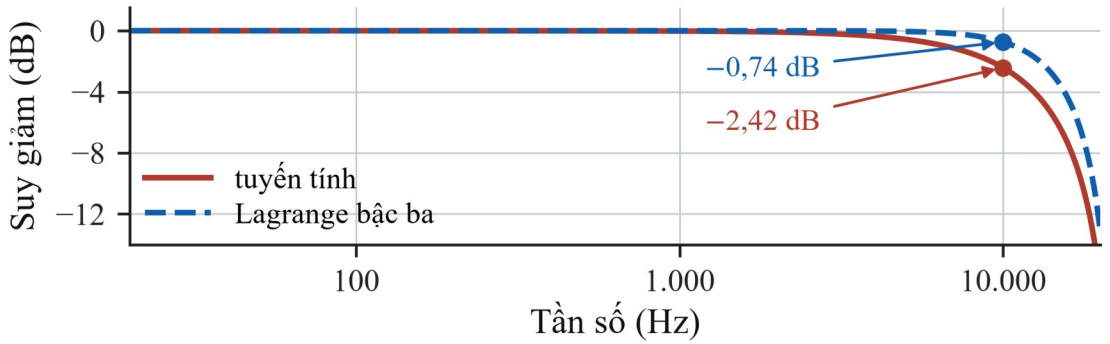
Đáp ứng biên độ của nội suy tuyến tính

$$|H_{tt}(\omega)| = \sqrt{1 - 2f(1-f)(1-\cos\omega)}$$

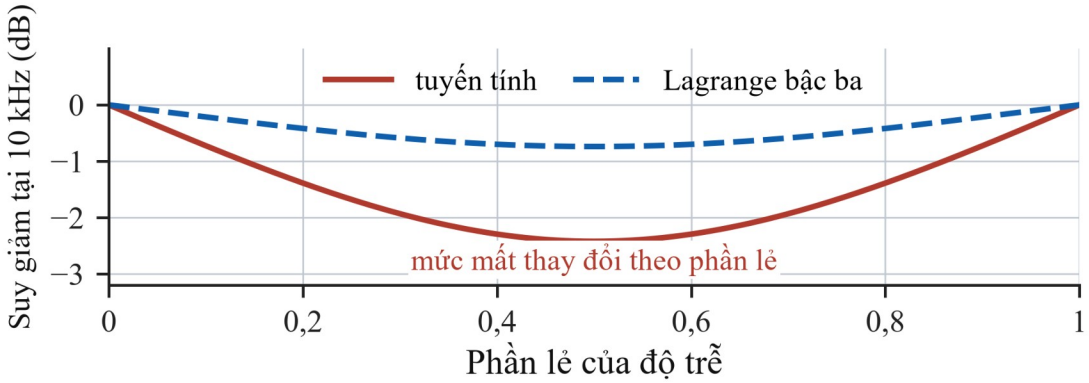
(9.2)

- Nội suy tuyến tính là một bộ lọc thông thấp, tính được thẳng từ công thức.
- Phần lẻ f bằng 0 hoặc 1: biểu thức trong căn bằng 1, bộ lọc không làm gì.
- Phần lẻ f bằng 0,5: suy giảm lớn nhất.

Mất cao tần, và mức mất thay đổi



(a) Đáp ứng biên độ ở phần lẻ 0,5 (trường hợp xấu nhất)



(b) Mức suy giảm tại 10 kHz khi độ trễ chạy

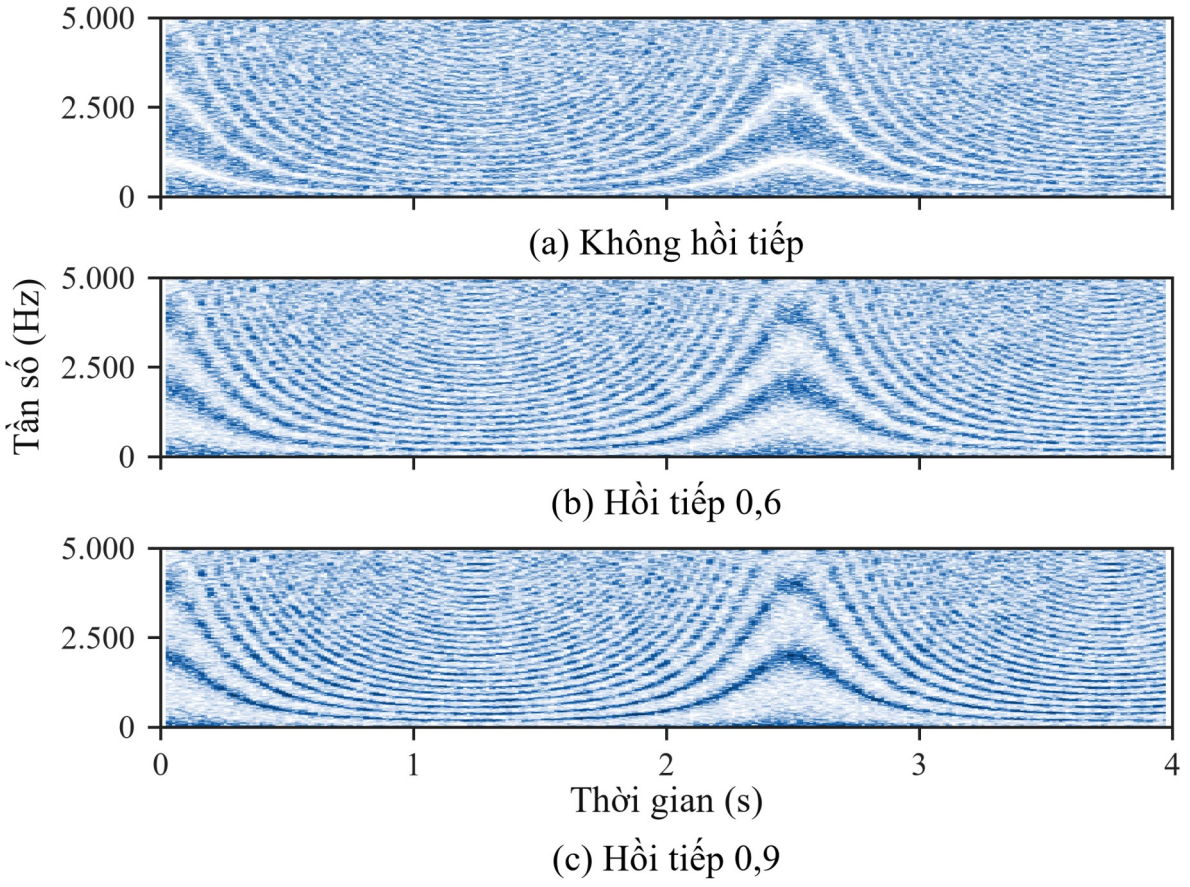
Hình 9.4 — Nội suy tuyến tính mất cao tần, và mức mất ấy THAY ĐỔI

Điều đáng ngại hơn con số tuyệt đối

Ở phần lẻ 0,5, nội suy tuyến tính mất 2,42 dB tại 10 kHz; Lagrange bậc ba chỉ mất 0,74 dB. Trong flanger, phần lẻ chạy từ 0 tới 1 rồi về, nên mức mất đi từ 0 tới 2,42 dB mỗi chu kỳ: tai nghe tiếng tối dần rồi sáng lại, tức nghe đục. Vì vậy đáng bỏ thêm ba phép nhân để dùng Lagrange bậc ba.

Hồi tiếp làm rãnh sâu hơn

- Thêm đường vòng từ đầu ra về bộ đệm trễ là ra flanger đúng nghĩa.
- Hồi tiếp không tạo thêm rãnh; số rãnh vẫn do độ trễ quyết định (mục 8.5).
- Nó làm rãnh sâu hơn và đỉnh giữa rãnh nhọn hơn.
- Đó là khác biệt giữa flanger nhẹ và flanger như máy bay phản lực.



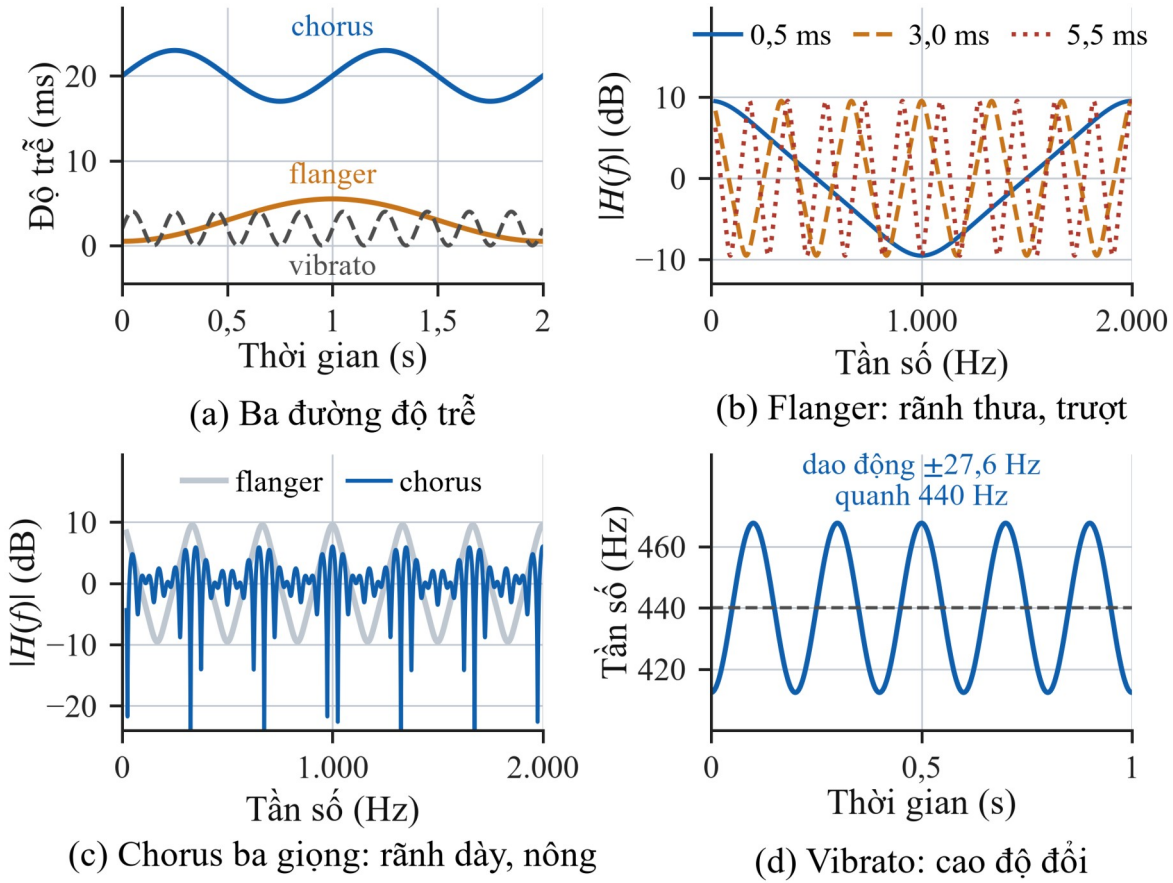
Hình 9.5 — Hồi tiếp làm rãnh sâu hơn, không làm rãnh nhiều hơn

Hồi tiếp: trị tuyệt đối nhỏ hơn 1

Điều kiện như mục 8.6, không có ngoại lệ cho flanger. Khác ở chỗ phép nội suy nằm trong vòng hồi tiếp, nên sai số nội suy bị nhân lên mỗi vòng. Nếu buộc dùng nội suy tuyến tính thì giữ hồi tiếp dưới 0,5.

Flanger, chorus, vibrato

- Khác biệt toàn bộ nằm ở đường độ trễ (hình a).
- Flanger: trễ ngắn, rãnh thưa; rãnh trượt theo dao động thành tiếng quét.
- Chorus: trễ dài, nhiều giọng lệch pha; rãnh dày mà nông nên nghe dày.
- Vibrato: không cộng bản gốc, không có lọc lược; chỉ đổi cao độ.



Hình 9.6 — Flanger, chorus và vibrato — khác nhau chỉ ở đường độ trễ

Vibrato: cao độ dao động đo được

- Biên độ trễ 2 ms ở 5 Hz cho cao độ dao động ±27,6 Hz quanh 440 Hz.
- Phải đo cao độ tức thời mới thấy.
- Bảng chọn tham số cho ba hiệu ứng điều biến ở Hình 9.7.

Hiệu ứng	Trễ TB	Dao động	Tốc độ	Hồi tiếp	Cộng bản gốc
Flanger	1 – 10 ms	± lớn, gần bằng trễ TB	0,1 – 1 Hz	Có — càng nhiều càng gắt	Có
Chorus	10 – 30 ms	± nhỏ, vài phần trăm	0,5 – 2 Hz	Không	Có
Vibrato	2 – 10 ms	± vừa	4 – 7 Hz	Không	Không

Hai cột "Hồi tiếp" và "Cộng bản gốc" đủ để phân biệt cả ba: chorus có hồi tiếp thì thành flanger; vibrato bỏ bản gốc nên không còn lọc lược, chỉ còn dao động cao độ.

Hình 9.7 — Bảng chọn tham số cho ba hiệu ứng điều biến

Nội suy Lagrange bậc ba — bốn hệ số

```
def tre_phan_so_lagrange(x, d):
    """Trễ đi d mẫu, d là SỐ THỰC."""
    n  = x.size
    i  = np.arange(n) - d
    i0 = np.floor(i).astype(int)
    fr = i - i0                       # phần lẻ, trong [0, 1)

    # bốn hệ số Lagrange qua các mẫu i0-1, i0, i0+1, i0+2
    h = [(-fr * (fr - 1) * (fr - 2)) / 6.0,
         ((fr + 1) * (fr - 1) * (fr - 2)) / 2.0,
         (-(fr + 1) * fr * (fr - 2)) / 2.0,
         ((fr + 1) * fr * (fr - 1)) / 6.0]

    ra = np.zeros(n)
    for k, hk in zip((-1, 0, 1, 2), h):
        j  = i0 + k
        ok = (j >= 0) & (j < n)       # tránh ra ngoài mảng
        ra[ok] += hk[ok] * x[j[ok]]
    return ra
```

Bốn phép kiểm cho phép trễ phân số

- d nguyên: kết quả phải trùng phép trễ thường tới từng bit.
- d có phần lẻ 0,5, nội suy tuyến tính: một xung đơn chia đôi thành hai mẫu 0,5.
- Tổng bốn hệ số Lagrange phải bằng đúng 1 với mọi phần lẻ.
- Tại 10 kHz: phần lẻ 0 cho 0 dB; phần lẻ 0,5 cho khoảng −2,4 dB (tuyến tính) và −0,7 dB (Lagrange).

MỤC 9.3

Bộ lọc bậc hai — biquad

- Khối mới duy nhất của chương, và khối dùng lại nhiều nhất trong xử lý âm thanh.
- Năm phép nhân, bốn phép cộng; chỉ hai ô nhớ.
- Ba số vào (tần số, Q, lượng nâng), năm hệ số ra.
- Bảy kiểu lọc là cùng một khối với năm hệ số khác nhau.

TÊN HÀM	TÊN VIỆT	LÀM GÌ / DÙNG ĐỂ
`thong_thap`	Thông thấp	Cắt trên fc, dốc 12 dB/quãng tám *Loại tiếng rít, làm dịu nguồn*
`thong_cao`	Thông cao	Cắt dưới fc, dốc 12 dB/quãng tám *Loại ù nguồn điện, tiếng gió micro*
`thong_dai`	Thông dải	Chỉ giữ quanh fc, bề rộng do Q *Bộ lọc của wah; tách một dải để phân tích*
`chan_dai`	Chắn dải	Tạo một rãnh hẹp tại fc *Loại ù 50 Hz và các hài của nó*
`ke_thap`	Kệ thấp	Nâng hoặc hạ CẢ vùng dưới fc *Chỉnh lượng trầm của cả bản*
`ke_cao`	Kệ cao	Nâng hoặc hạ CẢ vùng trên fc *Chỉnh độ sáng; thước K (chương 7)*
`dinh`	Đỉnh (peaking)	Nâng hoặc hạ MỘT dải quanh fc *Dải giữa của EQ đồ hoạ và bán tham số*

Phương trình sai phân của biquad

$$y[n] = b_0 x[n] + b_1 x[n-1] + b_2 x[n-2] - a_1 y[n-1] - a_2 y[n-2]$$

(9.3)

- Ba hệ số b nhân với đầu vào hiện tại và hai đầu vào trước.
- Hai hệ số a nhân với hai đầu ra trước.
- Dấu trừ trước hai số hạng cuối là quy ước; đảo dấu thì thành bộ lọc khác hẳn.

Hàm truyền: thương của hai tam thức bậc hai

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}$$

(9.4)

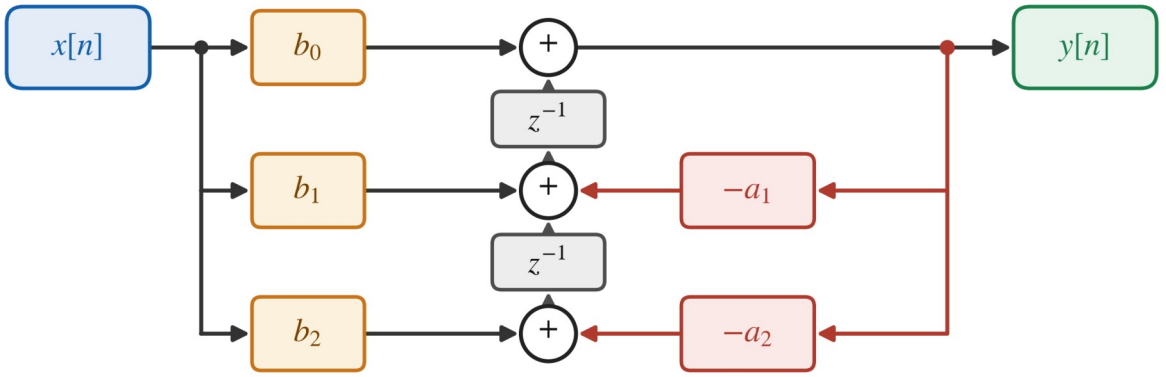
- Dạng hàm truyền gọn hơn và nói được nhiều hơn.
- Tên biquad xuất phát từ hai tam thức bậc hai ở tử và mẫu.

Vì sao bậc hai, không phải bậc một hay bậc bốn

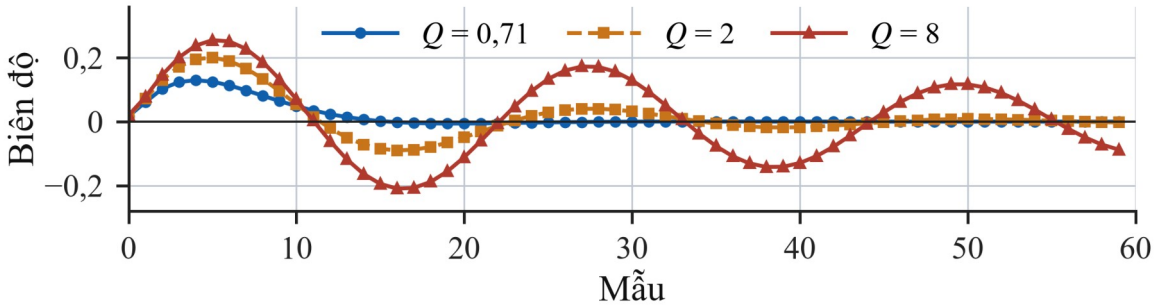
Bậc một chỉ dựng được đường cong đơn điệu, không có cộng hưởng. Bậc hai là bậc thấp nhất có hai cực liên hợp phức, tức có cộng hưởng. Nối tiếp nhiều khối bậc hai cho bộ lọc bậc bất kỳ mà ổn định số học tốt hơn một khối bậc cao; mọi thư viện đều làm vậy.

Dạng trực tiếp II chuyển vị

- Chỉ hai ô nhớ, trong khi dạng trực tiếp I cần bốn.
- Hai ô nhớ là toàn bộ trạng thái, chép sang khối sau là chuyển được trạng thái (mục 6.9).
- Ổn định số học tốt hơn với số 32 bit và Q cao ở tần số thấp.
- Đáp ứng xung tắt dần mãi nên gọi là IIR (Infinite Impulse Response – đáp ứng xung vô hạn); Q càng cao, đuôi càng dài.



(a) Dạng trực tiếp II chuyển vị: chỉ hai ô nhớ



(b) Đáp ứng xung của bộ thông thấp 2 kHz

Hình 9.8 — Dạng trực tiếp II chuyển vị, và đáp ứng xung của bộ lọc

Hai đại lượng trung gian

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_c}{f_s}, \qquad \alpha = \frac{\sin\omega_0}{2Q} \tag{9.5}$$

- Người dùng chỉ nhập ba số: tần số trung tâm, Q, lượng nâng.
- ω_0 là tần số góc chuẩn hoá; α gộp cả Q lẫn tần số.
- Mỗi kiểu lọc có công thức riêng đi qua hai đại lượng này.

Ví dụ: kiểu thông dải

$$b = [\alpha,\ 0,\ -\alpha]\ ; \qquad a = [1+\alpha,\ -2\cos\omega_0,\ 1-\alpha]$$

(9.6)

- Kiểu thông dải là kiểu mà mục 9.5 dùng cho wah.
- Sau đó chia cả b lẫn a cho a_0 để chuẩn hoá về dạng công thức (9.3).
- Sáu kiểu còn lại chỉ khác ba dòng tính b và a; nguồn là RBJ Audio EQ Cookbook.

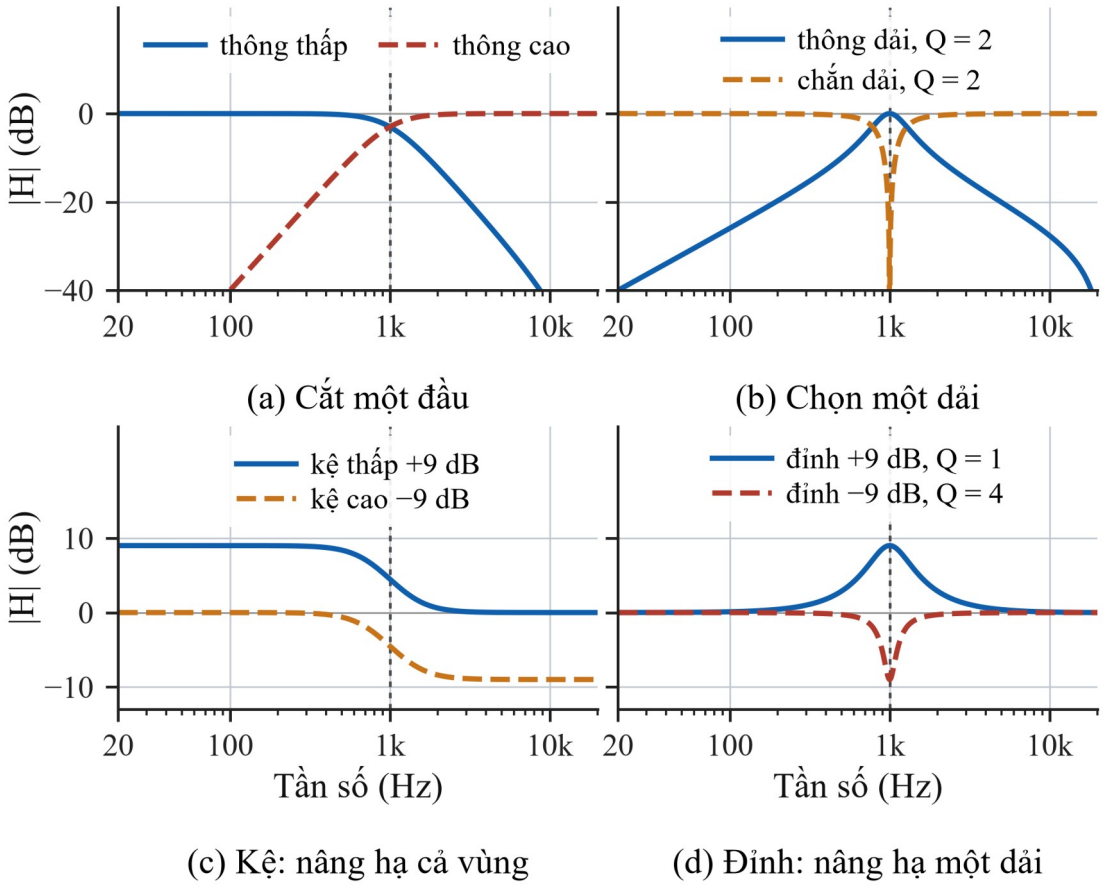
Bảy kiểu biquad và việc của từng kiểu

TÊN HÀM	TÊN VIỆT	LÀM GÌ / DÙNG ĐỂ
`thong_thap`	Thông thấp	Cắt trên fc, dốc 12 dB/quãng tám *Loại tiếng rít, làm dịu nguồn*
`thong_cao`	Thông cao	Cắt dưới fc, dốc 12 dB/quãng tám *Loại ù nguồn điện, tiếng gió micro*
`thong_dai`	Thông dải	Chỉ giữ quanh fc, bề rộng do Q *Bộ lọc của wah; tách một dải để phân tích*
`chan_dai`	Chắn dải	Tạo một rãnh hẹp tại fc *Loại ù 50 Hz và các hài của nó*
`ke_thap`	Kệ thấp	Nâng hoặc hạ CẢ vùng dưới fc *Chỉnh lượng trầm của cả bản*
`ke_cao`	Kệ cao	Nâng hoặc hạ CẢ vùng trên fc *Chỉnh độ sáng; thước K (chương 7)*
`dinh`	Đỉnh (peaking)	Nâng hoặc hạ MỘT dải quanh fc *Dải giữa của EQ đồ hoạ và bán tham số*

Hình 9.9 — Bảy kiểu biquad và việc của từng kiểu

Bảy kiểu chia thành bốn việc

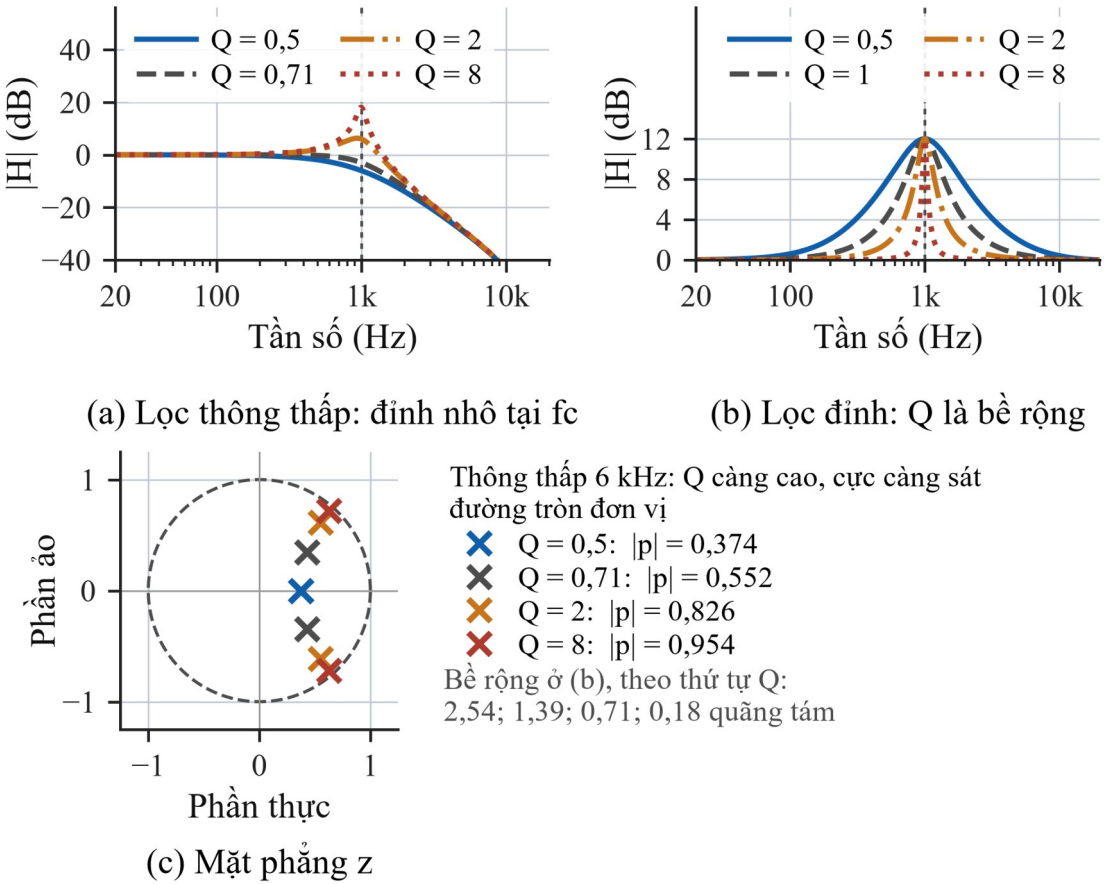
- Cắt hẳn một đầu.
- Chọn hoặc bỏ một dải hẹp.
- Nâng hạ cả một vùng.
- Nâng hạ đúng một dải.
- EQ hằng ngày chỉ cần ba kiểu cuối; cả bảy là cùng một khối.



Hình 9.10 — Bảy kiểu chia thành bốn việc, nhìn trên đáp ứng biên độ

Ba cách nhìn cùng một con số Q

- Q trả lời câu hỏi hẹp bao nhiêu.
- Với bộ lọc cắt, Q còn dựng bướu tại tần số cắt: Q bằng 8 cho bướu cao 18 dB.
- Hai cực càng sát đường tròn đơn vị thì Q càng cao.
- Thông thấp 6 kHz: bán kính cực 0,374 ở Q = 0,5 lên 0,954 ở Q = 8.



(a) Lọc thông thấp: đỉnh nhô tại fc (b) Lọc đỉnh: Q là bề rộng

(c) Mặt phẳng z

Hình 9.11 — Ba cách nhìn cùng một con số Q

Ba giá trị Q đáng thuộc

- **Q = 0,7071:** ngưỡng không có bướu, phẳng nhất ở dải thông; mặc định của bộ lọc cắt.
- **Q = 0,5:** hai cực thực, không cộng hưởng, chuyển tiếp mềm hơn.
- **Q = 1,4142:** lọc đỉnh có bề rộng đúng một quãng tám; mốc đổi qua lại hai cách nghĩ.

Cực ra ngoài đường tròn là mất ổn định

Cùng điều kiện với vòng hồi tiếp ở mục 8.6: ở đó |g| < 1, ở đây mọi cực nằm trong đường tròn đơn vị. Công thức RBJ luôn thoả điều kiện này; chỉ vi phạm khi chỉnh tay hệ số hoặc khi Q rất cao ở tần số rất thấp. Nên gọi on_dinh_biquad mỗi khi sinh hệ số từ tham số người dùng.

Biquad — sinh hệ số và chạy bộ lọc

```
def biquad_thong_dai(fc, Q, sr=44100):
    w0 = 2.0 * math.pi * fc / sr
    cw, sw = math.cos(w0), math.sin(w0)
    al = sw / (2.0 * Q)
    b = [al, 0.0, -al]
    a = [1 + al, -2 * cw, 1 - al]
    return np.array(b) / a[0], np.array(a) / a[0]


def ap_biquad(x, b, a):
    """Dạng trực tiếp II chuyển vị — chỉ hai biến trạng thái."""
    y = np.empty(x.size)
    z1 = z2 = 0.0                    # TOÀN BỘ bộ nhớ
    for n in range(x.size):
        o  = b[0] * x[n] + z1
        z1 = b[1] * x[n] - a[1] * o + z2
        z2 = b[2] * x[n] - a[2] * o
        y[n] = o
    return y
```

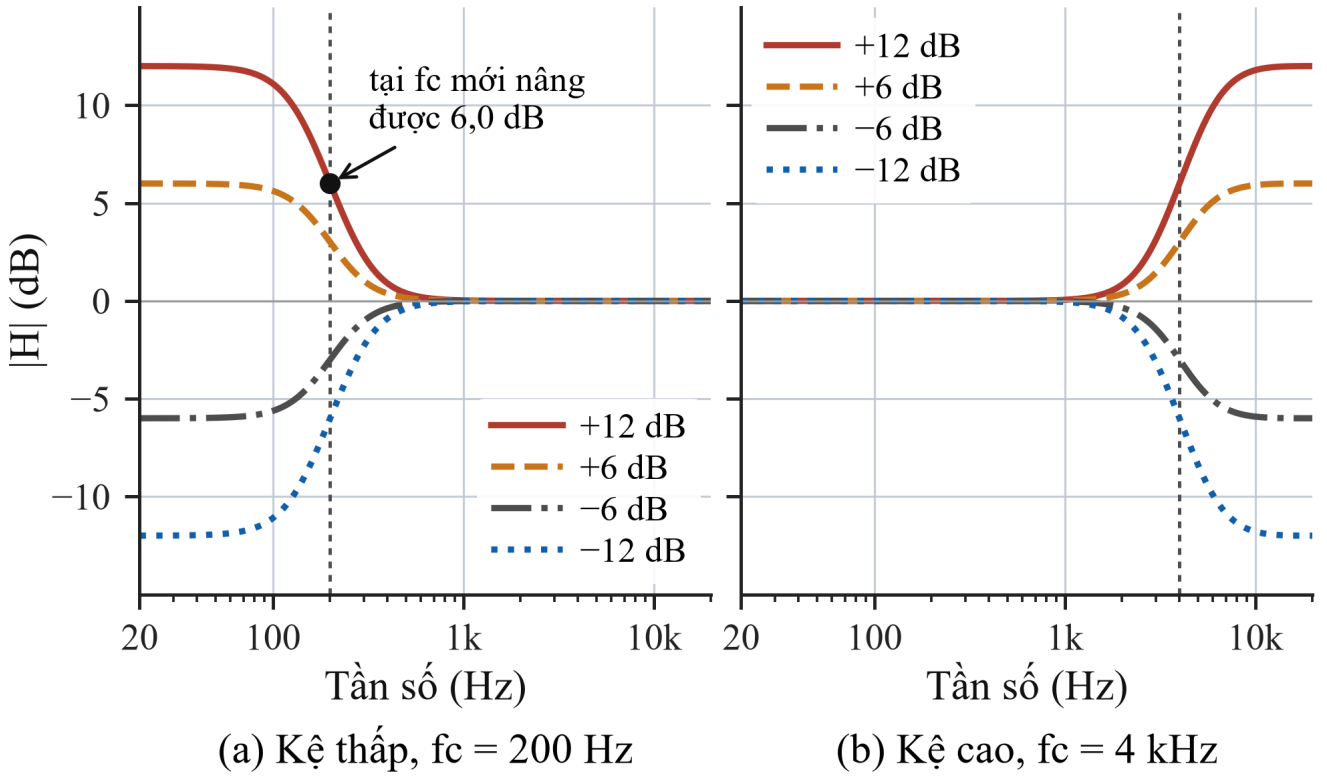
MỤC 9.4

Cân bằng tần số

- Kệ: nâng hạ cả một vùng, không tạo chỗ nhô.
- Lọc đỉnh: ba con số, ba câu hỏi độc lập; Q đổi sang quãng tám.
- Chuỗi nhiều dải: decibel cộng lại.
- Cắt thì rộng tay, nâng thì dè dặt: căn cứ ở cột đỉnh.

Kệ thấp và kệ cao, bốn lượng nâng

- Kệ đổi cân bằng chung mà không tạo chỗ nhô.
- Hợp khi bản dựng thiếu trầm hoặc chói quá.
- Thước K của chương 7 là kệ cao khoảng +4 dB nối tiếp bộ thông cao.
- Mục 7.2 đã dùng đúng khối này, chỉ chưa gọi tên.



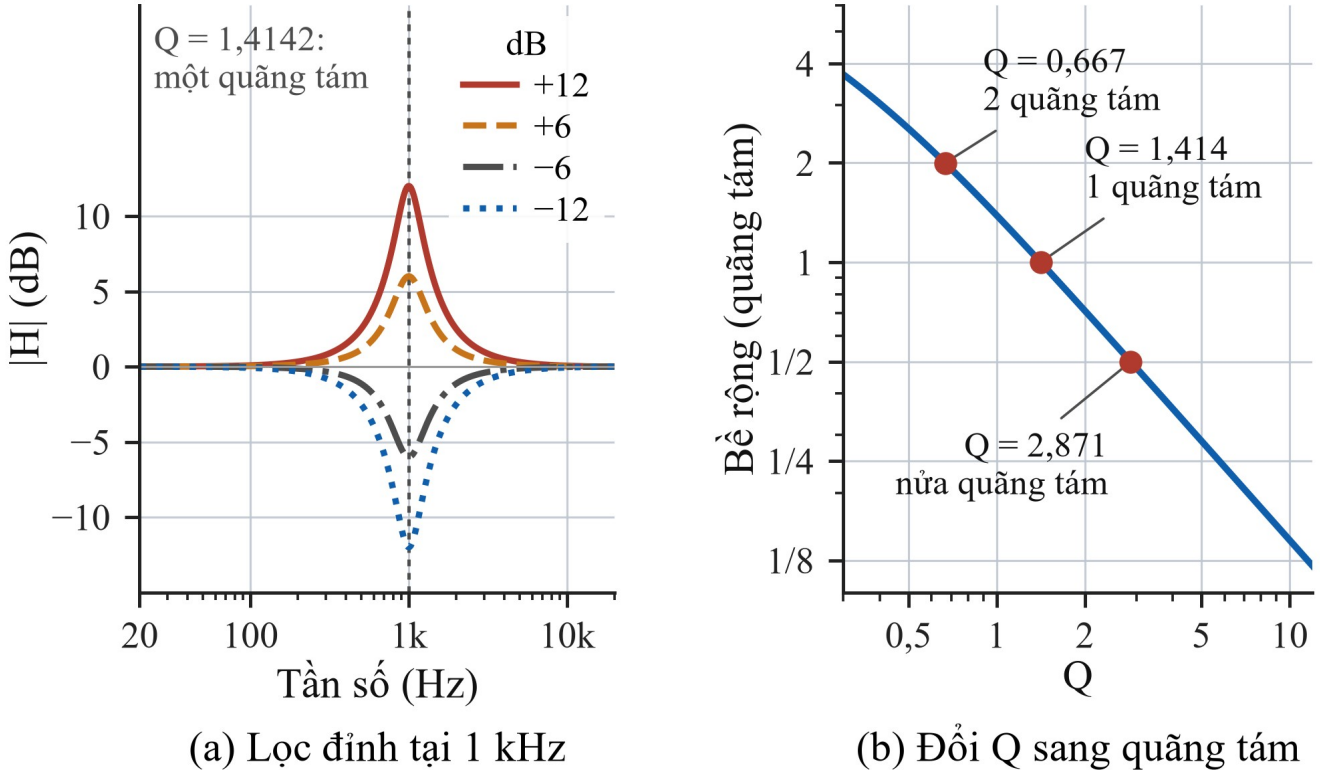
Hình 9.12 — Kệ thấp và kệ cao, bốn lượng nâng mỗi loại

Tần số của kệ: tại fc mới đi được nửa lượng nâng

Kệ thấp +12 dB đặt ở 200 Hz mới nâng 6,0 dB tại 200 Hz. Muốn nâng đủ 12 dB ở 100 Hz thì đặt fc ở chừng 250 tới 300 Hz. Lọc đỉnh thì khác: cho đúng lượng nâng tại đúng fc.

Lọc đỉnh và cách đổi Q sang quãng tám

- Lọc đỉnh là dải giữa của mọi bộ EQ.
- Tần số nói ở đâu, lượng nâng nói bao nhiêu, Q nói rộng bao nhiêu.
- Người dùng nghĩ bằng quãng tám, không nghĩ bằng Q.
- Hai công thức quy đổi đi được cả hai chiều.



Hình 9.13 — Lọc đỉnh, và cách đổi Q sang quãng tám

Quy đổi giữa Q và bề rộng quãng tám

$$BW = \frac{2}{\ln 2}\operatorname{arcsinh}\frac{1}{2Q}, \qquad Q = \frac{1}{2\sinh\left(\frac{\ln 2}{2}BW\right)}$$

(9.7)

- Hai công thức là cầu nối giữa Q và bề rộng dải tính bằng quãng tám.
- Ví dụ: Q = 1,414 ứng với đúng 1 quãng tám.

Bảng quy đổi Q sang bề rộng dải

Q	Bề rộng (quãng tám)	Dùng khi
0,667	2,00	Chỉnh cân bằng chung, nghe tự nhiên
1,414	1,00	Mốc chuẩn — dải giữa EQ đồ hoạ
2,871	0,50	Nhấn hoặc hạ một nhạc cụ trong bản trộn
4,318	0,33	Sửa một chỗ cụ thể mà không đụng xung quanh
8,650	0,17	Diệt một tần số cộng hưởng của phòng

Nối tiếp là cộng trong thang decibel

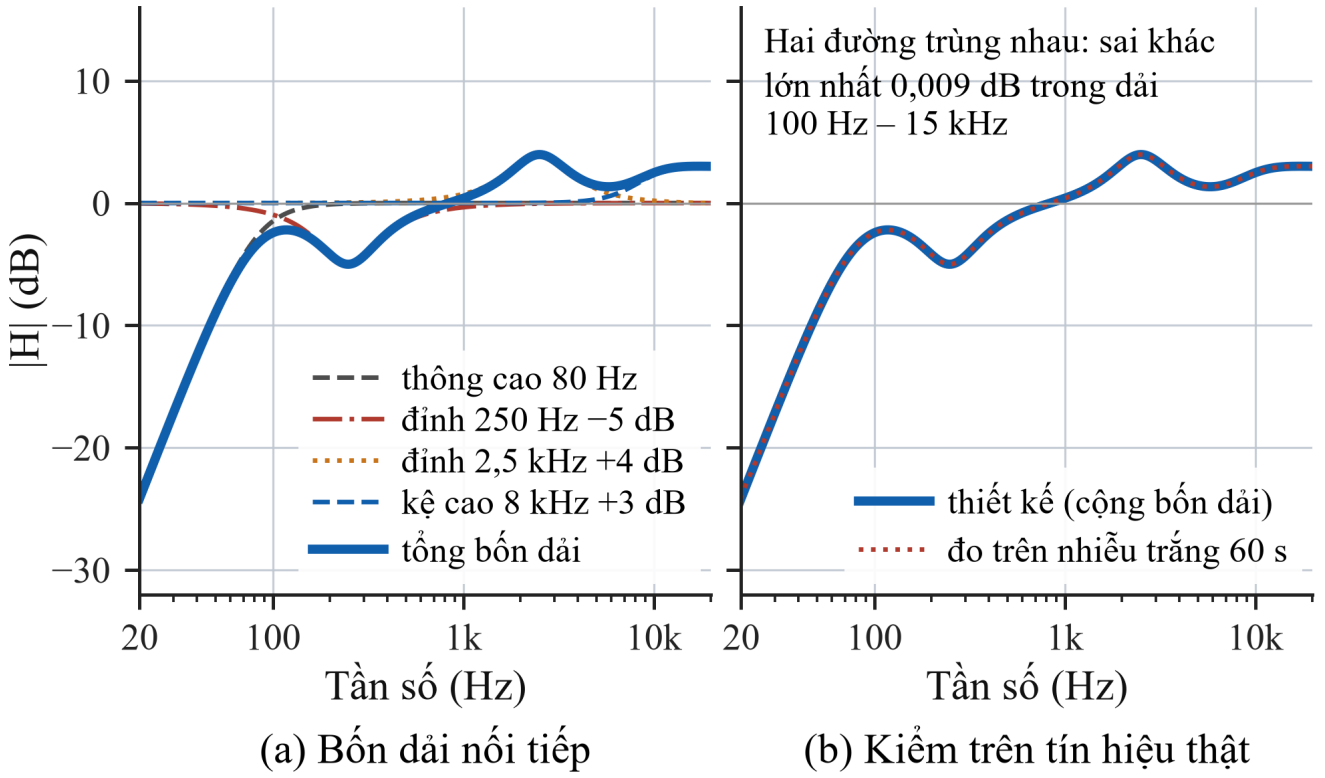
$$H_{\text{tổng}}(f) = \prod_k H_k(f) \Longrightarrow L_{\text{tổng}}(f) = \sum_k L_k(f) \ \ [\text{dB}]$$

(9.8)

- EQ nhiều dải là nhiều biquad nối tiếp.
- Nối tiếp là nhân các đáp ứng; nhân trong thang tuyến tính là cộng trong decibel.
- Đường tổng đọc bằng mắt: cộng các đường thành phần.

Bốn dải nối tiếp và phép kiểm

- Phép kiểm cho mọi chuỗi EQ tự viết: nhiễu trắng đi qua, đo phổ trước và sau, lấy hiệu.
- So hiệu ấy với đường thiết kế.
- Hai đường trùng nhau dưới 0,01 dB trong dải 100 Hz tới 15 kHz.
- Thứ tự các dải không quan trọng vì phép nhân giao hoán.



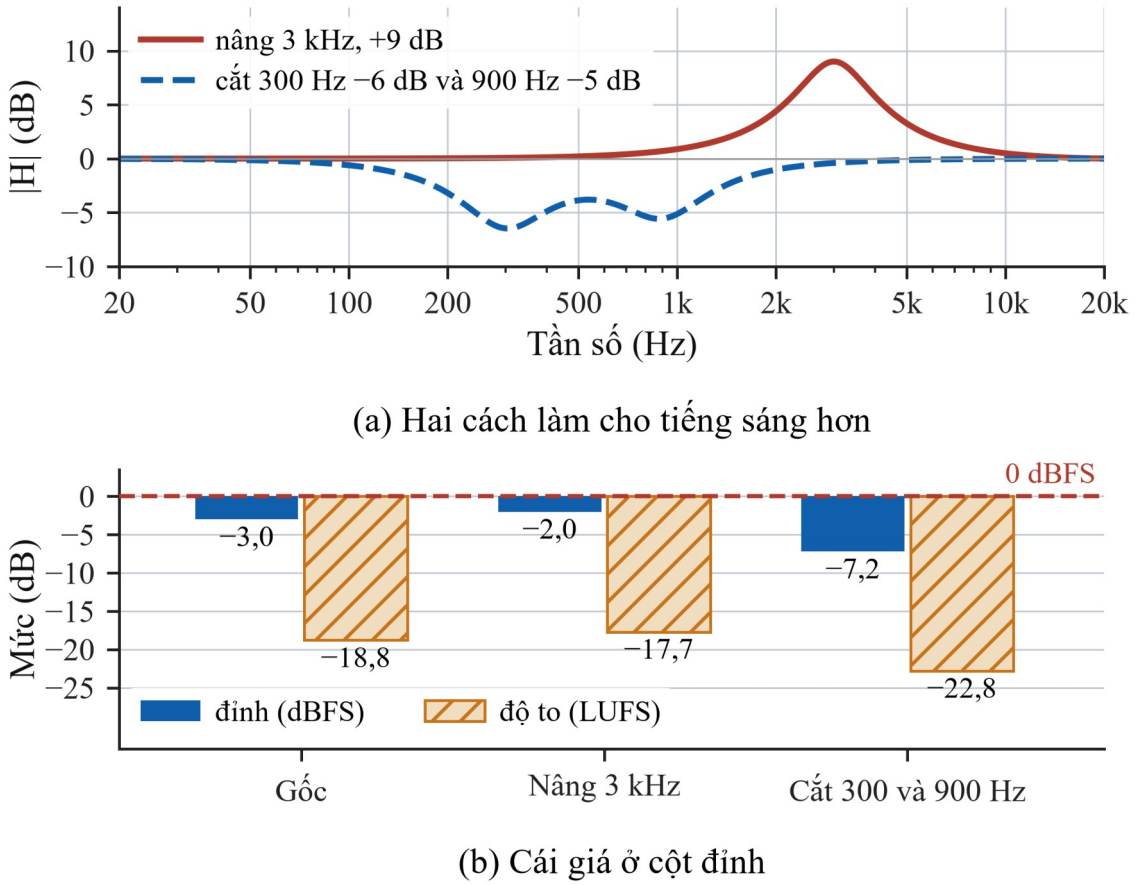
Hình 9.14 — Bốn dải nối tiếp, và phép kiểm trên tín hiệu thật

Mười dải không tốn hơn mười khối bậc hai

Vì decibel cộng lại, chi phí của EQ chỉ là tổng chi phí các khối bậc hai. Đó là lý do EQ là hiệu ứng rẻ nhất trong mọi hiệu ứng, và thứ tự các dải không đổi kết quả về biên độ.

Hai cách làm tiếng sáng hơn

- Cả hai cách đều tăng tỉ lệ năng lượng ở vùng cao.
- Nâng 3 kHz thêm 9 dB đưa đỉnh từ −3,0 lên −2,0 dBFS (decibel so với mức toàn thang, Full Scale), mất headroom.
- Cắt 300 và 900 Hz đưa đỉnh xuống −7,2 dBFS.
- Cắt chỉ cần bù một hằng số gain, không đổi hình dạng phổ.



Hình 9.15 — Hai cách làm tiếng sáng hơn, và cái giá ở cột đỉnh

Cắt thì rộng tay, nâng thì dè dặt

Căn cứ kỹ thuật: cột đỉnh ở hình (b) Hình 9.15. Căn cứ về tai: muốn nghe rõ một nhạc cụ, hạ những nhạc cụ che nó hiệu quả hơn nâng chính nó. Ngoại lệ: kệ cao vài decibel để thêm không khí cho cả bản.

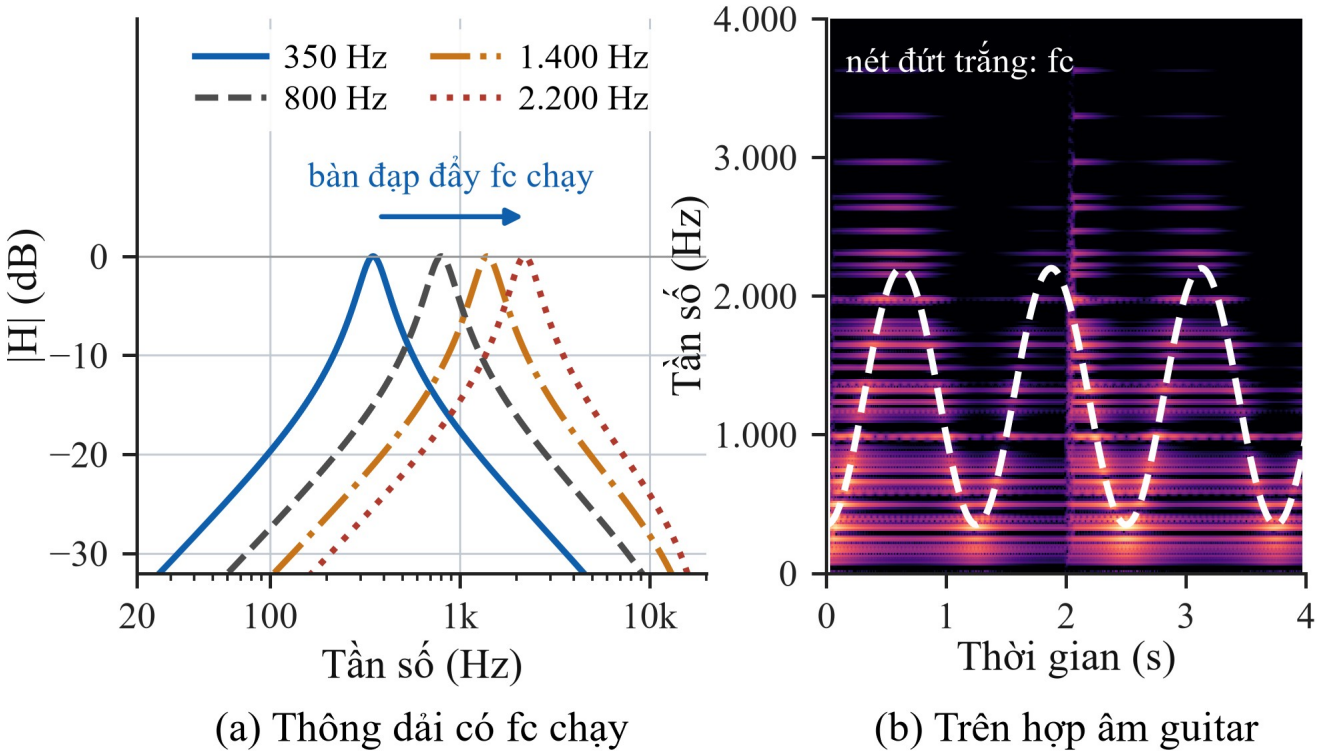
MỤC 9.5

Wah — bộ lọc có tần số chạy

- Không có khối mới: wah là bộ thông dải của mục 9.3.
- Hệ số được tính lại ở từng mẫu theo bàn đạp.
- Q quyết định wah nghe mềm hay gắt.
- Auto-wah nối hai họ hiệu ứng: đường bao điều khiển bộ lọc.

Wah là thông dải có tần số trung tâm chạy

- Trên phổ đồ, vệt sáng đi theo đường bàn đạp.
- Đó là cái tai nghe thành tiếng oa-oa.
- Dải quét thường từ chừng 350 tới 2.200 Hz.
- Đó là vùng tai nhạy nhất và vùng nguyên âm của tiếng nói.



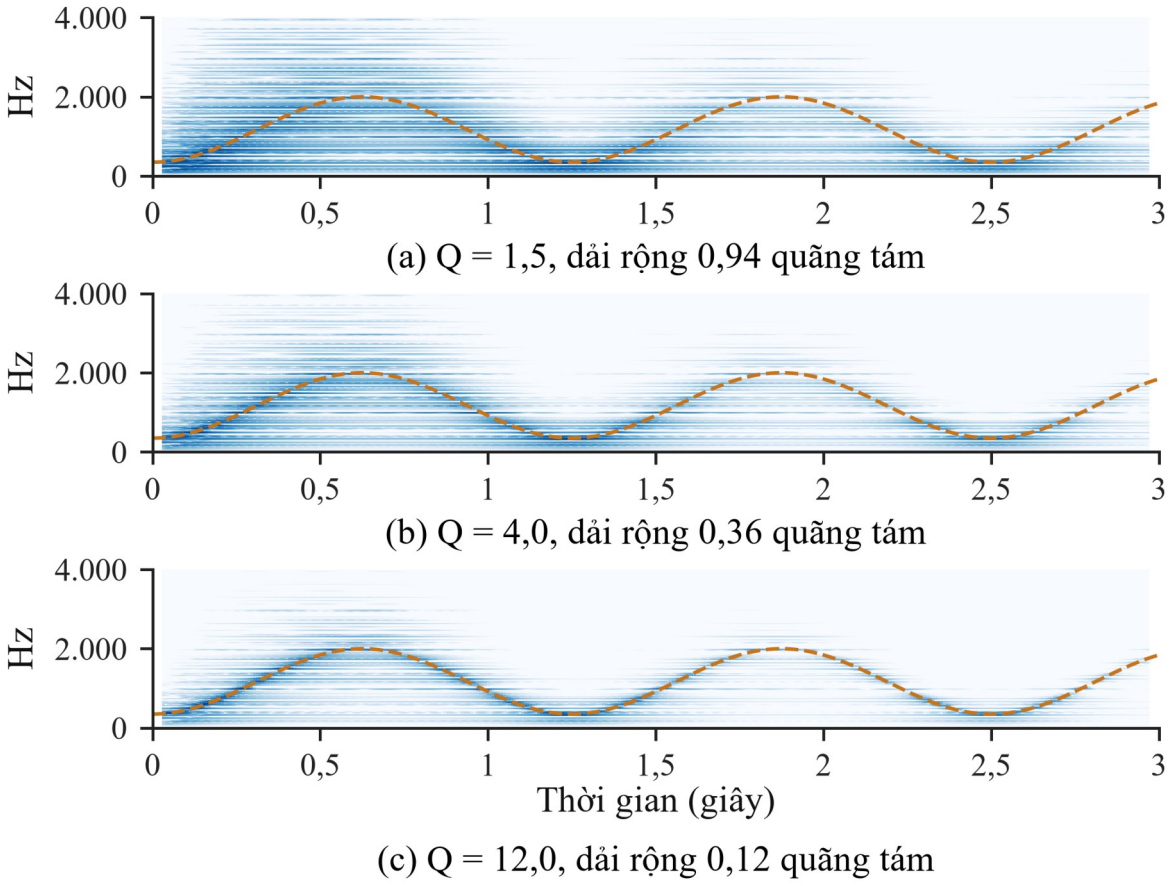
Hình 9.16 — Wah là một bộ thông dải có tần số trung tâm chạy

Vì sao wah nghe như tiếng nói

Bộ máy phát âm tạo các đỉnh cộng hưởng gọi là formant. Formant thứ nhất của nguyên âm nằm trong khoảng 300 – 800 Hz, formant thứ hai trong khoảng 900 – 2.500 Hz. Dải quét của wah phủ đúng vùng ấy nên bàn đạp lên xuống nghe như nguyên âm oa.

Ba giá trị Q trên cùng một đoạn guitar

- Q thấp: dải rộng, hiệu ứng nhẹ, giữ nhiều thân tiếng.
- Q cao: dải hẹp, tiếng mảnh, rõ chất tổng hợp.
- Khoảng thường dùng: Q từ 2 tới 6.
- Trên 10: bộ lọc gần mất ổn định và tiếng bắt đầu rít.



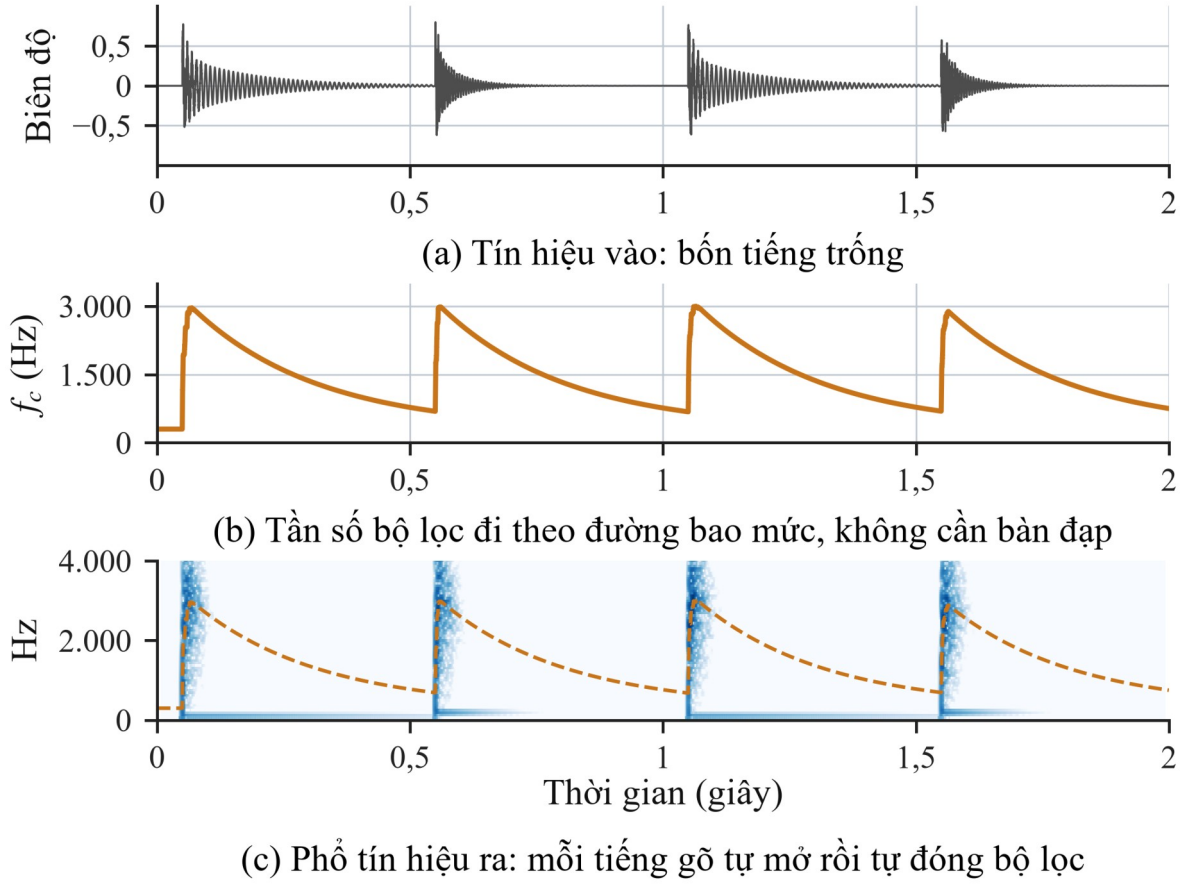
Hình 9.17 — Ba giá trị Q trên cùng một đoạn guitar

Hai chỗ dễ sai khi tự viết wah

- **Không đặt lại z1, z2:** tính lại hệ số mỗi mẫu là đúng, nhưng đặt lại trạng thái làm mất bộ nhớ và ra chuỗi gai.
- **Gai khi fc đổi quá nhanh:** bàn đạp giật hoặc auto-wah trên tiếng gõ sắc có thể sinh gai tại chỗ đổi.
- **Cách chữa:** làm trơn đường fc bằng bộ lọc một cực, đúng khối duong_bao_muc của mục 8.2.

Tần số bộ lọc đi theo đường bao mức

- Dùng lại bộ dò mức của mục 8.2.
- Chơi mạnh thì bộ lọc mở lên cao, chơi nhẹ thì đóng xuống.
- Không cần bàn đạp; nhịp nằm sẵn trong đường bao.
- Một khối của chương 8 điều khiển một khối của chương 9.



Hình 9.18 — Auto-wah: tần số bộ lọc đi theo đường bao mức

Auto-wah — chỉ khác wah thường ở ba dòng

```
def auto_wah(x, f_dau=300.0, f_cuoi=3000.0, Q=4.0,
             tan_cong_ms=5.0, nha_ms=120.0, sr=44100):
    # KHỐI CỦA CHƯƠNG 8: đường bao mức
    env = duong_bao_muc(x, tan_cong_ms, nha_ms, sr, "dinh")
    e   = env / max(env.max(), 1e-12)

    # KHỐI CỦA CHƯƠNG 9: thông dải, fc đổi từng mẫu
    fc = f_dau + (f_cuoi - f_dau) * e
    return thong_dai_quet(x, fc, Q, sr)
```

Cùng ý tưởng cho bộ nén theo đường bên và bộ lọc theo đường bao ở chương 14.

MỤC 9.6

Điều chế biên độ

- Tremolo: nhân tín hiệu với dao động chậm, luôn không âm.
- Điều chế vòng: sóng mang ở vùng nghe được, hệ số đổi dấu.
- Hai khác biệt ấy đổi hẳn kết quả: sóng mang biến mất, cao độ mất.

Tremolo: nhân với dao động không âm

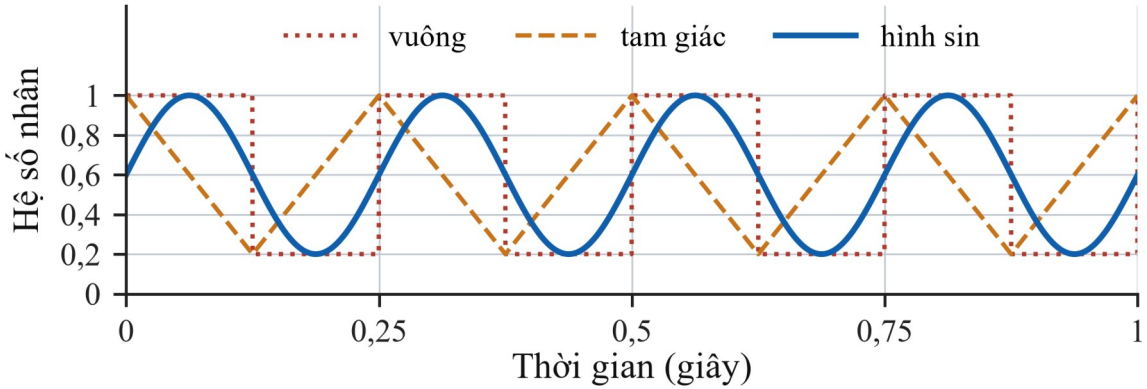
$$y[n] = x[n]\left[1 - d + d \cdot \frac{1 + \sin(2\pi f_{\text{lfo}} n / f_s)}{2}\right]$$

(9.9)

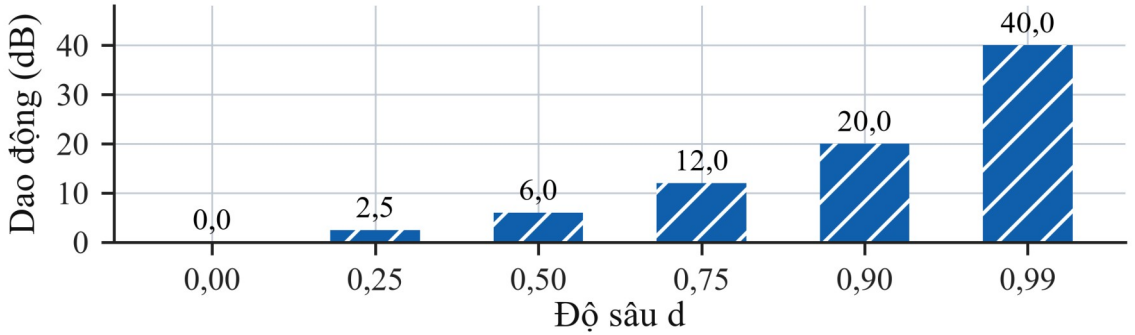
- d là độ sâu từ 0 tới 1; f_lfo là tốc độ, thường 2 tới 8 Hz.
- Phần trong ngoặc vuông luôn nằm giữa 1 − d và 1.
- Nó không bao giờ âm và không bao giờ vượt 1.

Ba dạng dao động và độ sâu đổi sang decibel

- Độ sâu 0,25 cho 2,5 dB dao động.
- Độ sâu 0,9 cho 20 dB; độ sâu 0,99 cho 40 dB.
- Núm tuyến tính 0 tới 1 có nửa đầu gần như không nghe ra gì.
- Cách chữa: cho núm chạy theo decibel hoặc dùng thang bình phương.



(a) Ba dạng dao động, độ sâu 0,8 và tốc độ 4 Hz



(b) Độ sâu (thang tuyến tính) đổi sang decibel

Hình 9.19 — Ba dạng dao động, và cách độ sâu đổi sang decibel

Tích hai hình sin: chỉ còn hiệu và tổng

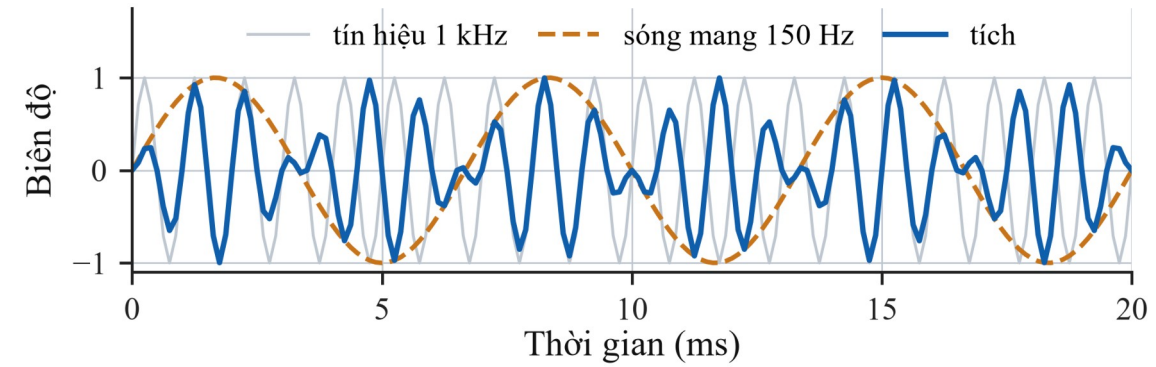
$$\sin(2\pi f_t t)\sin(2\pi f_m t) = \frac{1}{2}\cos\left(2\pi(f_t - f_m)t\right) - \frac{1}{2}\cos\left(2\pi(f_t + f_m)t\right)$$

(9.10)

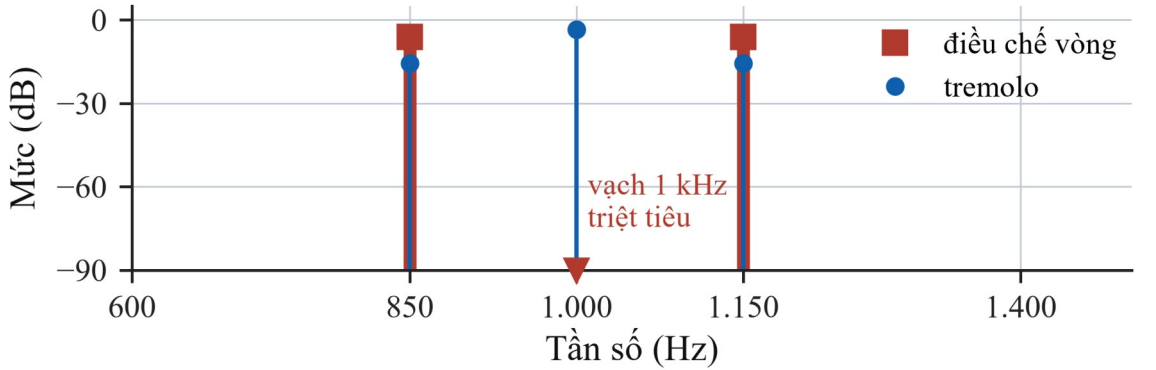
- t là tín hiệu, m là sóng mang.
- Tích của hai hình sin không còn chứa tần số nào của hai hình sin ấy.
- Nó chỉ chứa tần số hiệu và tần số tổng.

Sóng mang biến mất; còn hai dải bên

- Tín hiệu 1 kHz nhân sóng mang 150 Hz cho hai vạch ở 850 và 1.150 Hz.
- Vạch 1 kHz triệt tiêu hoàn toàn.
- Tremolo ở cùng 150 Hz giữ nguyên vạch gốc.
- Vì hệ số tremolo không âm nên còn thành phần một chiều.



(a) Nhân với sóng mang có đổi dấu



(b) Phổ: tremolo giữ vạch gốc, điều chế vòng thì không

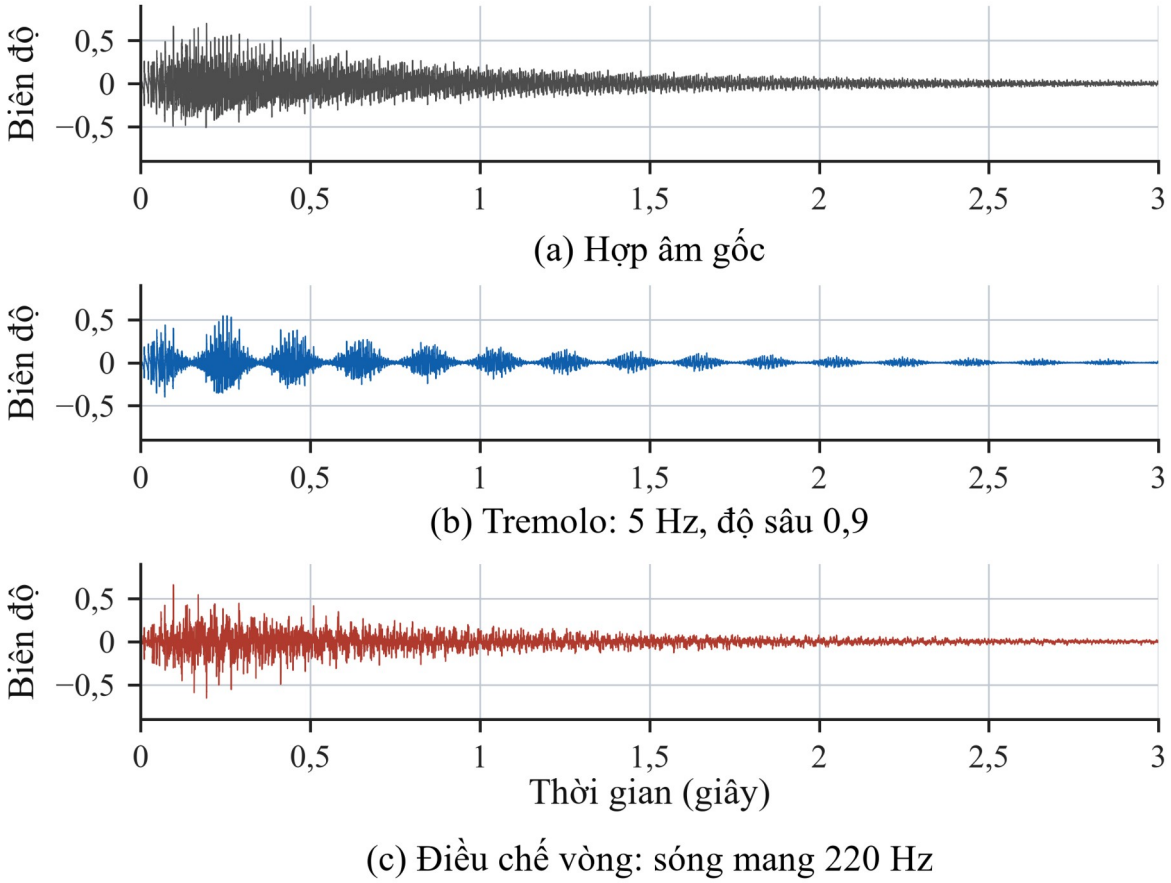
Hình 9.20 — Sóng mang biến mất; chỉ còn hai dải bên ở hiệu và tổng

Vì sao điều chế vòng nghe kim loại

Nhạc cụ có cao độ rõ vì các thành phần là bội nguyên của tần số cơ bản: 100, 200, 300, 400 Hz. Điều chế vòng với sóng mang 60 Hz biến chúng thành 40, 160, 140, 260, 240, 360 Hz: không còn bội nguyên, tai không dựng được cao độ. Vì vậy điều chế vòng chỉ dùng làm hiệu ứng đặc biệt.

Cùng một hợp âm guitar qua hai hiệu ứng

- Tremolo giữ nguyên hình dạng bên trong, chỉ nắn đường bao.
- Điều chế vòng đổi hẳn nội dung bên trong.
- Nhìn dạng sóng là phân biệt được ngay.



Hình 9.21 — Cùng một hợp âm guitar qua hai hiệu ứng

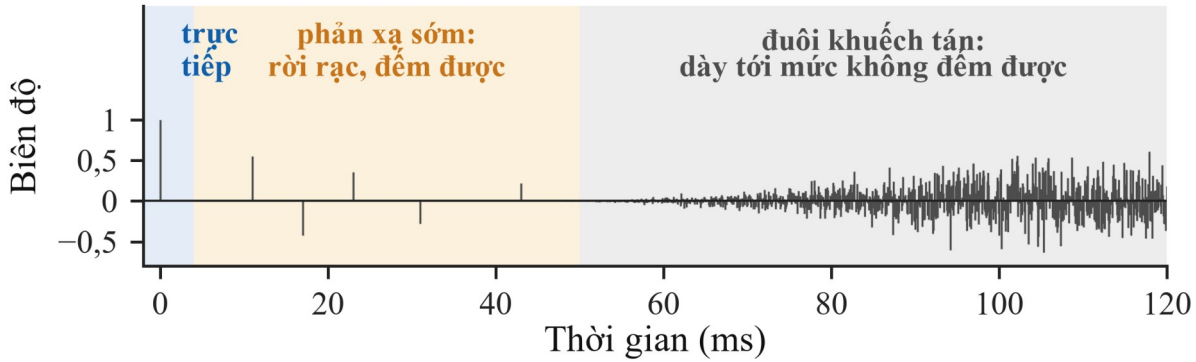
MỤC 9.7

Bộ vang

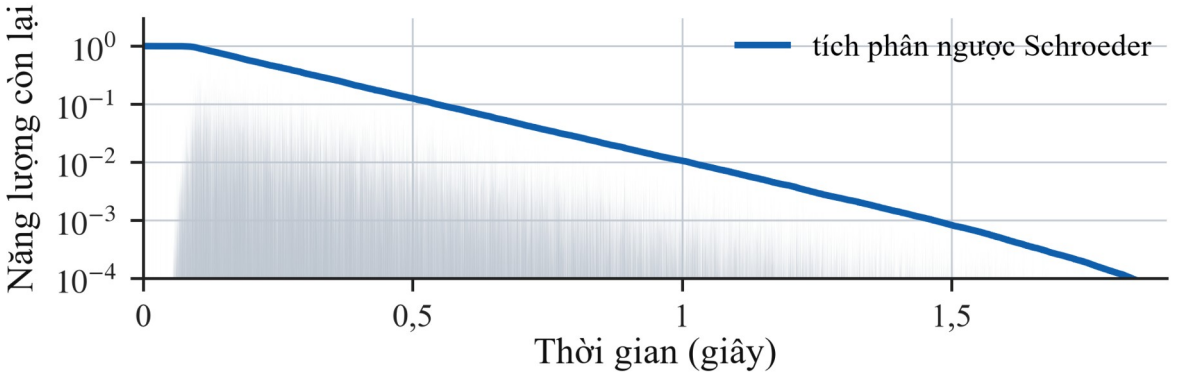
- Đáp ứng xung phòng gồm ba phần: tiếng trực tiếp, phản xạ sớm, đuôi vang.
- Sơ đồ Schroeder: trễ đầu, bốn lọc lược song song, hai thông toàn phần.
- RT60 đo bằng tích phân ngược và cách T30.
- Mật độ tiếng vọng và mốc hoà trộn tính được từ thể tích phòng.

Ba phần của một đáp ứng xung

- Tiếng trực tiếp: đến trước nhất, cho biết nguồn ở đâu.
- Phản xạ sớm: vài chục mili giây đầu, rời rạc; cho biết phòng to cỡ nào.
- Đuôi vang khuếch tán: sau mốc hoà trộn; cho biết RT60.
- Bộ vang thuật toán phải dựng đủ cả ba phần.



(a) Ba phần của đáp ứng xung (120 ms đầu)

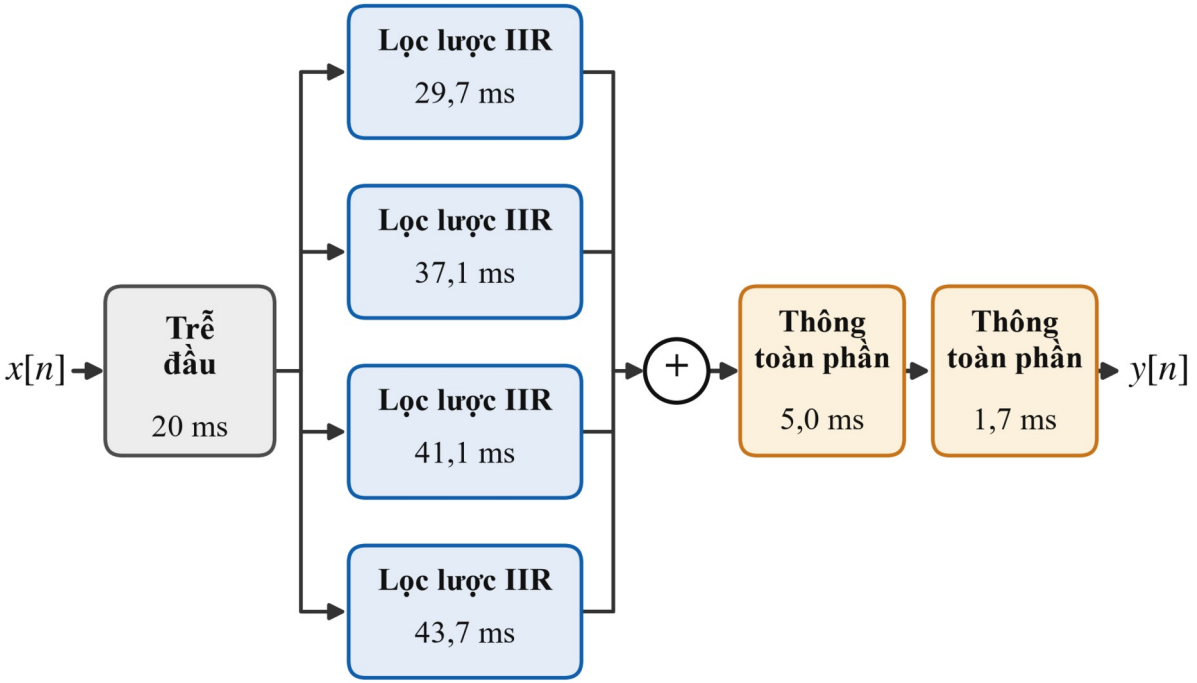


(b) Cả đáp ứng xung và đường tắt dần năng lượng (thang loga)

Hình 9.22 — Ba phần của một đáp ứng xung, và đường tắt năng lượng của nó

Bốn lọc lược song song, hai thông toàn phần

- Sơ đồ có từ năm 1962, vẫn là nền của mọi bộ vang thuật toán.
- Trễ đầu 10 tới 40 ms tách tiếng trực tiếp khỏi đuôi vang.
- Bốn lọc lược IIR dựng đuôi vang và quyết định RT60; bốn độ trễ phải nguyên tố cùng nhau.
- Hai thông toàn phần nối tiếp làm dày mật độ tiếng vọng.



Bốn độ trễ nguyên tố cùng nhau để các đỉnh cộng hưởng không chồng lên nhau.
Bốn lọc lược song song dựng đuôi vang; hai thông toàn phần nối tiếp làm dày mật độ.

Hình 9.23 — Bộ vang Schroeder: bốn lọc lược song song, hai thông toàn phần

Biên độ bằng 1 ở mọi tần số

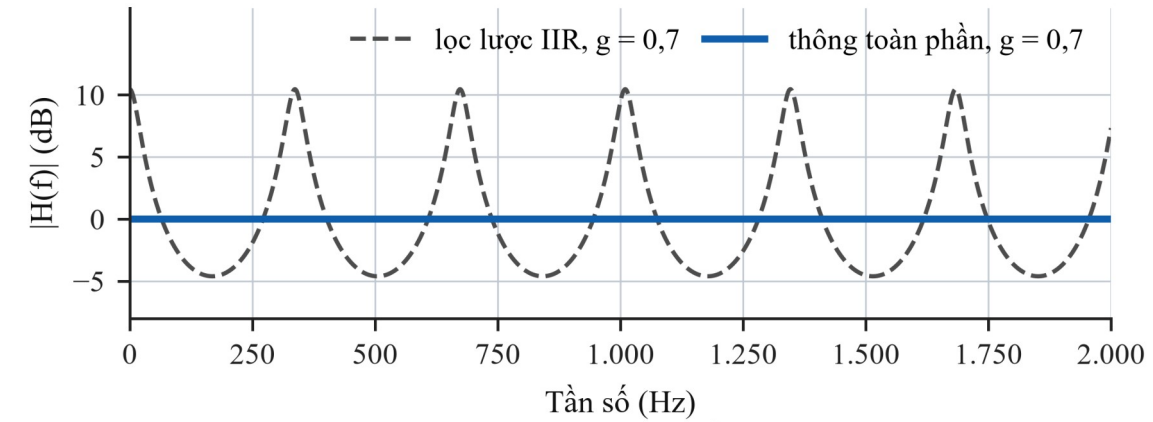
$$y[n] = -g\,x[n] + x[n-D] + g\,y[n-D]\,; \qquad |H(f)| = 1 \;\; \forall f$$

(9.11)

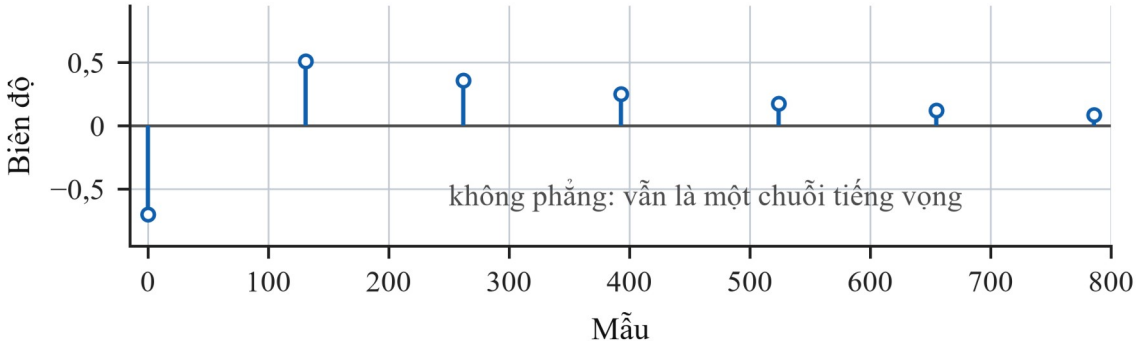
- Không nâng, không hạ, không loại bỏ gì: chỉ đổi pha.
- Là khối lạ nhất của học phần.

Biên độ phẳng, đáp ứng xung thì không

- Phổ phẳng tuyệt đối nhưng đáp ứng xung dài ra.
- Nó tán các tiếng vọng thành nhiều tiếng nhỏ mà không đụng vào phổ.
- Nghe riêng gần như không thấy; đặt sau bốn lọc lược thì đổi hẳn chất lượng.



(a) Đáp ứng biên độ: một đường phẳng, một đường không



(b) Đáp ứng xung của bộ thông toàn phần

Hình 9.24 — Biên độ phẳng tuyệt đối, nhưng đáp ứng xung thì không

Vì sao Schroeder cần đúng khối này

Bốn lọc lược đã tạo đủ rãnh vào phổ; thêm khối có đáp ứng không phẳng sẽ làm phổ lỗ chỗ. Nhưng bốn lọc lược đứng riêng chỉ cho bốn chuỗi vọng đều đặn, nghe lạch cạch. Thông toàn phần giải bài toán này mà không đổi phổ.

Tích phân ngược của Schroeder

$$E(t) = \int_t^{\infty} h^2(\tau)\, d\tau\,; \qquad L(t) = 10 \log_{10} \frac{E(t)}{E(0)}$$

(9.12)

- Đường bao đáp ứng xung gồ ghề, đọc RT60 trực tiếp thì mỗi người ra một số.
- Tích phân ngược bình phương đáp ứng xung làm đường ấy trơn.
- Hệ số 10 chứ không phải 20, vì E là năng lượng.
- Nhầm chỗ này thì mọi RT60 đo được bằng đúng một nửa giá trị thật; lỗi im lặng.

Cách đo T30 theo ISO 3382

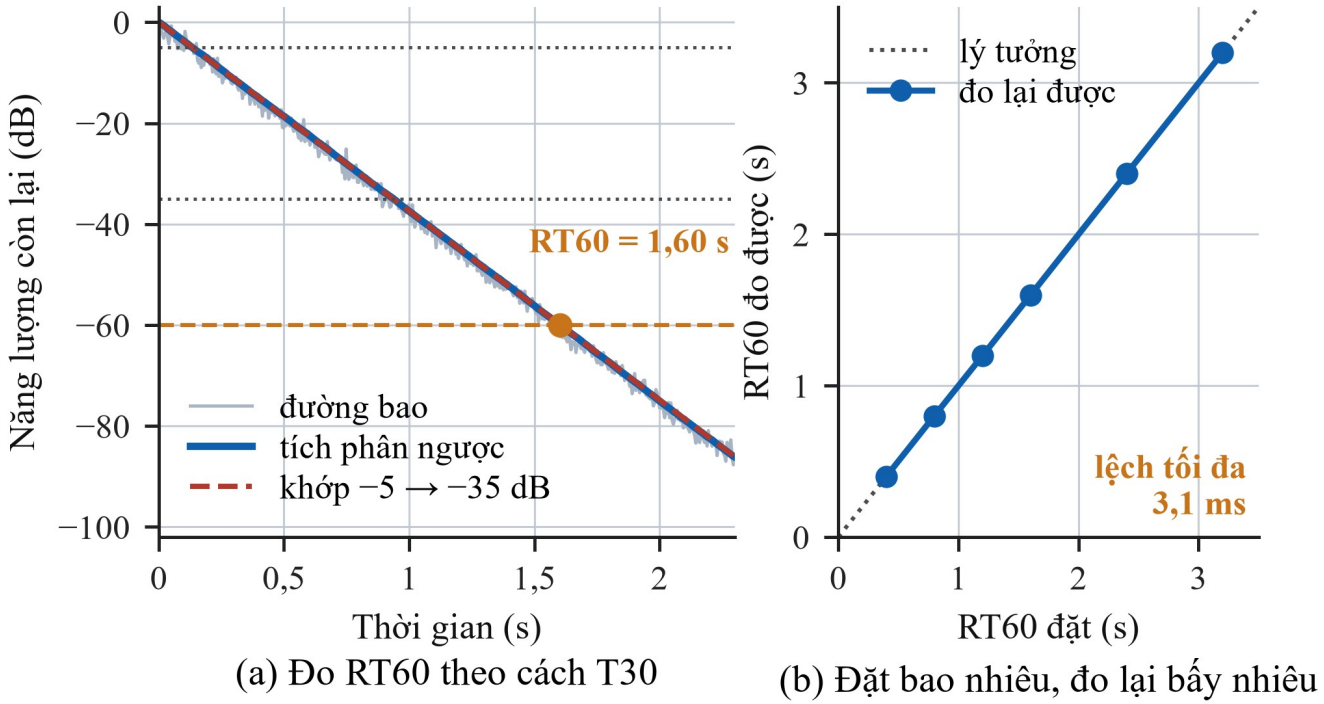
$$\mathrm{RT}_{60} = -\frac{60}{s}, \qquad s = \frac{dL}{dt} \text{ với } L \in [-35,\ -5]\ \mathrm{dB}$$

(9.13)

- ISO 3382 định nghĩa cách đo gọi là T30.
- Lấy đoạn từ −5 tới −35 dB của đường năng lượng, khớp đường thẳng, ngoại suy ra 60 dB.

Đo RT60 theo T30, và phép kiểm đặt–đo

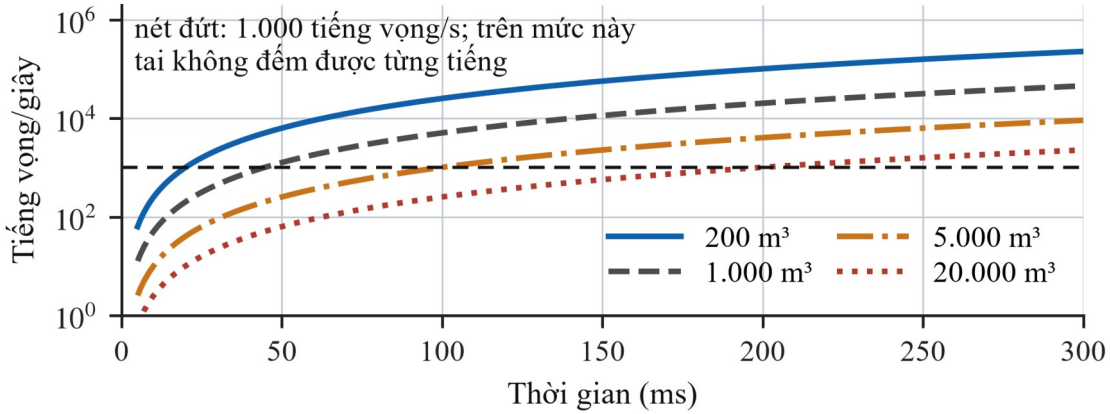
- Phần đuôi dưới −55 dB đã chìm trong nhiễu nền, nên không đo thẳng 60 dB.
- Bỏ 5 dB đầu vì tiếng trực tiếp và phản xạ sớm còn lấn át.
- Đặt RT60 bao nhiêu thì đo lại đúng bấy nhiêu.
- Lệch nhiều nhất 12 ms trên cả sáu điểm.



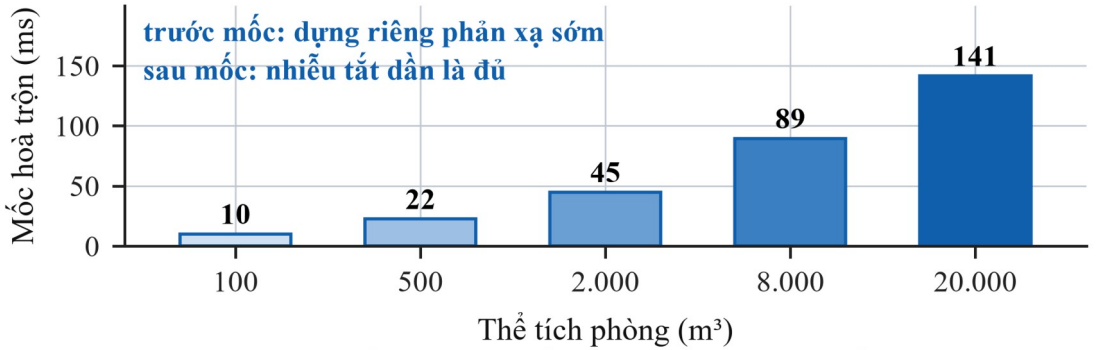
Hình 9.25 — Đo RT60 theo cách T30, và phép kiểm đặt–đo

Mật độ tiếng vọng và mốc hoà trộn

- Mật độ tiếng vọng tăng theo bình phương thời gian.
- Phòng 1.000 m³: chừng 1.300 tiếng vọng mỗi giây tại 50 ms, hơn 20.000 tại 200 ms.
- Mốc hoà trộn xấp xỉ căn bậc hai của thể tích: 32 ms cho phòng 1.000 m³, 141 ms cho nhà hát 20.000 m³.
- Trước mốc phải dựng phản xạ sớm riêng.



(a) Mật độ tiếng vọng tăng theo bình phương thời gian



(b) Mốc hoà trộn xấp xỉ căn bậc hai của thể tích

Hình 9.26 — Mật độ tiếng vọng và mốc hoà trộn theo thể tích phòng

Ba triệu chứng của bộ vang dựng ẩu

- **Lạch cạch trong vài chục ms đầu:** mật độ tiếng vọng quá thấp; thêm bộ thông toàn phần.
- **Có một cao độ ngân lên:** bốn độ trễ không nguyên tố cùng nhau, đỉnh cộng hưởng chồng lên nhau.
- **Chói ở đuôi:** thiếu nghiêng phổ; phòng thật hút cao tần nhanh hơn trầm.
- **Cách chữa triệu chứng chói:** đặt kệ cao âm trong vòng hồi tiếp của mỗi lọc lược.

MỤC 9.8

Tích chập đáp ứng xung

- Lấy đáp ứng xung đo thật trong phòng thật, rồi tích chập với tín hiệu.
- Tích chập thẳng quá đắt; FFT làm cho việc ấy khả thi.
- Tích chập theo khối dùng chồng-cộng, đúng như mục 6.9.
- Vang thuật toán và vang tích chập bổ sung nhau.

Tích chập: thời gian và tần số

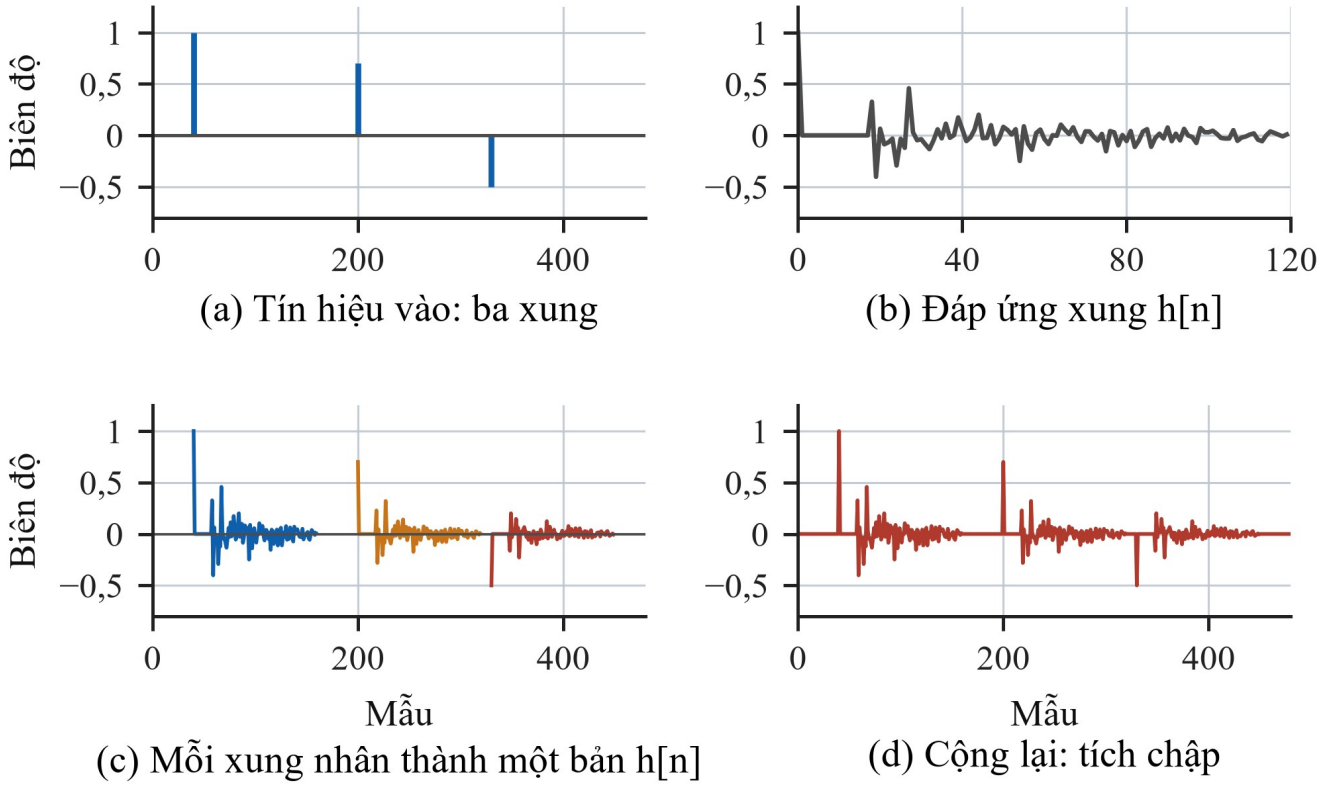
$$y[n] = \sum_{k=0}^{M-1} h[k]\,x[n-k]\,; \qquad Y(f) = H(f)\,X(f)$$

(9.14)

- Vế trái là định nghĩa trong miền thời gian.
- Vế phải là điều làm cho mọi chuyện khả thi.
- Tích chập trong miền thời gian bằng phép nhân trong miền tần số.

Thay mỗi mẫu bằng một bản sao của đáp ứng xung

- Mỗi mẫu của tín hiệu vào được thay bằng một bản sao đáp ứng xung.
- Bản sao nhân với giá trị mẫu ấy, rồi cộng tất cả.
- Hình (a): tín hiệu vào có ba xung nên đếm được ba bản sao.
- Tệp thật có bao nhiêu mẫu là bấy nhiêu bản sao.



Hình 9.27 — Tích chập: thay mỗi mẫu bằng một bản sao của đáp ứng xung

Chi phí tính của hai cách

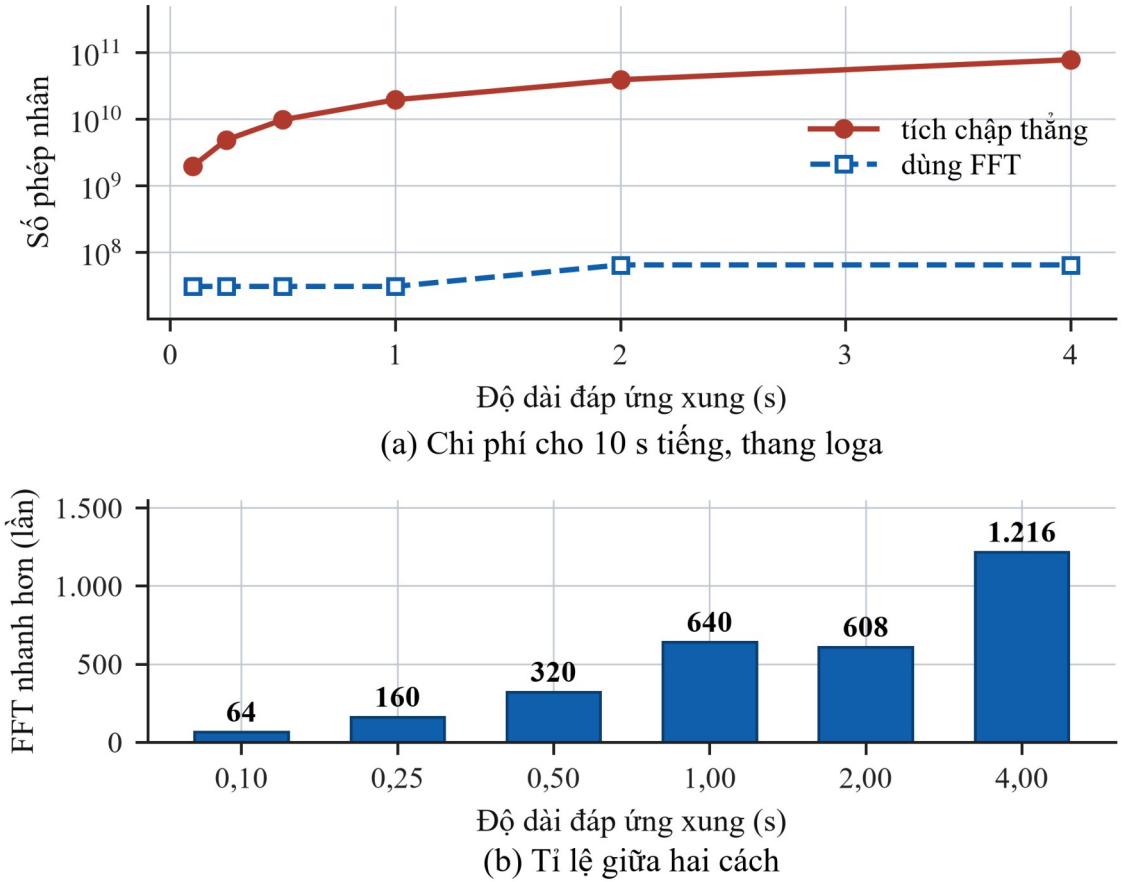
$$\frac{N \cdot M}{3\, N_{\text{fft}} \log_2 N_{\text{fft}} + N_{\text{fft}}}$$

(9.15)

- Tích chập thẳng tốn số phép nhân theo tích hai độ dài.
- Dùng FFT số phép nhân giảm rất mạnh.

Tích chập thẳng so với dùng FFT

- Mười giây tiếng, đáp ứng xung hai giây, 44,1 kHz.
- Cách thẳng: gần bốn mươi tỉ phép nhân; FFT: sáu mươi tư triệu.
- Nhanh hơn hơn sáu trăm lần.
- Với thời gian thực, đó là làm được hay không làm được.



Hình 9.28 — Chi phí tính: tích chập thẳng so với dùng FFT

Tích chập theo khối: chồng-cộng

Tệp dài không thể FFT một lần. Mỗi khối dài L sinh ra L + M − 1 mẫu; phần thừa phải cộng vào khối sau. Bỏ phép cộng ấy thì mã vẫn chạy, chỉ đứt tiếng vang ở mỗi biên khối. Phép kiểm: kết quả trùng tích chập một lần, sai khác dưới một phần nghìn tỉ.

Tích chập chồng-cộng

```
def tich_chap_theo_khoi(x, h, n_khoi=8192):
    M = h.size
    L = n_khoi
    n_fft = 1 << math.ceil(math.log2(L + M - 1))
    H  = np.fft.rfft(h, n_fft)       # tính MỘT lần
    ra = np.zeros(x.size + M - 1)
    for i in range(0, x.size, L):
        khoi = x[i:i + L]
        y = np.fft.irfft(np.fft.rfft(khoi, n_fft) * H, n_fft)
        het = min(i + y.size, ra.size)
        ra[i:het] += y[:het - i]     # CỘNG, không phải gán
    return ra
```

Vang thuật toán và vang tích chập

- Sáu điểm so sánh ở Hình 9.29.
- Hai cách không thay thế nhau.
- Thực tế: vang tích chập cho không gian chung, vang thuật toán cho từng lớp.
- Vang tích chập không chỉnh được RT60.

	VANG THUẬT TOÁN	VANG TÍCH CHẬP
Dựng từ	Bộ lọc lược và thông toàn phần	Một đáp ứng xung đo thật trong phòng
Chỉnh được gì	RT60, trễ đầu, mật độ — từng thứ một	Gần như không — chỉ đổi cả tệp
Chi phí tính	Rất rẻ, vài chục phép nhân mỗi mẫu	Đắt; bắt buộc dùng FFT theo khối
Độ trễ	Gần như bằng không	Ít nhất bằng độ dài một khối
Nghe ra	Có thể rất hay, nhưng là một phòng tưởng tượng	Đúng phòng đã đo, tới từng phản xạ sớm
Hợp với	Nhạc — cần chỉnh cho vừa bản dựng	Phim và trò chơi — cần đúng một không gian có thật

Hai cách không thay thế nhau: vang tích chập cho không gian chung, vang thuật toán cho từng lớp, vì mỗi lớp cần một RT60 riêng.

Hình 9.29 — Vang thuật toán và vang tích chập — sáu điểm so sánh

Chuẩn hoá đáp ứng xung theo năng lượng

Chuẩn hoá theo đỉnh là sai: đỉnh của đáp ứng xung nhà thờ rất nhỏ so với năng lượng, còn đỉnh của phòng nhỏ thì lớn. Cách đúng là chia cho căn của tổng bình phương; khi ấy tổng bình phương bằng đúng 1 và đổi đáp ứng xung không đổi mức chung.

MỤC 9.9

Thực hành, bài tập và tổng kết

- Ba bài thực hành, mỗi bài chừng mười phút, phải nghe chứ không chỉ nhìn số.
- Bảy bài tập có đáp số.
- Bảy câu tự trả lời không có đáp án in.
- Mười ba hàm mới được dùng lại ở các chương sau.

Biquad, chuỗi EQ, bộ vang

- **Bài 1 — biquad:** sinh hệ số lọc đỉnh, vẽ đáp ứng ở bốn lượng nâng; tại fc đúng lượng nâng, xa fc cho 0 dB, cả bốn ổn định.
- **Bài 2 — chuỗi EQ:** dựng chuỗi bốn dải; nhiễu trắng qua chuỗi, đo phổ trước và sau, so với đường thiết kế.
- **Bài 3 — bộ vang:** dựng Schroeder bốn lược, hai thông toàn phần; đo RT60 bằng do_rt60; bỏ hai thông toàn phần rồi nghe lại.

Bảy bài tập: đề và đáp số (1 – 4)

#	Đề bài	Đáp số
1	Ở 48 kHz, tính ω_0 và α cho fc = 1 kHz, Q = 0,7071; rồi năm hệ số kiểu thông dải	ω_0 = 0,1309 rad; α = 0,0923
2	Đổi Q = 2 sang quãng tám; đi ngược: một phần ba quãng tám thì Q bằng bao nhiêu	0,714 quãng tám; Q = 4,319
3	Lọc đỉnh +6 dB tại 1 kHz, Q = 1, nối tiếp kệ cao −3 dB tại 8 kHz; đáp ứng tại 1 kHz và 12 kHz	1 kHz: +6,0 dB; 12 kHz: −2,7 dB
4	Điều chế vòng 440 Hz với sóng mang 60 Hz; hai dải bên ở đâu, vì sao mất cao độ	380 Hz và 500 Hz

Bảy bài tập: đề và đáp số (5 – 7)

#	Đề bài	Đáp số
5	Lọc lược bộ vang có D = 37,1 ms; RT60 đúng 2,2 s thì g bằng bao nhiêu; kiểm ngược	g = 0,890; thay ngược ra 2,20 s
6	Tích chập 5 phút tiếng với đáp ứng xung 3 s ở 48 kHz; so số phép nhân hai cách	Thẳng: 2,07 nghìn tỉ; FFT: 1.225 triệu; nhanh hơn 1.693 lần
7	Suy giảm của nội suy tuyến tính tại 10 kHz với phần lẻ 0; 0,25; 0,5; vì sao flanger nghe đục	0,00 · −1,68 · −2,42 dB

Bốn hướng đi xa hơn

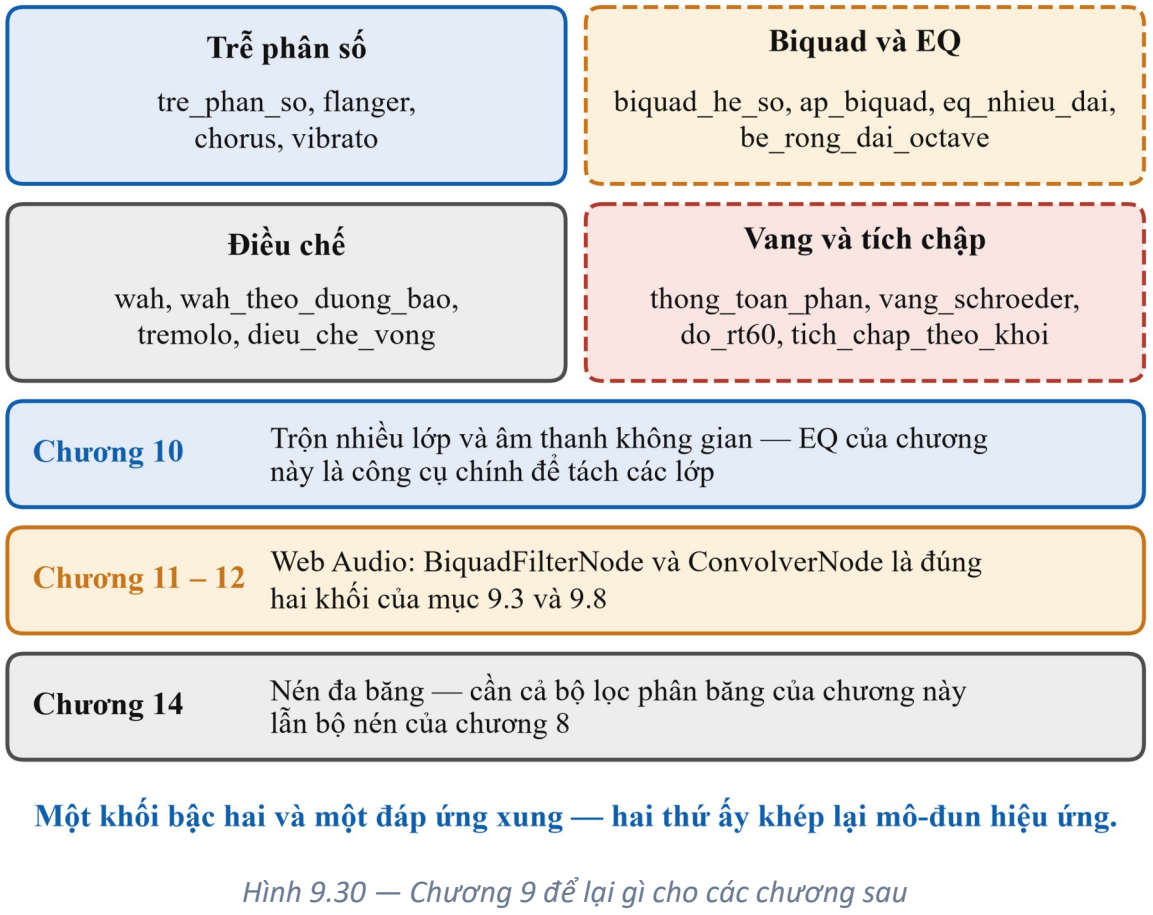
- **EQ động:** lượng nâng đi theo đường bao mức; khối chính của de-esser.
- **Bộ lọc phân băng:** ba dải cộng lại không bằng tín hiệu gốc vì pha; mở đường cho nén đa băng ở chương 14.
- **Nghiêng phổ cho đuôi vang:** kệ cao âm trong vòng hồi tiếp; so RT60 ở dải trầm và dải cao.
- **Đo đáp ứng xung thật:** phát tiếng quét hình sin trong phòng, thu lại, giải chập.

Bảy câu không có đáp án in

- Vì sao nội suy tuyến tính làm flanger đục nhưng không sao với độ trễ cố định?
- Vì sao bậc hai là bậc thấp nhất có cộng hưởng; bậc một thiếu gì?
- Vì sao tại fc kệ chỉ đi nửa lượng nâng còn lọc đỉnh thì đi đủ?
- Vì sao thứ tự dải EQ không quan trọng, còn thứ tự nén rồi giới hạn thì quan trọng?
- Tremolo và điều chế vòng khác nhau ở hai điểm nào; điểm nào làm sóng mang biến mất?
- Vì sao Schroeder dùng thông toàn phần mà không thêm lọc lược?
- Vì sao $10 \cdot \log_{10}$ chứ không phải $20 \cdot \log_{10}$; nhầm thì RT60 sai bao nhiêu?

Chương 9 để lại gì cho các chương sau

- Mười ba hàm mới, liệt kê ở Bảng 9.5.
- Chương 10 dùng EQ để tách lớp và vang để đặt các lớp vào cùng không gian.
- Chuẩn bị cho chương 10: bốn tới sáu tệp WAV tách theo nhạc cụ, tai nghe kín.



Hình 9.30 — Chương 9 để lại gì cho các chương sau

Mười ba hàm mới (rút gọn) và nơi dùng lại

Hàm	Làm gì	Dùng lại ở
tre_phan_so	Trễ số thực, ba kiểu nội suy	Chương 10
biquad_he_so, ap_biquad	Sinh năm hệ số; chạy bộ lọc	Chương 10, 11, 14
eq_nhieu_dai, dap_ung_eq_db	Chuỗi EQ và đáp ứng tổng	Chương 10
wah, wah_theo_duong_bao	Thông dải có tần số chạy	Chương 14
tremolo, dieu_che_vong	Hai phép điều chế biên độ	Chương 11 – 12
thong_toan_phan, vang_schroeder	Biên độ phẳng; bộ vang bốn lược	Chương 10, 14
duong_nang_luong_db, do_rt60	Đo RT60 theo T30	Chương 10
tich_chap_nhanh, tich_chap_theo_khoi	Tích chập bằng FFT	Chương 11 – 12

Các hàm còn lại: dap_ung_biquad_db, cuc_biquad, on_dinh_biquad, flanger, chorus, vibrato, be_rong_dai_octave, q_tu_be_rong, dap_ung_xung_gia_lap, chuan_hoa_dap_ung_xung.

Những điều cần nhớ

1. Chỉ một khối mới: bộ lọc bậc hai; năm mục còn lại là cách dùng nó hoặc ghép nó với khối trễ.
2. Nội suy tuyến tính là bộ lọc thông thấp: mất 2,42 dB tại 10 kHz ở phần lẻ 0,5; nên dùng Lagrange bậc ba.
3. Ba số — tần số, lượng nâng, Q — trả lời ba câu độc lập; cực phải nằm trong đường tròn đơn vị.
4. Decibel cộng lại nên chuỗi EQ rẻ; cắt rộng tay, nâng dè dặt vì cột đỉnh.
5. Tremolo nhân với hệ số không âm; điều chế vòng đổi dấu nên mất sóng mang và cao độ.
6. Bộ vang Schroeder: đặt RT60 bao nhiêu đo lại đúng bấy nhiêu, lệch dưới 12 ms.
7. Tích chập theo khối bằng FFT nhanh hơn hơn 600 lần; phải cộng phần đuôi vào khối sau.