

Butterworth și Linkwitz-Riley

Designul filtrular crossover Linkwitz-Riley reprezintă baza crossoverelor active studio profesionale și sunt rezultatul muncii colaborative a lui Siegfried Linkwitz și Russ Riley. Lucrarea lor din 1976 a introdus o abordare inovatoare a crossoverelor active pentru difuzoarele de tip non-coincident (divers).

Astăzi, ansamblul crossover LR (Linkwitz-Riley) de ordinul 4 este standardul industrii, oferind ieșiri în fază și pante de valori peste 24 dB/octavă. Procesoarele digitale de semnal (DSP-urile moderne) au extins și mai mult acest concept, oferind crossovere LR de ordinul 8 pentru o filtrare și mai abruptă.

Crossoverele perfecte nu există, deoarece asta presupune un singur difuzor care reproduce uniform sunetele între-o gamă de frecvențe fără modificări în fază sau în amplitudine.

În practică se folosesc mai multe difuzoare pe diverse cîte, problema care apare este decalajul temporar și apariția erorilor de fază.

Difuzoarele de tipul non-coincident trebuie aliniate corespunzător pentru a compensa deplasarea sau decalajul în timp.

Orică separare fizică introduce defazaje și erori de lobing în modelul de radiatie acustică, în special în afara planului orizontal pe axă.

Design-ul LR abordează problemele ce apar din cauza fenomenelor de peaking și cancellations (moderite), producând un model de radiatie combinat "perfect", minimizând eroarea de lobing și pozitionând simetric nodurile de anulare făță de planul axei.

• Modelele de radiație acustică și eroarea de lobing

Coca Alin Petru

Eroarea de lobing se referă la inelitaria dependentă de frecvență și la varfurile de amplitudine din modelul de ieșire combinat a două difuzoare deplasate vertical. Crossoverele tradiționale Butterworth și cele de tensiune constantă produc un lobing asimetric, cu axe inegale de vârf și amulare pe măsură ce ascultătorii se deplasează vertical.

Butterworth All-pass \rightarrow prezintă un vârf de 3 dB la 15° sub axă și o amulare la 15° deasupra, cauzând o distribuție inegală a sunetului.

Designul de tensiune constantă: răspuns mai slab, cu un vârf de 6 dB și axe multiple de amulare.

Crossoverul LR produce o ieșire acustică plană și simetrică, fără varfuri, iar modurile de amulare rămân fixe și simetrice în raport cu linia axei.

• Importanța alinierii temporale

O ipoteză fundamentală în teoria crossoverului LR este că difuzoarele sunt aliniate temporal (se adaugă delay), crossoverul LR își pierde avantajul de eroare de lobing 0, care depinde în acest caz de frecvență și degradarea calității generală a sunetului.

Cel mai simplu crossover analogic este format dintr-un rezistor și un condensator, formând fie un filtru trece-sus (low-pass), fie unul trece-sus și prezintă urm. proprietăți:

- Panta de 6 dB/octavă (filtru de ordin 1)
- Pct. de crossover la -3 dB, unde ieșirile se intersectează,
- Sumăre de tensiune constantă și putere constantă.

coca Alin Pătrău

Din punct de vedere al fazei, secțiunea trece-sus are un avans de $+90^\circ$, iar cea care trece-dos o întârziere de -90° rezultând o diferență de fază de 90° între ieșiri la frecvența de crossover. (însumate produc un răspuns plat)

• Diagramale vectoriale și relații de fază

- Reprezintă ~~împreună~~ grafic relațiile de amplitudine și fază ale ieșirilor crossoverului.

- ieșirile sunt deforcate cu 90° pt. filtrele Butterworth (ord. 1)
- vectorii au o lungime de $0,707$ (-3dB)
- vectorul rezultat este egal cu unitatea, cu un defazaj nul.

Pentru ordine superioare, filtrele Butterworth prezintă deforaje crescute și variații de amplitudine, rezultând adesea într-un vârf de 3dB la frecvența crossover din cauză inversarea de fază și a relațiilor dintre lungimile vectorilor, se pot fi evitate prin cascadarea mai multor filtre Butterworth pt. a ajunge la amplitudinile de crossover la -6dB .

• Compararea calităților filterelor Butterworth și Linkwitz-Riley

~~Răspuns~~ Filtrele Butterworth prezintă: răspuns în amplitudine plat în benzile de trecere (passbands); cele de ordin 2 și 4 produc ieșiri deforcate cu 180° la crossover și un vârf de amplitudine de 3dB la inserție; de asemenea, acesta necesită inversare de fază pe una dintre ieșiri pt. a corecta fază, dar tot prezintă probleme de "peaking".

Filtrele Linkwitz-Riley:

- Create prin cascadarea a două filtre Butterworth de același ordin ($2 \times \text{ordim } 2 \Rightarrow 1 \times \text{ordim } 4$)

- Punctul de intersecție este la -6dB (amplitudine 0,5), astfel încât suma lor este exact 1.

- ierarhile sunt perfect în fază pt. toate ordinele pare
(2nd, 4th, 8th order), eliminând necesitatea inversării de
fază și asigurând o sunătoare acustică bună.

Loca
Plin
Batu

- ierarhile sunt în fază la toate frecvențele, nu doar la
punctul de crossover.

- Amplitudinea la punctul de crossover este de -6 dB la ieșire,
însemnându-se la unitate, fără a genera varfuri.

- Acest abordare elimină erorile de lobing și produce o
sunătoare de tensiune constantă.

- Filtrul de ordin superior ($L-R-4, L-R-8$) oferă perete mai
abrupt și regiuni de crossover mai înguste, îmbunătățind
protecția difuzorilor și linieritatea sistemului.

• Întârzierea de grup și răspunsul la tranziții

Filtrile LR nu au fază liniară (defazațiul variază
în funcție de frecvență) - schimbările de fază non-liniare
sunt suficient de lente încât efectele audibile să fie neglijabile
pt. muzică și semnale reale. Întârzierea de grup (group delay)
mai scăzută de frecvență a defazajului:

- Filtrile de ordin 1 prezintă o întârziere de grup constantă

- Filtrile Butterworth și LR de ordin superior prezintă o
creștere a overshoot-ului și a timpului de amortizare (damping
time) în răspunsul la tranziții.

- În ciuda fazelor non-liniare, cerințele ample confirmă
faptul că aceste efecte tranziitorii sunt inapercepute de urechi.

• Implicații practice ale crossoverelor LR-8

Coca Alin Petru

Pantile sunt extrem de abrupte, de 48 dB/octavă ale acestui tip de design. De exemplu, punctele de -1 dB ale crossoverului LR-8 sunt la o distanță de aprox. 0,75 octave, ceea ce însemnă că latimea regimului de crossover LR-4.

→ Difuzoarele trebuie să funcționeze liniar doar pe un interval de frecvență mai restrâns în jurul crossoverului.

→ Există o probabilitate imbinătățită a difuzoarelor și o distorsionă redusă cauzată de frecvențele din afara benzii de lucru (OUT-OF-BAND)

→ Sistemul este mai puțin sensibil la aliniamentul temporal precăldorită suprapunerii liniaște.

→ Complexitatea proiectului crește, răspunsul la tranziții și în putere trebuie să fie bine înțeles pt. a evita artefactele.

• Considerații privind răspunsul în putere

Dacă crossoverele LR produc o sumă de tensiune constantă, răspunsul în putere la frecvențe de crossover nu este constant.

Fiecare difuzor primește jumătate din tensiune și jumătate din curent, astfel rezultă o scădere a puterii combinată de 3dB la crossover, dacă difuzoarele nu introduce un defazaj suplimentar.

• Rezumat al caracteristicilor cheie ale crossoverelor Linkwitz-Riley

- Răspuns în amplitudine plat
- Iezuri în fază la toate frecvențele
- Suma ieziilor difuzoarelor este unitară la frecvența de crossover, fără variații de amplitudine.

- Toate difuzoarele sunt în fază (referitor la legături). Coca
Alin
Petru
- Comportament de fază non-liniar cu întăriere de grup dependentă de frecvență.
- Alinierea temporală a difuzoarelor este esențială pt. a realiza beneficiile complete ale erorii de lobing zero.
- Design-urile LR de ordin superior oferă pante mai abrupte și regiuni de crossover mai înguste, dar necesită o protecție atentă a sistemului.

• Concluzie

Aliniamentul crossoverelor Linkwitz-Riley reprezintă un avans semnificativ în proiectarea crossoverelor pt. boxe, echilibrând liniaritatea amplitudinii, coerenta fazelor și filtrarea abruptă pt. a obține o performanță acustică imbunătățită. Fundația sa matematică elegantă, combinată cu strategii practice de implementare, precum alinierea temporală și filtrarea de tip "state-variable", l-au făcut alegerea preferată pt. sisteme profesionale de sonorizare și sistemele audio high fidelity. Dacă nu este perfect, acesta elimină neajunsurile design-urilor precedente, cum ar fi erorile de lobing și asigurarea unui sunet uniform în diferite poziții de ascultare.

- introducere în retelele de crossover

Coca Alin Petru

Sistemele cu difuzoare utilizate în mod obisnuit mai multe difuzoare, fiecare fiind optimizat pentru o anumită gamă de frecvențe. Pentru a diviza semnalul audio între cele respective difuzoare, se utilizează rețele de crossover. Aceste rețele împart semnalul de intrare în benzi de frecvență direcționate difuzoarelor corespunzătoare.

Există două tipuri:

- Crossoveruri ~~pasive~~: alcătuite din componente passive (și amplificatoare → difuzor)
- Crossoveruri active: alcătuite din componente passive și componente active (C, R, OP-AMP) plasate în lanțul sistemului înainte de amplificatoarele de putere.

Crossoverurile active oferă câteva avantaje, inclusiv un control îmbunătățit al factorului de amortizare (damping), distorsiuni mici, iar fiecare difuzor are propriul său canal de amplificare.

În sistemele practice cu boxe (incinte), difuzoarele sunt separate fizic la o anumită distanță (notată cu d_i) și pot fi decalate în planurile lor de radiație acustică, astfel acesta separare spațială afectează diagramile de radiație și relațiile de forță acustică prin defazaj și modificarea amplitudinii.

Rețelele de crossover ajută la producerea unei diagrame de radiație ~~care~~ independentă de frecvență, minimizând lobing-ul.

- Clasificarea funcțiilor de transfer ale rețelelor crossover.

Aram trei tipuri de funcții de transfer combinate:

$$F_0 = F_H + F_L \quad (\text{trece sus} + \text{trece jos})$$

Rețele de tensiune constantă

- $F_0 = 1$ (amplitudine unitară și difuzaj 0 pt. + frecvență)
- fără distorsiuni sau transienți pt. anumite frecvențe.
- Ex: Crossover Butterworth de ordinul I ($F_H + F_L = 1$)
- Panta este de 6 dB/octavă - limitarea utilizării practică.

Rețele All-Pass:

- $F_0 = e^{j\phi(\omega)}$ (amplitudine unitară, difuzaj independent de frecvență)
- introduce delay sau transienți.
- Ex: Butterworth de ordin 3 cascădate cu quadratură de fază.
- Ofere pante de tăiere mai abrupte, dar un răspuns neliiner.

Alte rețele (de tipul compromis):

- $F_0 = [1 + r(\omega)] e^{j\phi(\omega)}$ (se acceptă o anumită undulație a amplitudinii - ripple - în schimbul unei reduceri distorsiunilor pt. difuză)
- Ex: Crossover Butterworth de ordin 2 cu ripple de 3 dB și diagramă de radiatIE simetrică.

• Rețele de tensiune constantă:

- Prezintă o "îndinare" a diagramei de radiatIE și un val de amplitudine de 6 dB în afara axei din cauză diferențelor de fază, atunci când difuzeurile sunt distanțate și mai mult.

- Lobul principal se deplacează odată cu frecvența, cauzând coloare și o imagine stereo slabă în ~~faza~~ afara axei.

Rețele All-pass:

- Prezintă o îndinare redusă (val de 3dB) și de plusori direcționale mai înguste datorită pantelor mai abrupte (18 dB/octavă), care reduc suprapunerea și interacțiunea dintre difuzeuri.

Rețele de "compromis": oferă o diagramă de radiatIE simetrică și stabilă, iar acesta este singurul dintre cele menționate care menține o axă crestătică independentă de frecvență.

- Criteriile pentru o rețea de crossover optimă
 - Diferența de fază = 0 la frecvența de crossover
 - Amplitudinea fiecărei ieșiri trebuie să fie de -6dB la crossover
 - Diferența de fază constantă pe tot spectrul de frecvențe, fiind măsură ca întâzierile de grup și pantele să fie identice.
- Criteriile menționate sunt îndeplinite prin cascadarea a două filtre Butterworth identice (LR)

- 0 fct. de transfer combinată de tip all-pass.
- defazaj de 360° pe banda de crossover (LR-8)
- Răspuns la transiții (antrenatabilitate)
- Diagramă de radiatie simetrică.

- Crossoverele Linkwitz-Riley ($\text{ord} > 2$) sunt filtre Butterworth cascădate și nu au fază liniară sau o întâiere const. de grup.
- Acestea prezintă comportamentul tranzistorului clasic Butterworth, cu ~~o răspuns~~ dep. un overshoot și un timp de amortizare care crește odată cu ordinul filtrului.

• Audiabilitate:

- În condiții controlate de laborator, unii subiecți pot detecta diferențe pe semnale "non-muzicale" (clicking, square waves)
- În reproducerea practică a sunetului, distorsionarea de întâiere este inaudibilă.

• Compensarea decalajului acustic al difuzoarelor.

- Pentru a menține un model de radiatie stabil atunci când difuzoarele sunt decalate în planul acustic este necesară introducerea unui delay prin utilizarea circuiteelor.

- Difuzorul cu planul acustic mai apropiat este întărit electric pentru a adăuga centrale acustice.

- Întăierea este implementată, de obicei, prin intermediul unor rețele de întâiere all-pass de ordinul I conectate în cascadă.

$$\rightarrow t = \frac{\text{decalaj}}{c}$$

- Rețele de crossover de tensiune constantă. Coca Alin Petru
 - Principiu: Suma funcțiilor de transfer în tensiune trece-fas și trece-sus este egală cu unitatea pt. toate frecvențele.

$$[G_L(s) + G_H(s) = 1]$$

- Rețelele conventionale de ordinul I satisfac în mod inherent transferul de tensiune constantă, dar au panta lini. (6 dB/octava)
- Pentru rețelele de ordin superior, transferul de tensiune constantă poate fi obținut prin partajarea simetrică a polinomului de la numitor și divizarea coresp. a termenilor de la numitor.
- Rețelele simetrice de tensiune constantă (Butterworth cascade pt. ordin 2 și 3):

- Regiuni de suprapunere de aproximativ patru octave, unde ambele difuzeoare contribuie semnificativ.
- Diferențe de fază la crossover (120°) care sunt acceptabile pt. însemnarea difuzoarelor.
- Nărările în banda de trecere trebuie limitate pt. a evita strânsul supra amplificatorului și deteriorarea difuzoarelor
- Linkwitz-Riley: prioritizează modelul de radiatii și lipsa lobing-ului (suma tensiunilor este 1, însă în fază, dar puterea scade cu 3 dB)
- Tensiune constantă: prioritizează suma electrică $V_{\text{in}} = V_{\text{low}} + V_{\text{high}}$ sau o anumită compromisură în fază relativă și în formă sau de suprapunere.

• Implicații practice și recomandări

Oca Alin Petru

Pt. performanțe optime ale difuzoarelor cu drivere necoincidente, se recomandă utilizarea filtrelor active de tip Linkwitz-Riley, realizate prin cascadarea filtrelor Butterworth, de ordin corect.

Driverele trebuie poziționate cat mai aproape posibil și în cauciș pluri acustici alternativ, se poate utiliza delay în circuit pt. compensarea decalajelor.

Driverele trebuie să prezinte răspunsuri în frecvență se presupune pe aproximativ 4 octave și caracteristici similare de amplitudine și fază în zona de crossover, fiind necesară egalizarea în cununite cururi.

Crossover-e active: permit utilizarea canalelor de amplificare independentă, ceea ce conduce la un factor de amortizare redusat și la reducerea distorsiunilor

Auditabilitatea: - Distorsiunile de fază și de întârziere sunt introduse de aceste tipuri de filtre sunt neglijabile din punct de vedere auditiv pt. muzică și material audio vizual.

• Raport - antalorii laborator-măsurători și experimente

Coca Alin
Batu

În cadrul antalorilor de laborator s-au efectuat măsurători acustice pentru realizarea unui experiment practic având ca scop măsurarea caracteristicii - amplitudine frecvență a unei incinte acustice reale și analiza comportamentului acustic în urma implementării unei retete de separare (crossover). Setup-ul experimental a inclus o placă de sunet conectată la un calculator, controlată prin interfață cu un software dedicat de analiză și generare de semnal. Prin intermediul acestui software a fost generat un semnal de test de tip pink noise, utilizat pt. excitarea sistemului pe un interval larg de frecvențe, specific măsurătorilor acustice de tip frequency sweep. Semnalul de la ieșirea placă de sunet a fost direcționat/transmis către o intrare a aceluiși placă, pentru monitorizarea și referințarea semnalului de bază (cu ajutorul unui cablu de transmitere a semnalului audio XLR cu o intrare și două ieșiri), cît și către un aparat bazat pe un procesor digital de semnal (DSP) profesional produs de "dBx" pentru implementarea retetelelor de separare și a filtrării active (crossover). Acest procesor a permis configurarea parametrilor retetei de separare, precum frecvențele de tăiere, tipul și ordinul filtrelor, căstigul, faza, egalizarea, întârzierea, precum și funcții de protecție și limitare ^{compatibil} a semnalului pentru prevenirea supraexcitațiilor asupra amplificatorului și ~~nu~~ pentru protecția difuzoarelor la overdrive. (pt spike-uri ale semnalului de intrare) Aceste setări sunt realizate înainte de testare și injectarea de semnal.

Semnalul procesat de către ~~filter~~ aparatul de gestiune al semnalului (dBx) este dat la intrarea amplificatorului de putere, ale cărui ieșiri ~~sunt~~ alimentează difuzoarele din cadrul incintei acustice (pe 2 căi) realizată în laborator, formată din două difuzoare de grosă frecvență (legate în serie 2x4 ohmi) și un difuzor de înalte(tweeter).

Răspunsul acustic al sistemului a fost captat cu ajutorul unui microfon (tructorul sistemului pt. măsurarea caracteristicii A-f) de măsură poziționat la o distanță controlată față de incintă, conform recomandărilor pentru măsurării corecte în cimp apropiat sau semi-anechoic.

Semnalul ~~acustic~~ electric produs de microfon este analizat în software pentru a determina caracteristica amplitudine - fruvență a incintei, rezultatul arătând că respectiva caracteristica \rightarrow A-f nu coincide/nu este foarte similară cu cea a producătorul (de ex. pt. un difuzor), deoarece respectiva corect. prezintă medieri și neteziri ~~ale~~ ale formei obținute, ~~în~~ ne (cât și camere anechoice spedale pt. măsură), ceea ce \rightarrow permite evaluarea efectelor filtrării active (cu filtre IIR sau Butterworth pe anumite puncte \rightarrow 24 dB/octavă sau 48 dB/octavă pt. a filtrare cât mai precisă), a altierii de fază și a corectărilor aplicate.

Experimentul a evidențiat importanța configurării corecte a rețelei de separare și a procesării digitale cu scopul de a obține un răspuns acustic echilibrat pentru o incintă practică.