

Raport
Butterworth și Linkwitz-Riley

Coca Alin Petru

Designul filtrelor crossover Linkwitz-Riley reprezintă ~~nu~~ baza crossoverelor active audio profesională 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 (drivers).

Astăzi, ansamblul crossover LR (Linkwitz-Riley) de ordinul 4 este standardul industriei, oferind ieșiri în fază și pante de valori precum 24dB/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.

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

În practică se folosesc mai multe difuzoare pe diferite cîi, problema care apare este decalajul temporal și apariția erorilor de fază.

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

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

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

• Modelele de radiație acustică și eroarea de lobing

Eroarea de lobing se referă la înclinarea dependentă de frecvență și la variațiile 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 anulare pe măsură ce ascultătorii se deplasează vertical.

Butterworth All-pass \rightarrow prezintă un vârf de 3 dB la 15° sub axă și o anulare 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 anulare.

Crossoverul LR produce o ieșire acustică plană și simetrică, fără vârfuri, iar nodurile de anulare 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 degradează calitatea generală a sunetului.

Cel mai simplu crossover analogic este format dintr-un rezistor și un condensator, formând fie un filtru trece-jos (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,
- Sumare de tensiune constantă și putere constantă.

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

• Diagramele vectoriale și relații de fază

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

- Ieșirile sunt defazate 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 defazaje crescute și variații de amplitudine, rezultând adesea într-un vârf de 3dB la frecvența crossover din cauza inversării de fază și a relațiilor dintre lungimile vectorilor, ce pot fi evitate prin cascada mai multor filtre Butterworth pt. a ajusta amplitudinile de crossover la -6dB .

• Compararea aliniamentelor filtrelor 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 defazate cu 180° la crossover și un vârf de amplitudine de 3dB la însumare; de asemenea, acesta necesită inversare de fază pe una dintre ieșiri pt. a corecta faza, dar tot prezintă probleme de "peaking".

Filtrele Linkwitz-Riley:

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

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

- ieșirile sunt perfect în fază pt. toate ordinele pare (2nd, 4th, 8th order), eliminând neasimetricitatea inversării de fază și asigurând o sumare acustică bună. Loca
plin
Braz

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

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

- Acest aliniament elimină erorile de lobing și produce o sumare de tensiune constantă.

- Filtrele de ordin superior (LR-4, LR-8) oferă punte mai abruptă și regiuni de crossover mai înguste, îmbunătățind protecția difuzoarelor și liniaritatea sistemului.

• Întârzierea de grup și răspunsul la tranziții

Filtrele LR nu au fază liniară (defazajul 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) măsoară dependența de frecvență a defazajului:

- Filtrele de ordin 1 prezintă o întârziere de grup constantă

- Filtrele 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 fazei non-liniare, cercetările ample confirmă faptul că aceste efecte tranzitorii sunt imperceptibile de urechi.

• Implicații practice ale crossoverelor LR-8

Coca Alin Petru

Pantele 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, cam jumătate din lățimea regiunii de crossover LR-4.

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

→ Există o protecție împotriva a difuzoarelor și o distorsiune redusă cauzată de frecvențele din afara benzii de lucru (OUT-OF-BAND)

→ Sistemul este mai puțin sensibil la aliniamentul temporal precis datorită suprapunerii înguste.

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

• Considerații privind răspunsul în putere

Deși crossoverele LR produc o sumare 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 combinate de 3 dB la crossover, dacă difuzoarele nu introduc un defazaj suplimentar.

• Rezumat al caracteristicilor cheie ale crossoverelor Linkwitz-Riley

- Răspuns în amplitudine plat
- Încălzire în fuză la toate frecvențele
- Suma încalzirilor difuzoarelor este unitară la frecvența de crossover, fără variații de amplitudine.

- Toate difuzoarele sunt în fază (reflector la legături). ^{Coca Alin Petru}
- Comportament de fază non-liniar cu întârziere 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 proiectare atentă a sistemului.

• Concluzii

Aliniamentul crossoverelor Linkwitz-Riley reprezintă un avans semnificativ în proiectarea crossoverelor pt. boxe, echilibrând liniaritatea amplitudinii, coerența fazei și filtrarea abruptă pt. a obține o performanță acustică îmbunătățită. 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. Deși 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 rețele de crossover

Coca Alin Petru

Sistemele cu difuzoare utilizează în mod obișnuit 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:

- Crossovere ~~pasive~~ ^{pasive}: alcătuite din componente pasive (și amplificatoare → difuzor)
- Crossovere active: alcătuite din componente pasive și componente active (C, R, OP-AMP) plasate în lanțul sistemului înainte de amplificarea de putere.

Crossovere 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 (inactive), difuzoarele sunt separate fizic la o anumită distanță (notată cu d_1) și pot fi decalate în planurile lor de radiație acustică, astfel această separare spațială reflectează diagramele de radiație și relațiile de fază acustică prin defazaje și modificarea amplitudinii.

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

• Clasificarea funcțiilor de transfer ale rețelelor crossover.

Avem 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 defazaj 0 pt. \forall frecvențe)
- fără distorsiuni sau tranzienți pt. anumite frecvențe.
- Ex: Crossover Butterworth de ordinul 1 ($F_H + F_L = 1$)
- Panta este de 6 dB/octavă - limitează utilizarea practică.

Rețele All-Pass:

- $F_0 = e^{j\phi(\omega)}$ (amplitudine unitară, defazaj independent de frecvențe)
- introduce delay sau tranzienți.
- Ex: Butterworth de ordin 3 cascade cu cuadratură de fază.
- oferă pante de tăiere mai abrupte, dar un răspuns neliniar.

Alte rețele (de tipul compromise):

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

Rețele de tensiune constantă:

- Prezintă o "îndimare" a diagramei de radiație și un vârf de amplitudine de 6 dB în afara axei din cauza diferențelor de fază, atunci când difuzoarele sunt distanțate fizic și nu numai.
- Lobul principal se deplasează odată cu frecvența, cauzând colorație și o imagine stereo slabă în ~~fata~~ afara axei.

Rețele All-pass:

- Prezintă o îndimare redusă (vârf de 3 dB) și deplasări direcționale mai înguste datorită pantelor mai abrupte (18 dB/octavă), care reduc suprapunerea și interacțiunea dintre difuzoare.

Rețele de "compromise": oferă o diagramă de radiație simetrică și stabilă, iar acesta este singurul dintre cele menționate a menține o axă acustică independentă de frecvență.

• Cerințele 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 necesar ca întârzierile de grup și punctele să fie identice.

Criteriile menționate sunt îndeplinite prin cascada a două filtre Butterworth identice (LR)

- 0 db. de transfer combinată de tip all-pass.
- defazaj de 360° pe banda de crossover (LR-8)
- Răspuns la tranziții (ambinabilitate)
- Diagramă de radiație simetrică.

• Crossoverale Linkwitz-Riley (ordin > 2) sunt filtre Butterworth cascade și nu au fază liniară sau o întârziere const. de grup.

→ Acestea prezintă comportamentul tranzitoriu clasic Butterworth, cu ~~o ușoară~~ un overshoot și un timp de acomodare care crește odată cu ordinul filtrului.

• Audibilitate:

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

• Compensarea decalajului acustic al difuzoarelor.

→ Pentru a menține un model de radiație stabil atunci când difuzoarele sunt decalate în planul acustic este necesară introducerea unui delay prin utilizarea circuitelor.

- Difuzorul cu planul acustic mai apropiat este întârziat electric pentru a alinia centrul acustic.

- Întârzierea este implementată, de obicei, prin intermediul unor rețele de întârziere all-pass de ordinul I conectate în cascada.

→ $t = \frac{\text{decalaj}}{c}$

• Rețele de crossover de tensiune constantă.

Coca Alin Petru

- Principiu: Suma funcțiilor de transfer în tensiune trece-jos și trece-sus este egală cu unitatea pt. toate frecvențele.

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

- Rețelele convenționale de ordinul I satisfac în mod inerent transferul de tensiune constantă, dar au pante line. (6 dB/octavă)

- 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 numărător.

• Rețelele simetrice de tensiune constantă (Butterworth cascade pt. ordin 2 și 3):

- Regiuni de suprapunere de aproximativ patru octave, unde ambele difuzoare contribuie semnificativ.

- Diferențe de fază la crossover (120°) care sunt acceptabile pt. însumarea difuzoarelor.

- Nivourile în banda de trecere trebuie limitate pt. a evita stresul asupra amplificatorului și deteriorarea difuzoarelor

→ Linkwitz - Riley: prioritizează modelul de radiație și lipsa lobing-ului (suma tensiunilor este 1, ieșiri în fază, dar puterea scade cu 3 dB)

→ Tensiune constantă: prioritizează suma electrică $V_{in} = V_{low} + V_{high}$ cu anumite compromisuri în faza relativă și în fatimea zonei de suprapunere.

• Implicații practice și recomandări

Coca Alin Petru

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

Driverii trebuie poziționați cât mai aproape posibil și în același plan acustic alternativ, se poate utiliza delay în circuit pt. compensarea decalajelor.

Driverii trebuie să prezinte răspunsuri în frecvență suprapuse pe aproximativ 4 octave și caracteristici similare de amplitudine și fază în zona de crossover, fiind necesară egalizarea în anumite cazuri.

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

Adizibilitatea: - Distorsiunile de fază și de întârziere ~~se~~ introduse de aceste tipuri de filtre sunt neglijabile din punct de vedere auditiv pt. muzică și material audio uzual.

• Raport - întâlniri laborator - măsurători și experimente

Coca Alin
Petru

În cadrul întâlnirilor de laborator s-au efectuat măsurători acustice pentru realizarea unui experiment practic având ca scop măsurarea caracteristicii - amplitudine frecvență a unei încălzi acustice reale și analiza comportamentului acesteia în urma implementării unei rețele de separare (crossover). Set-up-ul experimental a inclus o placă de sunet conectată la un calculator, controlată printr-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 plăcii de sunet a fost direcționat / transmis atât către o intrare a aceleiași plăci, pentru monitorizarea și referențierea semnalului de bază (cu ajutorul unui cablu de transmitere a semnalului audio XLR cu o intrare și două ieșiri), cât și către un aparat bazat pe un procesor digital de semnal (DSP) profesional produs de "dbx" pentru implementarea rețelelor de separare și a filtrării active (crossover). Acest procesor a permis configurarea parametrilor rețelei de separare, precum frecvențele de tăiere, tipul și ordinul filtrelor, câștigul, faza, egalizarea, întârzierea, precum și funcții de protecție și limitare ^{compresi} a semnalului pentru prevenirea supraîncălzirii asupra amplificatorului și ~~asa~~ pentru protecția difuzoarelor la overdrive. (pt spike-uri ale semnalului de intrare) ~~Setul~~ de setări sunt realizate înainte de testare și injectare de semnal. Semnalul procesat de către ~~filtru~~ ~~over~~ aparatul de gestionare al semnalului (dbx) este dat la intrarea amplificatorului de putere, ale cărui ieșiri ~~se~~ ~~au~~ alimentează difuzoarele din cadrul încălzi acustice (pe 2 căi) realizată în laborator, formată din două difuzoare de joasă frecvență (legate în serie $2 \times 4 \Omega$) și un difuzor de înalte (tweeter).

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

Semnalul ~~activitate~~ electric produs de microfon este analizat în software pentru a determina caracteristica amplitudine-frecvență a încălă, rezultatul arătând că respectiva caracteristică $\rightarrow A-f$ nu coincide/nu este foarte similară cu cea a producătorului (de ex. pt. un difuzor), deoarece respectiva caract. prezintă medieri și neteziri ale ale formei obținute, ~~în~~ nu (cât și camere anechoice speciale pt. măsură), ceea ce \rightarrow permite evaluarea efectelor filtrării active (cu filtre LR sau Butterworth pe anumite puncte $\rightarrow 24\text{ dB/octavă}$ sau 48 dB/octavă pt. ϕ filtrare cât mai precisă), a alinării de fază și a corecțiilor aplicate.

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