

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Méréstechnikai és Információs Rendszerek Tanszék

Bibók Andor

Digitális szűrőtervezés jelfeldolgozó processzoron

Konzulens

Orosz György

BUDAPEST,

Tartalomjegyzék

[Összefoglaló 4](#_Toc356476915)

[Abstract 5](#_Toc356476916)

[1 Bevezető 6](#_Toc356476917)

[2 Digitális szűrők 7](#_Toc356476918)

[2.1 FIR szűrők 7](#_Toc356476919)

[2.1.1 Tervezési eljárások 7](#_Toc356476920)

[2.1.2 Megvalósítás 7](#_Toc356476921)

[2.2 IIR szűrők 8](#_Toc356476922)

[2.2.1 Tervezési eljárások 8](#_Toc356476923)

[2.2.2 Megvalósítás 16](#_Toc356476924)

[3 Fejlesztői környezet 17](#_Toc356476925)

[3.1 ADSP-BF537 EZ-KIT Lite 17](#_Toc356476926)

[3.1.1 ADSP-BF537 Blackfin processzor 17](#_Toc356476927)

[3.2 Visual DSP++ 5.0 17](#_Toc356476928)

[4 A feladat megvalósítása 18](#_Toc356476929)

[4.1 Specifikáció és rendszerterv 18](#_Toc356476930)

[4.2 Szűrőtervezés 18](#_Toc356476931)

[4.3 Vezérlés 18](#_Toc356476932)

[4.4 Kommunikáció 18](#_Toc356476933)

[Irodalomjegyzék 19](#_Toc356476934)

[Függelék 20](#_Toc356476935)

Hallgatói nyilatkozat

Alulírott **Bibók Andor**, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy hitelesített felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Kelt: Budapest,

...…………………………………………….

Bibók Andor

Összefoglaló

Ide jön a ½-1 oldalas magyar nyelvű összefoglaló, melynek szövege a Diplomaterv Portálra külön is feltöltésre kerül.

Abstract

Ide jön a ½-1 oldalas angol nyelvű összefoglaló, amelynek szövege a Diplomaterv Portálra külön is feltöltésre kerül.

# Bevezető

# Digitális szűrők

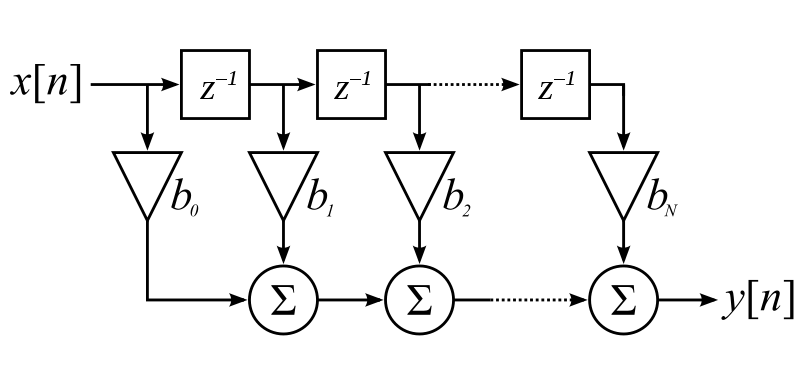
## FIR szűrők

A digitális szűrők egyik nagy osztálya a véges impulzusválaszú (FIR) szűrők. Ahogy a nevük is mutatja, bemenetüket impulzussal gerjesztve, a kimeneten megjelenő válasz véges időn belül nulla lesz. A véges impulzusválaszból következik, hogy egy FIR szűrő mindig stabil. A FIR szűrő válasza az aktuális bemenet, és véges számú előző bemenet súlyozott számtani átlagaként áll elő:

ahol *bi* az i-vel előbbi bemenet súlya, *N* a fokszám, *x[n-i]* az i-vel előbbi bemenet, és *y[n]* az aktuális kimenet.

Impulzus gerjesztés esetén a válasz megegyezik a súlyok sorozatával:

Ennek a transzformáltjaként kapjuk a FIR szűrők általános átviteli függvényét:



‑. ábra. N-ed fokú FIR szűrő

A FIR szűrők egyik nagy előnye, hogy könnyű úgy tervezni őket, hogy lineáris fázismenettel rendelkezzenek, ami különösen fontos, ha a jelet alakhűen kell átvinni. Másik előnyük, hogy gyors konvolúciós eljárásokkal (FFT) könnyen és hatékonyan megvalósíthatóak. A nem rekurzív megvalósításból adódóan egyrészt mindig stabilak, másrészt a megvalósítás módjából származó hibák (pl.: kerekítések) jól kézben tarthatóak.

A FIR szűrőknek előnyeik mellett hátrányaik is vannak. Ezek közül az egyik legjelentősebb, hogy nagy szelektivitás eléréséhez jóval nagyobb fokszám szükséges, mint egy IIR szűrő esetén. Ennek következménye, hogy a késleltetések, és a szűrő együtthatóinak tárolására nagyméretű memóriával kell rendelkezni. Egy FIR szűrő tervezése nagyobb számítástechnikai apparátust igényel, mint egy IIR szűrőé, ráadásul a számítástechnikai igény a fokszámmal arányosan, a lineárisnál gyorsabban növekszik, ugyanakkor bonyolult, általános és optimális amplitúdó karakterisztikák közelítése is lehetséges.

### Tervezési eljárások

FIR szűrők tervezésére számos módszert dolgoztak ki. Az alábbiakban azonban csak két, egymástól lényegesen eltérő megoldás, kerül bemutatásra.

#### Szűrőtervezés ablakozással

Az ablakozásos módszer célja, hogy az ideális szűrő végtelen hosszú impulzusválaszát véges hosszúra csonkolja, egy megfelelően megválasztott függvény segítségével. Ennek fő oka a Gibbs-oszcilláció csökkentése, ami a frekvenciamenetben jelenlévő ugrások miatt jelentkezik. Az ablakozás nem túl hatékony módszer, de mégis gyakran alkalmazzák, mivel tervezése könnyű. A tervezés fő feladata az ablakfüggvény alakjának és hosszának meghatározása. A tervezett szűrő átviteli függvényét az ideális szűrő karakterisztikájának, és az ablakozó függvénynek a konvolúciójából kapjuk. Egy ablakozó függvény annál jobban közelíti az ideális szűrőt, minél keskenyebb a főhulláma, és annál kisebb az ingadozása, minél kisebbek a mellékhullámok. Az alábbiakban néhány ablakozó függvény kerül bemutatásra:

**Háromszög ablak**

Az első mellékhullám elnyomása 26dB.

**Általános Hamming ablak**

Hanning ablakról beszélünk, ha α=β=1. Nevezik még Hann, von Hann, vagy emelt koszinusz ablaknak is. A mellékhullámok lecsengése 18dB/oktáv.

Hamming ablakról beszélünk, ha α=0.54 β=0.46. A Hamming ablak úgy lett optimalizálva, hogy az első mellékhullám minimális legyen.

**Kaiser ablak**

ahol I0 a nulladfokú módosított első fajú Bessel függvény, N a fokszám, és α az ablak formáját megadó paraméter. Nagyobb α mellett szűkül a főhullám, de a mellékhullámok növekszenek, kisebb α mellett ennek a fordítottja igaz. A Kaiser ablak a főhullámban lévő energiasűrűséget próbálja maximalizálni.

#### Szűrőtervezés Remez-algoritmussal

## IIR szűrők

### Tervezési eljárások

A végtelen impulzusválaszú szűrők tervezésének legkézenfekvőbb módszere az analóg szűrők transzformálása. Ennek fő oka, hogy a digitális szűrők megjelenésekor az analóg szűrők tervezési eljárásai már jól kidolgozottak voltak. A tervezés menete a következő: megtervezzük a kívánt karakterisztikájú analóg aluláteresztő referens szűrőt, majd transzformáljuk a kívánt frekvenciára és formára (alul-, felül áteresztő, sáváteresztő, sávzáró), végül a kapott szűrőt diszkretizáljuk. Az így keletkezett digitális szűrő ezután implementálható egy választott megvalósítási struktúrával.

‑. ábra. A szűrőtervezés folyamata

Implementálás

Frekvenciatranszformáció

Paraméterek normalizálása

Digitalizáció

Specifikáció

Transzformált szűrő

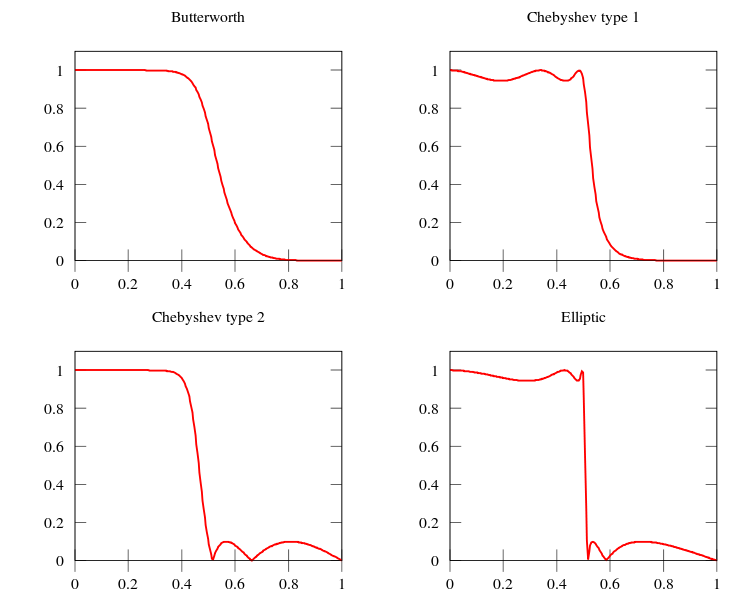
Digitális szűrő

Referens szűrő

Megvalósítás

#### Analóg referens szűrő tervezése

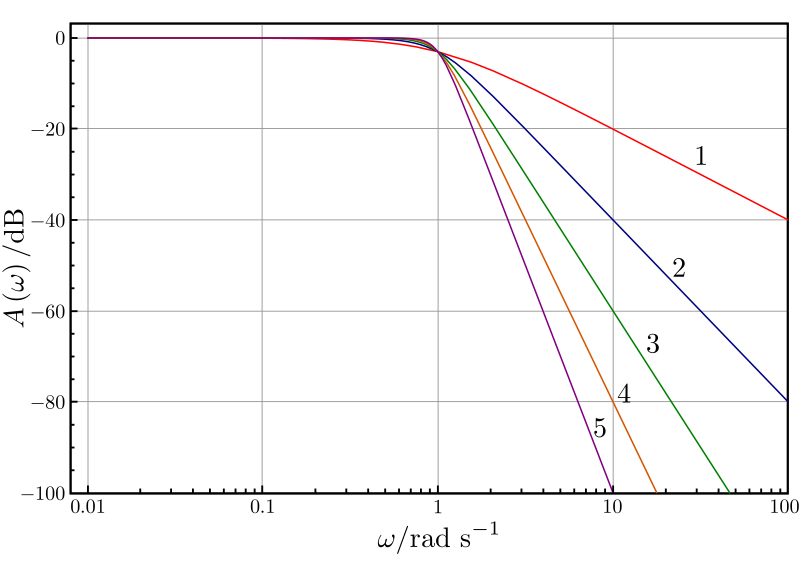
A referens szűrő egy ω = 1 törésponti frekvenciájú analóg aluláteresztő szűrő. Tervezésekor az ideális aluláteresztő szűrőt próbáljuk közelíteni egy adott alakú átviteli karakterisztikával. Az approximáció során megkapjuk a választott karakterisztikának, a megadott specifikációt kielégítő, paramétereit.



‑. ábra. Általánosan elterjedt approximációs típusok

**Butterworth szűrő**

A Butterworth szűrő, másik nevén maximálisan lapos szűrő, úgy közelíti az ideális aluláteresztő szűrőt, hogy az átengedő sávban minél laposabb legyen az átviteli karakterisztika. A maximális laposság előnye, hogy az áteresztő sávba eső frekvenciakomponenseket nagyjából egységnyi erősítéssel viszi át. (Ez a törésponti frekvenciához közeledve leromlik.) Hátránya, hogy a többi approximációs típushoz képest kisebb a szelektivitása.



‑. ábra. Butterworth átviteli karakterisztikák, különböző fokszámok esetén

Átviteli karakterisztikája a következő alakban írható fel:

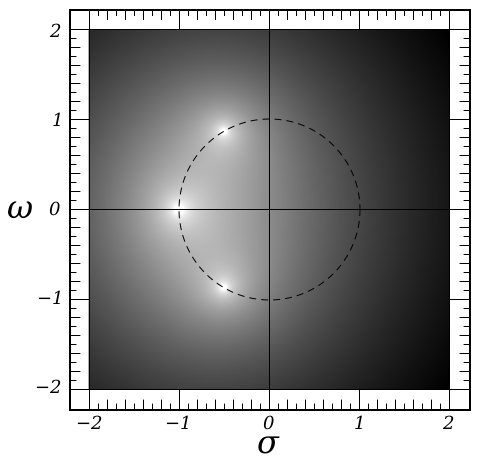
ahol *N* a fokszámot jelöli. Az *ε* értékét a legnagyobb megengedett csillapításból (az áteresztő sáv szélén) kapjuk meg:

Amennyiben a zárósáv paraméterei (záró frekvencia Ωz, minimális csillapítás az) vannak megadva, a szűrő fokszáma a következő módon számítható:

A fokszám, és az *ε* paraméter ismeretében már ki tudjuk számolni az átviteli karakterisztika pólusait. (Zérusai nincsenek.)

ahol:

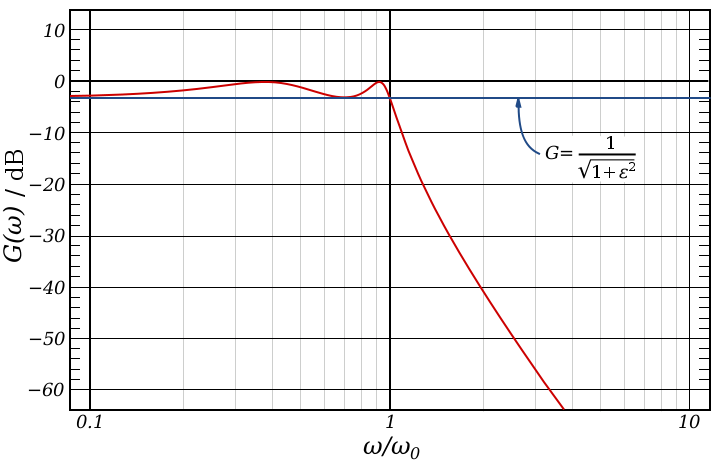
A fentebbi képletek alapján megállapíthatjuk, hogy a gyökök egy *A* sugarú kör bal felén helyezkednek el egymástól egyenletes távolságban.



‑. ábra. Egy harmadfokú Butterworth szűrő pólus-zérus eloszlása (a pólusok fehérrel)

**Csebisev szűrő**

A Csebisev approximáció során, a frekvenciamenet gyorsabb letörésének érdekében az áteresztő sávban feláldozzuk annak maximális laposságát, és megengedünk egy maximális ingadozást. Erre a feladatra kitűnően alkalmasok a Csebisev-polinomok, mivel a [-1,1] tartományban ±1 között egyenletesen ingadoznak, és a végtelenben a végtelenhez tartanak. A Csebisev-polinommal való közelítés következtében az áteresztő tartományban a frekvenciamenet egyenletesen fog ingadozni a specifikációban megadott értékek között, szélsőértékeit a szűrő fokszámával megegyező esetben veszi fel. A törésponti frekvencián megegyezik a maximálisan megengedett hibával, azon túl monoton csökken.



‑. ábra. A Csebisev szűrő amplitúdó karakterisztikája

A szűrő átviteli karakterisztikája:

ahol *N* a szűrő fokszáma, *ε* határozza meg az ingadozást, és *TN(ω)* az N-edrendű Csebisev-polinom:

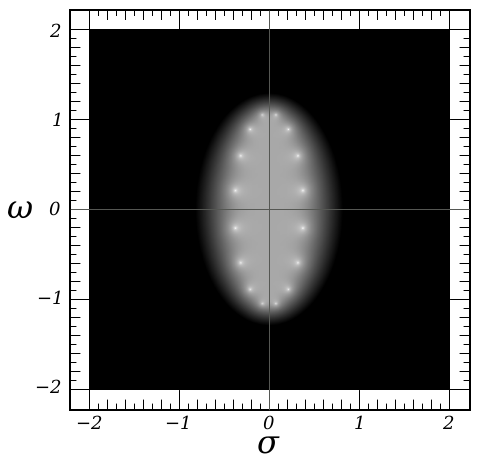
A kívánt maximális ingadozás ismeretében *ε*-t a következő képlettel számíthatjuk ki:

Ha a zárósáv paraméterei (záró frekvencia *Ωz*, minimális elnyomás *az*) vannak megadva, a szűrő fokszáma a következő módon számítható:

A szűrő fokszámának, és az *ε* ismeretében a pólusok:

ahol:

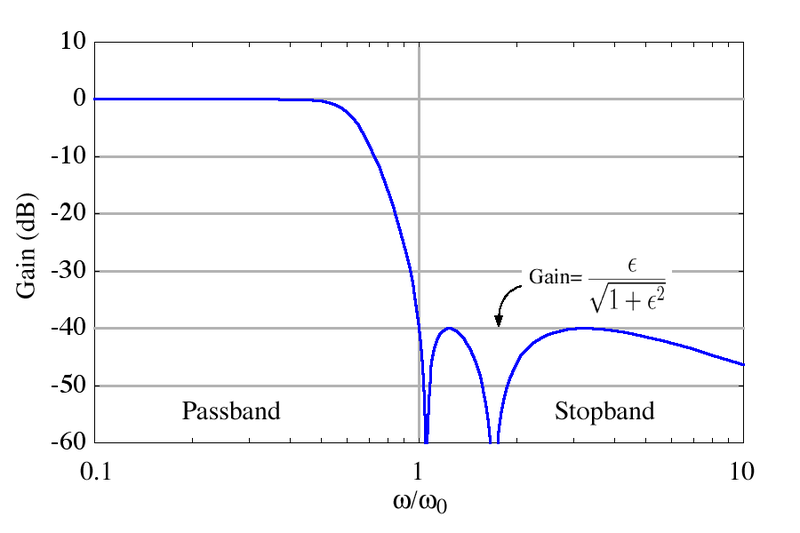
Könnyen belátható, hogy a szűrő pólusai, a komplex számsíkon ábrázolva, egy ellipszis bal ívének mentén helyezkednek el (2‑6. ábra.) A Csebisev szűrő átviteli függvénye, a pólusokkal felírva:



2‑. ábra. Csebisev szűrő pólus-zérus eloszlása

**Inverz Csebisev szűrő**

Az inverz Csebisev szűrő esetén az áteresztő tartományban maximálisan laposan közelítjük az ideális karakterisztikát, míg a záró tartományban megengedjük annak bizonyos ingadozását. A frekvenciamenet monoton csökken az áteresztő tartományban, a záró frekvencián megegyezik a minimális elnyomással, a felett egyenletesen ingadozik a minimális- és a végtelen elnyomás között.



‑. ábra. Inverz Csebisev szűrő frekvenciamenete

A szűrő átviteli karakterisztikája, ha a záró frekvencia egységnyi, és a minimális elnyomást meghatározó tényező az *ε*:

Azonban, ha a referens szűrő általunk használt definícióját kívánjuk alkalmazni, a fentebbi egyenlet bonyolultabb formát ölt:

Az *ε* tényezőt a következőképpen számíthatjuk:

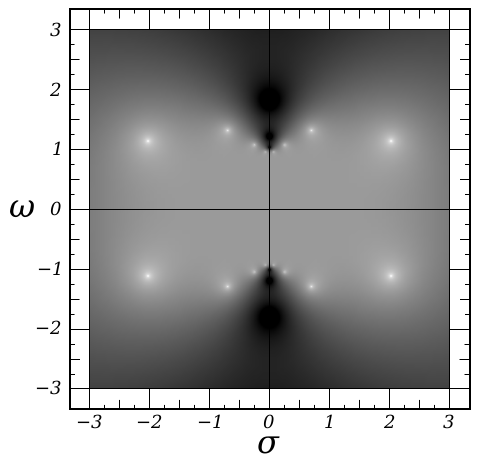
ahol *a0* a törésponti frekvencián, *az* a stop frekvencián mért erősítés.

Amennyiben nem ismerjük a szűrő fokszámát, azt az alábbi képlettel számíthatjuk:

Azonban, mivel *N*-et a következő egészre kerekítettük fel, rögzített *Ωz* esetén *ε* csökkenni fog, aminek következtében az áteresztő vagy a záró tartományban megadott specifikációt túl fogjuk teljesíteni. A lentebb bemutatott pólus-zérus számítási algoritmus a záró tartományban megadott minimális elnyomással számol, így végső soron az áteresztő tartományban lesz kisebb a maximális elnyomás. A pólusok és zérusok kiszámítása a következő módon történik:

ahol:

Az inverz Csebisev szűrő pólusokkal és zérusokkal felírt átviteli függvénye a következő:



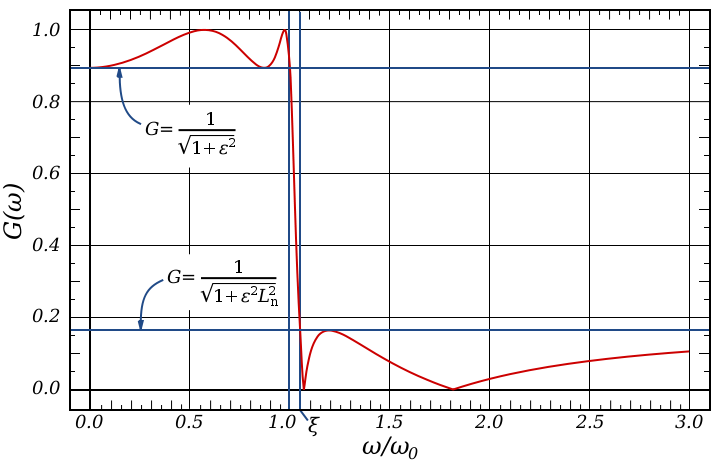
‑. ábra. Inverz Csebisev szűrő pólus-zérus eloszlása

**Elliptikus (Cauer) szűrő**

A Cauer szűrő esetében, a szelektivitás növelésének érdekében, további engedményeket teszünk a karakterisztika lapossága felé. Mind az áteresztő, mind a záró tartományban megengedünk egy bizonyos fokú ingadozást. Az átviteli függvény a következő:

ahol *GN(ω)* a Csebisev-polinom általánosítása, számításához elliptikus integrálokra van szükség. A polinom nem csak *ω* függvénye, így lehetőség van különböző mértékű ingadozás felírására a két tartományban.

Az elliptikus szűrő számítása jóval nehezebb, mint az első három tárgyalt szűrőé, részletezésével nem foglalkozunk.



‑. ábra. Elliptikus szűrő amplitúdó karakterisztikája

#### Transzformálás

A frekvencia-transzformáció két lépésből áll. Miután megkaptuk a referens aluláteresztő szűrőt, azt át kell alakítani a kívánt formájúvá, majd el kell tolni a specifikációban megadott frekvenciára.

**Aluláteresztő**

Aluláteresztő szűrő esetén az első lépés kihagyható. A kívánt karakterisztika az

helyettesítéssel kapható. Ez esetben a pólusok és a zérusok a következőképpen módosulnak:

**Felüláteresztő**

Felüláteresztő szűrő esetén a helyettesítés a következő:

A pólusok és zérusok megváltozása:

Ezen felül pólus esetén bejön egy derivátor, illetve zérus esetén egy integrátor.

**Sáváteresztő**

Sáváteresztő szűrő esetében már bonyolultabb az átalakítás. A behelyettesítés:

ahol ω0 a sávközépi frekvencia, ωd a sávszélesség, és teljesülnek a következők:

Ha elvégezzük a behelyettesítést egy aluláteresztő tagba, akkor az a következőképpen fog alakulni (felüláteresztő tag esetén a reciproka):

A pólusok és zérusok megváltozása itt már bonyolultabban adódik:

**Sávzáró**

Sávzáró transzformációnál a behelyettesítendő a sáváteresztő reciproka:

ω0-ra és ωd-re a sáváteresztőnél megadott feltételek vonatkoznak. A transzformált aluláteresztő tag:

A transzformáció az eredeti egy pólust kettőre bontja szét, és behoz egy tisztán képzetes zéruspárt az ω0 frekvenciára. Az új pólusok a sáváteresztőhöz hasonló módon számíthatóak:

#### Áttérés a diszkrét időtartományba

Impulzus invariáns transzformáció

Illesztett-Z transzformáció

Bilineáris transzformáció

### Megvalósítás

# Fejlesztői környezet

## ADSP-BF537 EZ-KIT Lite

### ADSP-BF537 Blackfin processzor

### ADC és DAC

## Visual DSP++ 5.0

# A feladat megvalósítása

## Specifikáció és rendszerterv

## Szűrőtervezés

## Vezérlés

## Kommunikáció

Irodalomjegyzék

Függelék