

ANTI-ALIASING-SZŰRŐK, feladatai, előnyei és hátrányai

Szerző: Rahne Eric, okl. villamosmérnök
Copyright © PIM Profeszionális Ipari Méréstechnika Kft.

Az Antialiasing-szűrők gyakran ajánlottak modern mérőműszerek tartozékaként. De mi is tulajdonképpen egy Anti-Aliasing-szűrő? Miért és mikor szükséges és mikor nem? Milyen hatása van egy ilyen szűrőnek, milyen előnyei és hátrányai vannak? Ezekre a kérdésekre válaszol a következő cikk, mely a témakör szélessége és sokoldalúsága miatt természetesen nem terjedhet ki mindenre. Am a legszükségesebb információkkal gyakorlati segítséget kíván adni a digitális mérésekkel foglalkozó szakembereknek.

Az Antialiasing-szűrő egy aktív vagy passzív aluláteresztő szűrő, melyet a digitális jelrögzítés esetén közvetlenül az A/D-átalakító előtt helyeznek el azzal a céllal, hogy így az ún. Aliasing-effektust (alulmintavételezésből adódó jelmeghamisítást) csökkentsék ill. kizárják. Az Anti-Aliasing-szűrő gyakorlatilag az analóg jel sávkorlátozását végzi el a jel digitalizálása (a mintavételezés és az amplitúdó-kvantálás) előtt. Az alulmintavételezésből adódó jelmeghamisítás (ún. Aliasing) előfordulásának csökkenésén ill. kizárásán túl a jel/zaj-viszony is javul.

Az elhangzottak alapján azt lehetne hinni, hogy egy Antialiasing-szűrő csupán előnyökkel rendelkezik. Ez viszont nem így van: a sáv szélesség csökkenése megnöveli a felfutási és beállási időt az analóg bemeneten fellépő tranziensek esetén. A gyakorlatban például be kell tartani a híradástechnika modifikált időtörvényét, ami a következőképpen definiálható:

$$\text{bemeneti sáv szélesség} \cdot \text{beállási idő} = 1,2$$

Ezenkívül a magasabb fokú aluláteresztő szűrők típusuktól függően kisebb-nagyobb fázis- és amplitúdóhibát okoznak, ami viszont a mérőcsatorna egészének a pontosságát rontja.

Összegezzük még egyszer röviden:
Egy Anti-Aliasing-szűrő ...

- kizárja az Aliasing-effektust,
- korlátozza a sáv szélességet és javítja a jel/zaj-viszonyt,
- növeli az analóg felfutási és beállási időt,
- csökkenti a mérőcsatorna összpontosságát a fázis- és amplitúdóhiba miatt

Az első szempontnak - az Aliasing-effektusnak - még nem is szenteltünk figyelmet. A következőkben tehát a sávkorlátozó szűrők Antialiasing-szűrőkénti alkalmazásának szükséges-ségéhez vezető okokkal foglalkozunk bővebben.



1-es ábra

Az analóg jel - példaként egy f_{szinus} -frekvenciájú szinuszjel - legyen a $t_n = n \cdot T_{\text{minta}}$ időpontokban mintavételezve. A mintavételezési frekvencia $f_{\text{minta}} = 1 / T_{\text{minta}} \gg f_{\text{szinus}}$ választása esetén a szinuszjel - a mintasorozatból rekonstruálva - jól felismerhető. Az első ábra ezt szemlélteti.

A digitalizált jel felismerhetősége viszont nem mindig garantált. Az analóg jelek digitális rögzítésének legfontosabb feltétele a Shanon-tétel (= mintavételezési törvény) betartása, miszerint a mintavételezési frekvencia (f_{minta}) a jelben található legmagasabb frekvenciájú komponens frekvenciájának ($f_{\text{jel-max}}$) legalább a kétszerese legyen.

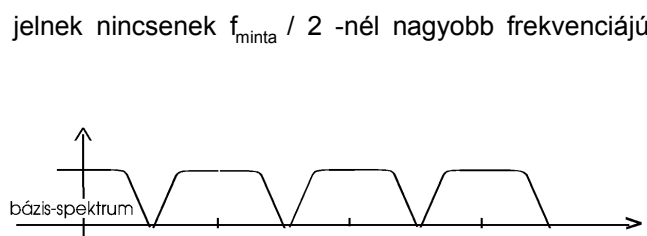
A Shanon-tétel egyenlettel kifejezve: $f_{\text{minta}} \geq 2 \cdot f_{\text{jel-max}}$

E tétel figyelmen kívül hagyásakor az ún. Aliasing-effektusok lépnek fel, ami nem más, mint a jel alulmintavételezéséből adódó jelmeghamisítás: egy a valóságban magas frekvenciájú jel alacsonyabb frekvenciájú jelként jelenik meg a digitalizálás után.

Az Aliasing-effektus oka

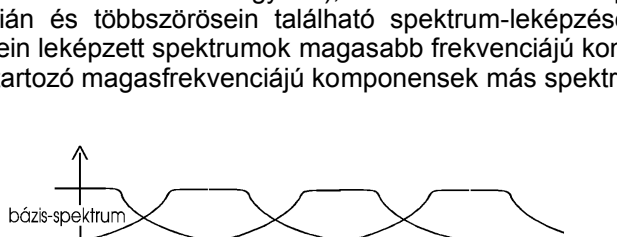
A disztribútor-elmélet és a Fourier-transzformáció tulajdonságai alapján levezethető, hogy egy diszkrét (eredetileg folytonos jelből mintavételezéssel nyert) jel spektrálfüggvénye végtelen ciklikus (periodikus). A frekvenciatartomány (az A/D-átalakítás előtti analóg komponensek együttes sáv szélessége) leképezése nemcsak szimmetrikusan az $f = 0\text{Hz}$ -es frekvencia körül - az ún. bázis-spektrumként, hanem tükörszimmetrikusan a mintavételezési frekvencia és harmonikusai (többszörösei) körül is történik.

Abban az esetben, amikor a folytonos jelnek nincsenek $f_{\text{minta}} / 2$ -nél nagyobb frekvenciájú komponensei, a 2-es ábrán szemléltetett spektrálfüggvény alakul ki.



2-es ábra

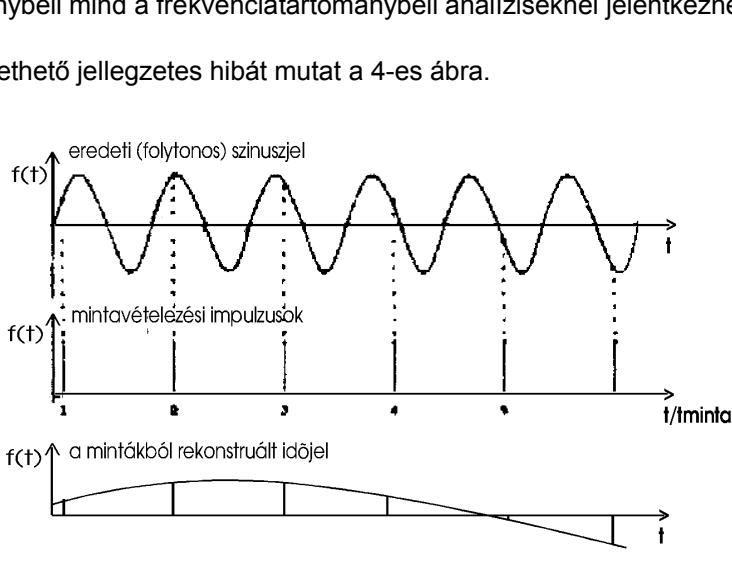
Ha viszont az említett $f_{\text{minta}} / 2$ -nél magasabb frekvenciájú komponensek is szerepeltek a mintavételezett folytonos jelben (vagy maga a jel alulfrekvenciája a mintavételezési frekvencia kétszeresénél nagyobb), a 3-as ábrán látható spektrálfüggvény alakul ki. Jól láthatók a bázis-spektrum és a mintavételezési frekvencián és többszörösein levő spektrum-leképezések magasabb frekvenciájú komponensei is, ha a leképezésük a mintavételezési frekvencián ill. többszörösein leképzett spektrumok magasabb frekvenciájú komponenseinek leképezése a bázis-spektrumban történik ill. az ehhez a bázis-spektrumhoz tartozó magasfrekvenciájú komponensek más spektrum-leképezésekbe is átkerülnek.



3-as ábra

A digitális jelrögzítés eredménye - a digitalizált diszkrét jel minták sorozata - nem más, mint a bázis-spektrum információtartalma. Ebből kifolyólag a jel rekonstruálásánál (grafikus megjelenítésénél, matematikai kiértékelésénél, frekvenciatartománybeli analízisének) szerepet játszanak a mintavételezési frekvencián és többszörösein levő spektrum-leképezések magasabb frekvenciájú komponensei is, ha a leképezésük a bázis-frekvenciasávba esik. Más szavakkal: Az $f_{\text{minta}} / 2$ -nél magasabb frekvenciájú jelkomponensek leképezése alacsonyabb frekvenciájú komponensek frekvenciatartománybeli helyein történik és emiatt a jelrekonstrukciónál nemlétező alacsonyfrekvenciás jelkomponensek jelennek meg. Ezt a jelmeghamisítási problémát Aliasing-effektus-nak hívják és az ebből adódó hibák a digitális jelrögzítés után már nem korrigálhatók és mind az időtartománybeli mind a frekvenciatartománybeli analíziseknél jelentkeznek.

Egy Aliasing-problémákra visszavezethető jellegzetes hibát mutat a 4-es ábra.



4-es ábra

Az említett hibák kiküszöbölése érdekében a következő megoldások lehetségesek:

- aluláteresztő szűrővel a frekvenciasáv korlátozása a mintavételezés előtt
- $f_{\text{max}} \leq f_{\text{minta}} / 2$ -re (Anti-Aliasing-szűrő alkalmazása)
- olyan érzékelő alkalmazása, melynek határfrekvenciája $f_{\text{max}} \leq f_{\text{minta}} / 2$

Az Anti-Aliasing-szűrő alkalmazásával elérhető frekvenciasáv-korlátozás egyben a jel/zaj-viszony javulását is eredményezi, mivel magasabb frekvenciájú zavarok nem kerülnek digitalizálásra.

Az Aliasing-effektus elleni szűrő típusának kiválasztása

A szűrők különféle típusainak jellegzetes átviteli függvényük van, ami leírja, hogy a bemenő jelhez képest milyen lesz a szűrt jel. Ez az átviteli karakterisztika a frekvencia függvényében a szűrő amplitúdómenetére és fázismenetére bontható fel.

Mivel mindegyik időjel leírható az amplitúdóspektrumával és a fázisszög-spektrumával, kiszámolhatjuk a szűrőkimeneten megjelenő jelet: az eredő időjel az eredeti időjel amplitúdóértékeinek a szűrő amplitúdómenetével való szorzásából, az eredő időjel fázisszögeket az időjel-fázisszögeknek a szűrő fázismenetében leírt fázisszög-eltolással való összeadásából nyerjük. Természetesen a szűrővel megváltoztatott amplitúdó- és fázisspektrum az általuk leírt időjel változását is jelenti.

Érdeklünk, hogy az időjel (az $f_{\text{minta}} / 2$ -nél magasabb frekvenciájú jelkomponensek csillapításán kívül) minél kisebb mértékben változzon. Ennek megfelelően olyan aluláteresztő szűrőre van szükségünk, mely a legkisebb mértékű jeltorzításokat okozza.

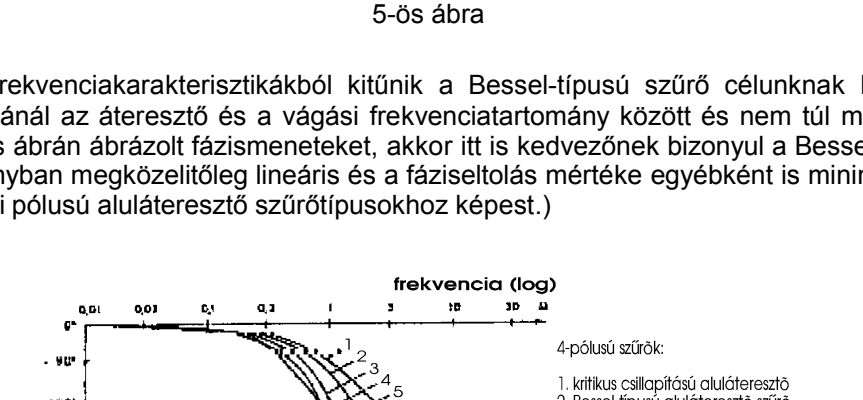
Aluláteresztő szűrőknél érvényes, hogy a jeltorzítás mértéke annál nagyobb:

- minél meredekebb a szűrő vágási tartománya,
- minél élesebb a szűrő áteresztő tartománya és a vágási tartománya közötti átmenet,
- minél nagyobb a szűrő amplitúdó-frekvenciamenet hullámzása és
- minél erősebb és több nemlinearitás van a szűrő fázismenetében.



5-ös ábra

Az 5-ös ábrán látható szűrő-frekvenciakarakteristikákból kitétni a Bessel-típusú szűrő célunknak kedvező amplitúdómenete: lapos átmenet a -3dB-es határfrekvenciánál az áteresztő és a vágási frekvenciatartomány között és nem túl meredek frekvenciamenet a vágási tartományban. Átérezzük még a 6-os ábrán ábrázolt fázismeneteket, akkor itt is kedvezőnek bizonyul a Bessel-típusú aluláteresztő szűrő, mivel fázismenete az áteresztő tartományban megközelítőleg lineáris és a fáziseltolás mértéke egyébként is minimális. (A jelugrások esetén fellépő túllövés is kisebb más, ugyanennyi pólusú aluláteresztő szűrőtípusokhoz képest.)



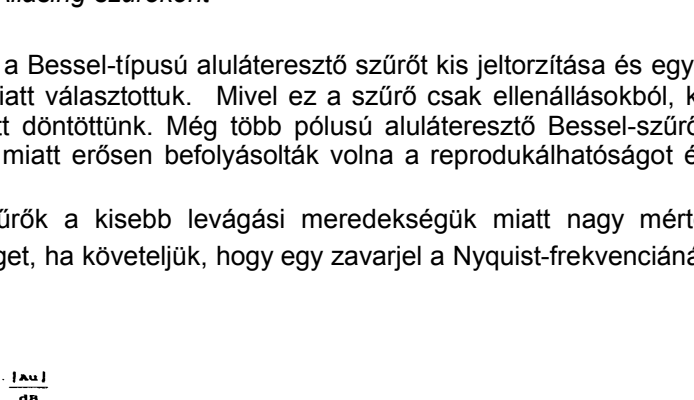
6-os ábra

A Bessel-típusú aluláteresztő szűrő egyetlen hátránya, hogy a lapos -3dB-es átmenet miatt a szűrő vágási meredeksége (és ezzel együtt a csillapítási hatása) csak magasabb frekvenciánál érvényesül teljes mértékben. Ez viszont inkább elfogadható mint a nagyobb mértékű jeltorzítás, mivel elsődleges célunk az **eredeti időjel megtartása** mellett az Aliasing-effektus csökkentése.

A Bessel-típusú szűrő alkalmazása Anti-Aliasing-szűrőként

Készülékeink opcionális tartozékaként a Bessel-típusú aluláteresztő szűrőt is szűrőként alkalmazhatjuk, amely a Bessel-típusú aluláteresztő szűrővel szemben az Anti-Aliasing-szűrőkénti alkalmazás érdekében a -3dB-es határfrekvenciánál az áteresztő és a vágási frekvenciatartomány között és nem túl meredek frekvenciamenet a vágási tartományban. Átérezzük még a 8-pólusú szűrő mellett döntöttünk. Még több pólusú aluláteresztő Bessel-szűrők még több aktív és passzív alkatrészt kívántak volna meg, amelyek szórásuk miatt erősen befolyásolták volna a reprodukálhatóságot és a hosszúidejű stabilitást. (Ez egyszerű hibaszámításokkal bizonyítható.)

Ezzel szemben túl alacsonyfokú szűrők a kisebb levágási meredekségük miatt nagy mértékben lecsökkentik a végeredményként rendelkezésünkre álló bázissáv szélességet, ha követeljük, hogy egy zavarjel a Nyquist-frekvenciánál ($f_{\text{Nyq}} = f_{\text{minta}} / 2$) legalább -66dB = 1/2048 mértékben csillapítva legyen.



7-es ábra

A 7-es ábra az n-pólusú Bessel-szűrő -3dB-es határfrekvenciájának (f_g) és a mintavételezési frekvencia közötti összefüggést mutatja, ha a Nyquist-frekvenciánál -66dB-es csillapítást szeretnénk elérni. Egy n-pólusú Bessel-szűrőnek a vágási meredeksége egyébként $-n \cdot 20\text{dB} / \text{dekad}$ ill. $-n \cdot 6\text{dB} / \text{oktáv}$.

Egy 8-pólusú Bessel-típusú szűrő $f_g = f_{\text{minta}} / 10$ határfrekvenciával a Nyquist-frekvenciánál ($f_{\text{Nyq}} = f_{\text{minta}} / 2$) -66dB-es csillapítással rendelkezhet. A szűrő beállási ideje $t_{\text{set}} = 12 / f_{\text{minta}}$. Minimális - legalább -80dB-es - csillapítások a maximálisan lehetséges csatorna-erősítéssel a szűrő frekvenciájánál történő alkalmazás esetén lehetségesek. A kisebb pólusszámú szűrők a rendelkezésre álló frekvenciasáv túlzott szűkítését eredményeznék, nagyobb pólusszámú szűrők a fentiekben említett okok miatt nem kedvezőek. A 8-pólusú Bessel-típusú szűrő ennek alapján az optimális kompromisszum a gazdaságosság és a működés között.

| pólusszám | -3dB-es határfrekvencia |
|-----------|---------------------------|
| 2 | $f_{\text{minta}} / 120$ |
| 3 | $f_{\text{minta}} / 37$ |
| 4 | $f_{\text{minta}} / 20,8$ |
| 5 | $f_{\text{minta}} / 15$ |
| 6 | $f_{\text{minta}} / 12,2$ |
| 7 | $f_{\text{minta}} / 10,8$ |
| 8 | $f_{\text{minta}} / 10$ |