

Kapcsolt kapacitású szűrők kaszkád szintézise optimalizálással

HALÁSZ EDIT, GEFFERTH LÁSZLÓ
BME Híradástechnikai Elektronika Intézet
HADI ENDRE
MMG Automatika Művek



ÖSSZEFOGLALÁS

Kapcsolt kapacitások tartalmazó másodfokú alaptagok kaszkád szintézisének számítógépes módszerét ismertetjük. A módszer lényeges újdonsága, hogy a tervezés az amplitúdó és futási idő egyidejű specifikálása esetén is elvégezhető. A cikkben közölt approximációs módszer analóg és diszkrét idejű áramkörökre egyaránt alkalmazható. Az elkészült program a *Fleischer—Laker* alaptagokból építkezik. A cikkben egy tolerancia központosítási módszert is ismertetünk. A tervezést mintapéldával illusztráljuk.

1. Bevezetés

Kapacitásokat, kapcsolókat és műveleti erősítőket tartalmazó SC (Switched Capacitor) alaptagokból felépülő kaszkád áramkör [1] a MOS-technológia sikeres terméke. A kaszkád SC-áramkör tervezésekor is gyakori az amplitúdó és a futási idő egyidejű specifikálása. Az irodalomban található tervező módszerek vagy amplitúdó vagy futási idő formáló SC-kaszkád szintézisre vonatkoznak. A továbbiakban egy módszert mutatunk be az amplitúdó és futási idő együttes approximálására. A feladatot nemlineáris optimalizálással oldottuk meg.

Sok szerző publikált általános illetve speciális célú másodfokú diszkrét működésű SC alaptagokat. Ezek megegyeznek abban, hogy feszültségtranszfer függvényük az alábbi:

$$K(z) = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = \frac{\gamma + ez^{-1} + \delta z^{-2}}{1 + \alpha z^{-1} + \beta z^{-2}} \quad (1)$$

ahol $z = e^{sT}$ és T a kapcsolók periódus ideje, míg $\alpha, \beta, \gamma, \delta, e$ valós együtthatók valamint

$$s = a + j\omega \quad (2)$$

a komplex frekvencia. Az s komplex frekvencia és a z tér között stabil leképezést ad a bilineáris transzformáció:

$$p = \frac{2}{T} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}, \text{ ahol} \quad (3)$$

$$p = \Sigma + j\Omega \quad (4)$$

Mind s , mind p komplex frekvencia, azonban egymástól különböző tartalmúak. Tekintsük csak a képzetes részeket. A diszkrét idejű SC-áramkör tényleges működési frekvenciája: ω , míg Ω ezen diszkrét működésű áramkörhöz rendelt fiktív folytonos idejű „áramkör” frekvenciája. A (2), (3) és (4) összefüggések felhasználásával nyerjük a kapcsolatot az ω és Ω között:

Béérkezett: 1986. V. 5. (H)

DR. HALÁSZ
EDIT

A Budapesti Műszaki Egyetemen szerzett villamosmérnöki oklevelet. Majd a Villamosmérnöki Kar Vezetékes Híradástechnika Tanszékén, utóbb annak jogutódjánál, a Híradástechnikai

Elektronika Intézetben egyetemi docensként dolgozik. Fő érdeklődési területe a számítógépes iteratív szintézis és a távközlés. Részt vett számos ipari kutatómunkában. Egyetemi doktori értekezését 1972-ben, kandidátusi értekezését 1983-ban védte meg.

$$\Omega = \frac{2}{T} \operatorname{tg} \frac{\omega T}{2} \quad (5)$$

A bilineáris transzformáció (3) egyik előnye, hogy a p -ben másodfokú folytonos idejű áramkör transzfer függvényét z -ben másodfokú (1) alakú kifejezéssé transzformálja. Így az SC-kaszkád szintézisnél felhasználhatjuk az aktív RC-szintézis és a hagyományos approximáció eredményeit. Az analóg — folytonos idejű — másodfokú alaptagok transzfer függvénye:

$$K(p) = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = \frac{cp^2 + ep + d}{p^2 + ap + b} \quad (6)$$

ahol a, b, c, d, e valós értékű együtthatók és köztük, valamint az (1)-ben szereplő $\alpha, \beta, \gamma, b, e$ és T -mennyiségek közt a (3) összefüggés segítségével egyértelmű megfeleltetés van. $K(p)$ helyett minket az amplitúdó és futási idő karakterisztika [(7), ill. (8) összefüggés] érdekel

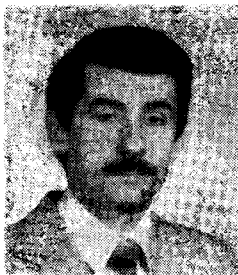
$$|K(j\Omega)|^{dB} = 10 \lg \frac{(d - c\Omega^2)^2 + e^2\Omega^2}{(b - \Omega^2)^2 + a^2\Omega^2} \quad (7)$$

$$\tau(j\Omega) = m \frac{a}{b} \frac{1 + \frac{\Omega^2}{b}}{1 + \left(\frac{a^2}{b} - 2\right) \frac{\Omega^2}{b} + \frac{\Omega^4}{b^2}} \quad (8)$$

ahol $m=2$ mindentátesztő alaptagnál és $m=1$ aluláteresztő, feluláteresztő, sáváteresztő és elliptikus szűrő alaptagnál.

2. Optimalizálás

Az optimalizálás célja a $K(p)$ [(6) kifejezés] együtthatóinak meghatározása a kaszkád áramkör minden tagjára oly módon, hogy ezen együtthatókkal a specifikáció teljesüljön. Az együtthatók és kapcsolók periódusidejének (T) ismeretében az eredő $K(z)$ transzferfüggvény (1) meghatározható. Az eredő $K(z)$ a teljes kaszkád áramkör feszültség transzfer függvénye.



DB. GEFFERTH
LÁSZLÓ

1968-ban szerezte meg vilamosmérnöki oklevelét a Budapesti Műszaki Egyetemen, majd ugyanitt lett dr. teehn. 1977-ben, 1969 óta a Budapesti Műszaki Egyetemen dolgozik, a Híradástechnikai

A specifikáció az ω tartományban van megadva: Legyen a feszültségátvitel abszolút értékére vonatkozó specifikáció ω_i frekvencián: $A_{\min}^{dB}(\omega_i)$ ill.

$A_{\max}^{dB}(\omega_i)$ — akkor az eredő $|K(z=e^{j\omega_i T})|^{dB}$ -nek

ezen értékek közé kell esnie, továbbá az eredő hálózat futási idejének $\tau(\omega_i)$ -nek $T \pm \Delta\tau$ pontossággal meg kell közelíteni $\tau_{el\text{írt}}(\omega_i)$ értéket minden $i=1,2,\dots$ -re. A futási idő szintje változhat — egy előírt felső határig.

Az iteratív szintézist az Ω tartományban végezzük. Ennek feltétele, hogy a ω_i értékeket az (5)-nek megfelelően módosítani — előtorzítani — kell. A módosított frekvencián Ω_i -n az abszolút érték típusú mennyiségek értéke változatlan:

$$|K(j\Omega_i)| = |K(j\omega_i)|$$

Megjegyezzük, hogy futási idő jellegű mennyiségeknél nem elegendő csupán a frekvenciát transzformálni, a futási idő értéke is változik az alábbi módon:

$$\tau(\Omega_i) = \tau(\omega_i) \cdot (1 + \Omega_i^2)$$

Így például az ω tartományban állandó értékű futási idő az Ω tartományban nem lesz konstans.

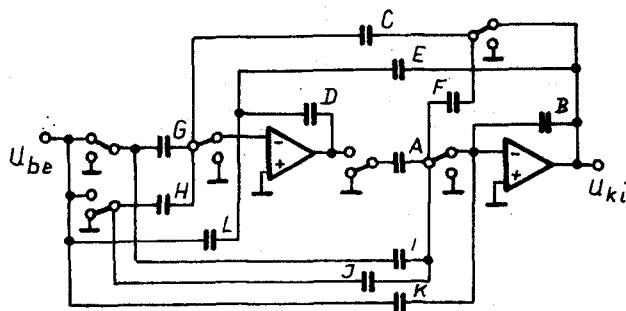
Az optimalizálás célfüggvénye egy összetett célfüggvény: súlyozott összege a feszültségtranszfer függvény abszolút értékére vonatkozó min-max hibafüggvénynek és az eredő $\tau(\Omega_i)$ valamint $\tau_{el\text{írt}}(\omega_i) \cdot (1 + \Omega_i^2)$ mennyiségektől számított négyzetes hibafüggvénynek. Optimalizáló algoritmusként Jacobson—Oksman [2] módszerét választottuk.

3. A másodfokú alaptag

Az optimalizálás eredményeül a másodfokú alaptagok transzfer függvényeinek [(6) ill. (1) alakú kifejezések] együtthatóit nyerjük. Ezek ismeretében meghatározható az irodalomban közölt bármely másodfokú alaptag áramkörti elemeinek értéke.

A másodfokú alaptagok közül a gyakorlatban leginkább a Fleischer—Laker szerzőpár által ki-

Elektronika Intézet adjunktusa. Kutatási szakterülete a számítógépes tervezés, ezen belül az elektronikus áramkörök gyártási selejt csökkentésének algoritmikus módszereivel foglalkozik: hibalokalizálással és tolerancia-központosítással. 1979—80 telét Londonban az Imperial Collegeban töltötte, ahol tolerancia-központosítással foglalkozott. 1977-ben a hibalokalizálásról, 1982-ben a tolerancia-központosításról írt cikkéért Polák—Virágh díjat kapott. 1984—85-ben Humboldt ösztöndíjasként az NSZK-ban, Bochumban hibakorlátozással és hullámdigítális szűrők diszkrét optimalizálásával foglalkozott.



H208-1

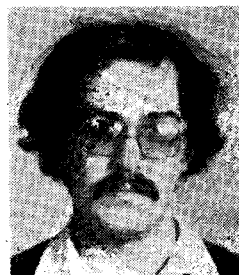
1. ábra. Fleischer—Laker-féle másodfokú SC alaptag

fejlesztett maszk-programozható, parazitakapacitás-érzékeny másodfokú SC alaptag [3] terjedt el. Az általános másodfokú alaptagot az 1. ábra szemlélteti.

Az általunk az IBM 4331 gépre Fortran nyelven írt tervező programok [4, 5] a Fleischer—Laker típusú SC alaptagok normalizált, dinamika maximalizált elemértékeit számítják ki. A tervezés során a mintavételi és tartási effektus $\sin x/x$ torzító hatása is figyelembe vehető.

4. Toleranciaközpontosítás

Iteratív szintézissel egy névleges értékű áramkör tervezhető. Az elem pontatlanság hatásának előzetes figyelembevételének egyik lehetséges módja a szükségesnél szigorúbb specifikációra történő tervezés. Gazdaságosabb eredményre jutunk, ha a tényleges specifikációt és az elemek névleges érték körüli szórását is figyelembe vevő tolerancia-központosítási tervező módszert alkalmazzuk. Olyan statisztikus tervező módszert dolgoztunk ki, mely a gyártási kihozatal elem szerinti érzékenységen alapul. Két hisztogramot állítunk össze: az egyik a specifikációt teljesítő áramkörök adatait tartalmazza, míg a másik a specifikációt megsértőket. A hisztogramok alapján formula vezethető le, amely megadja a kihozatal érzékenységet az elemek toleranciájának megváltozása szerint. Pontosabban — mivel a hisztogram osztályainak mérete véges — a kihozatal megváltozását közvetlenül kiszámíthatjuk arra az esetre, amikor az egyes elemek felső vagy alsó toleranciája éppen a hisztogram osztályainak méretével változik meg. A hisztogramok előállításához ismételt Monte-



HADI ENDRE

A Budapesti Műszaki Egyetem Híradástechnika Szakán szerzett villamosmérnöki diplomát 1983-ban. Ezt követően az Irodagépipari Vállalatnál dolgozott gyártmányfejlesztőként. 1984-től kezdve a Mechanikai Mérőműszerek Gyára Automatika Művek 9-es gyárában helyezkedett el számítástechnikusként. Fő érdeklődési területe: számítástechnika.

Carlo analízisek szükségesek. Az analízisek száma radikálisan csökkenthető a korábbi minták analíziseinek felhasználásával. A módszer alapelve részletesen a [6] irodalomban található meg. Ezen elvre épülő toleranciaközpontosító programot az IBM 4331 gépre Fortran nyelven a Fleischer—Laker-féle alaptagra amplitúdókarakterisztika típusú előírások esetére dolgoztuk ki. Mintapélda a [4] irodalomban található.

5. Mintapélda

Egy mintapéldát mutatunk be az amplitúdó és futási idő együttes approximálására. A specifikációt az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat

Specifikáció			
Frekvencia	A_{\min} dB	A_{\max} dB	$\tau_{\text{előirt}}$ μsec
420	—	—29,5	—
830	6,45	7,5	1280
980	7,60	8,6	940
1300	8,20	8,6	685
1850	7,60	8,6	1370
2000	6,50	7,5	1440
3950	—	—29,5	—

A futási idő approximálásának pontossága $\pm 10 \mu\text{sec}$. Az órajel, s egyben a mintavétel és tartás frekvenciája: 32 kHz. Az előírás realizálását négy, egyenként másodfokú alaptagot tartalmazó SC-áramkörrel végezzük.

Az iteratív tervezés kiinduló paraméterei (2. táblázat) egy korábbi aktív RC realizálásból származnak. A paraméterek $f_{\text{egység}} = 100 \text{ Hz}$ -re vonatkoznak.

2. táblázat^a

A $K(p)$ kezdeti együtthatói

	Mindent áteresztő	Sávát-eresztő	Elliptikus felül-áteresztő	Elliptikus aluláteresztő
a	7,8	15,0	3,6	8,5
b	408,0	160,0	70,0	400,0
c	1,0	0	0,7	0,15
d	408,0	0	10,0	350,0
e	— 7,8	30,0	0	0

A 3. táblázatban a tervezés kiinduló paramétereire és a megoldáshoz tartozó karakterisztikákat tüntettük fel.

3. táblázat

Kiinduló- és megoldás-karakterisztikák

Frekvencia Hz	$ K _{\text{kezdeti}}$ dB	$ K _{\text{végső}}$ dB	τ_{kezdeti} μsec	$\tau_{\text{végső}}$ μsec
420	—29,96	—29,91	—	—
830	6,37	6,50	1279	1277
980	8,13	8,54	923	944
1300	7,97	8,45	662	675
1850	7,65	8,27	1306	1362
2000	6,25	7,18	1343	1432
3950	—29,19	—54,49	—	—

A tervezett áramkör kondenzátorainak értékét a 4. táblázatban találjuk. A sikeres tervezést a SCANSY nevű SC-analízis programmal ellenőriztük [7].

4. táblázat^a

A tervezett Fleischer—Laker-féle SC-alaptagok kapacitásának értéke

	Mindent áteresztő	Sávát-eresztő	Elliptikus felül-áteresztő	Elliptikus aluláteresztő
A	1,152	1,044	1,875	1,408
B	1,152	3,502	13 622	4,446
C	1,056	1,000	7,085	1,116
D	7,587	4,363	34,790	2,433
E	1,000	0,0	0,0	1,019
F	0,0	1,000	1,000	0,0
G	1,056	0,0	1,000	1,000
H	0,0	0,0	0,0	0,0
I	1,000	1,046	0,0	0,0
J	1,152	0,0	0,0	0,0
K	0,0	0,0	9,928	1,000
L	0,0	4,375	0,0	0,0

6. Összefoglalás

Egy iteratív szintézis-módszert mutatunk be amplitúdó és futási idő karakterisztika együttes approximálására. A módszer mind analóg ARC, mind pedig diszkrét idejű SC, ill. digitális szűrő tervezésére felhasználható. A módszer alapján működő programok [4, 5] a Fleischer—Laker-féle másodfokú alaptagokból álló kaszkád SC-áramkör elemeit határozzák meg. Kifejlesztettünk egy további programot, mely amplitúdó előírás esetén toleranciaközpontosított elemértékeket szolgáltat. Az irodalomjegyzéket igyekeztünk úgy összeállítani, hogy ahol választási lehetőségünk volt, ott magyar nyelvű irodalmi hivatkozást adjunk.

7. Köszönetnyilvánítás

A módszerek és programok kifejlesztését — részben — az OMFB és a MEV támogatta. A korábbi [8] valamint a [4] irodalomban szereplő tervező programok továbbfejlesztéséért köszönet illeti Baumann Ferenc, Tihanyi Attila és Kovács Viktor — azóta már végzett egyetemi hallgatókat.

IRODALOM

- [1] Géher Károly: Kapcsolt kapacitású szűrők analízise és szintézise. Híradástechnika XXXV. évf. 1984. 11. szám, 519—525 oldal.
- [2] D. H. Jacobson, W. Oksman: An algorithm that minimizes homogeneous functions. Journal of Math. Anal. & Appl. v. 38. 1972 pp. 533—552.
- [3] P. E. Fleischer, K. R. Laker: A family of active switched capacitor biquad building blocks. Bell Syst. Tech. J. vol. 58. pp. 2235—2269. Dec. 1979.
- [4] Hadi Endre: SC biquad számítógépes tervezése. Diplomaterv. Készült BME HEI-ben 1983.
- [5] SCBIQ-Program használati utasítás. Készült a BME-HEI-ben 1985.
- [6] Gefferth László: Elektronikus áramkörök gyártási selejtjének csökkentése... Híradástechnika XXXIII. évf. 8. szám. 1982. 337—343 oldal.
- [7] Trón Tibor: SC hálózatok érzékenység és futási idő analízise. Híradástechnika XXXVIII. évf. 1987. 3. szám. 97—100 old.
- [8] Tóth László—Molnár Tamás: SC szűrők matematikai leírása és számítógépes tervezése. Tudományos Diákköri dolgozat. BME-Híradástechnikai Elektronika Intézet. 1981.