

Integrált mikroszalagvonalas szűrőváltó

Nagy Andrea

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék

e-mail: nagyandi03@gmail.com

Kivonat

A mikrohullámú összeköttetések alapvető problémája a többutas hullámterjedésből adódó elhalkulás (fading), ami az átvitel minőségét sok esetben jelentős mértékben rontja. Az átvitel minőségének a javítására új lehetőséget kínál az összeköttetés vivő-frekvenciájának az adaptív változtatása. Ennek vizsgálatára két, új megoldású szűrőváltót fejlesztettem ki. Az új szűrőváltó csillapítása 3-4 dB-lel kisebb, mint az ismert megoldásoké. Továbbá az új szűrőváltó az ismert típusokhoz képest lényegesen kisebb méretű, valamint integrált kivitele miatt kisebb költséggel és jól reprodukálhatóan gyártható.

Bevezetés

A mikrohullámú összeköttetések egyik alapvető problémája a többutas hullámterjedésből adódó elhalkulás (fading), ami az átvitel minőségét számottevően befolyásolja, sok esetben, jelentős mértékben rontja. A hullámterjedés több tényező függvénye: az időjárás, a terepviszonyok, az épületek, sőt még a mozgó járművek is számottevő hatással vannak a terjedési viszonyokra. Az előzőekben felsorolt tényezőket befolyásolni nem tudjuk, de a hatásukat az adó és a vevő antennák helyzetének a megválasztásával lehet csökkenteni. Különösen sokat segít a több antennás vétel (diversity), vagy még inkább a MIMO (multiple input, multiple output = több bemenet, több kimenet) elvének az alkalmazása. Az utóbbi esetben mind az adó oldalon, mind a vevő oldalon több térben elkülönített antennát használunk és a vételi oldalon a vett jeleket összegezzük.

További lehetőséget kínál az átvitel minőségének a javítására az összeköttetés vivő-frekvenciájának az adaptív változtatása. Ehhez az adó és a vevő közötti összeköttetés minőségét az adott sávban folyamatosan monitorozni kell. Természetesen ezt a módszert csak olyan sávban alkalmazhatjuk, ahol erre lehetőség van.

Az adaptív összeköttetés elvének kísérleti vizsgálatára a sávot folyamatosan végig pásztázó kísérlet lenne a legalkalmasabb. Ennek magvalósítása meglehetősen nagyszabású vizsgálati összeállítást kívánna, amihez a szükséges anyagi forrás nem áll rendelkezésre. Ezért egy lényegesen egyszerűbb kísérleti összeállítást tervezünk, mellyel méréseket lehet végezni két-két vivőfrekvencián: az egyik változatban a két vivőfrekvencia egymás közelében lenne, a másik változatban pedig egymástól jelentősen

távolabb. Egy ilyen kísérlethez terveztem egy-egy mikrohullámú szűrőváltót. A cél az volt, hogy a szűrőváltó mikroszalagvonalas integrált megoldású legyen és kis csillapítást biztosítson. A cél elérése érdekében többféle áramköri megoldást vizsgáltam meg, melyek közül kiválasztottam a legalkalmasabbat.

A szűrőváltó legfontosabb részei az egyes szűrők. Ezért a mikrohullámú szűrők típusait vizsgáltam meg először, a legalkalmasabb kiválasztása céljából. Ennek eredménye a következő:

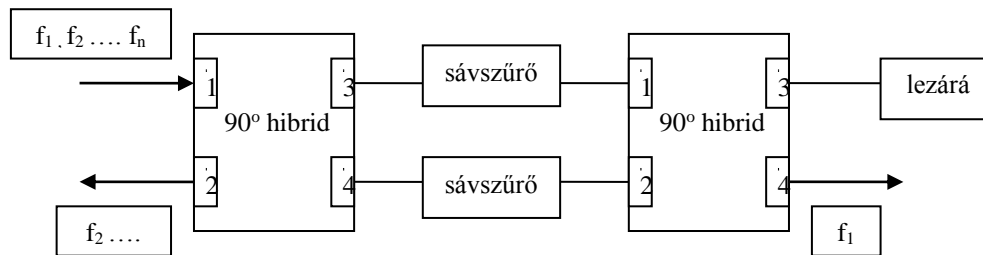
- Koncentrált elemes megoldás diszkrét alkatrészek használatával. Jó minőségű felület szerelt alkatrészeket lehet beszerezni és ezekkel megfelelő szűrőkarakterisztikát lehet megvalósítani. Azonban ilyen módon integrált kivitel nem lehet kialakítani. Következésképpen a koncentrált paraméteres szűrő kivitelezése munkaigényes.
- Integrált kivitelezésű koncentrált paraméteres szűrő készíthető olyan módon, hogy soros induktivitást spirális alakú fémezéssel, párhuzamos kapacitást pedig megfelelő nagyságú fémes felülettel alakítunk ki. Az ilyen szűrőnek azonban nagy a mérete és a csillapítása is nagy.
- Készíthető mikrohullámú szűrő csatolt vonalak alkalmazásával. A csatolt vonalakkal felépített szűrő azonban erősen érzékeny a csatolás mértékére és így a csatoló rés méretére, továbbá nehéz biztosítani nagy szelektivitást, ami a szétválasztandó sávok egymás zavarása szempontjából fontos követelmény.
- Felépíthető szűrő gyűrűs rezonátorokkal. Ez a megoldás kissé nagy méretű. Hátránya még, hogy a rezonátorok közötti csatolás nehezen változtatható, vagyis a szűrő karakterisztikájának az optimalizálása nehézségekbe ütközik.

Végezetül a tápvonalcsonkos szűrőtípust találtam a legmegfelelőbbnek. Ezzel a típussal terveztem meg a mikroszalagvonalas szűrőváltót, ami integrált formában elkészült és mérési adatai a kitűzött célnak megfelelőek. A továbbiakban a szűrőváltó fejlesztésének eredményeit ismertetem. Kétféle szűrőváltó készült. Az egyik két egymáshoz közeli vivőfrekvencia: 2,4 GHz és 2,6 GHz szétválasztására, illetve összegzésére. A másik változat két távoli vivőfrekvenciára készült: melyek 1,3 GHz és 2,6 GHz. A szűrőváltóknak a két különböző frekvenciájú jel egyikére kis csillapítású 50MHz-es sávészélességű áteresztő

sávval, ugyanakkor a másikra nagy csillapítású (legalább 50 dB-es) záró sávval kell rendelkezniük.

Többféle szűrőváltó elrendezés használatos. Itt két alaptípust ismertettek. Az első változat az 1. ábrán látható, mely 2 hibridet és 2 azonos tulajdonságú sáváteresztő szűrőt tartalmaz. A több különböző vivőfrekvenciát tartalmazó jel a baloldali hibrid 1-es kapuján lép be, melyet a hibrid a 3-as és 4-es kapujára egyenlő arányban szétoszt olyan módon, hogy a 4-es kapuhoz a jelek a 3-as kapuhoz viszonyítva 90° fáziskéséssel érkeznek. A 3-as és 4-es kapuhoz egy-egy sáváteresztő szűrő csatlakozik, melyeknek tökéletesen egyformáknak kell lenniük mind az áteresztő, mind a záró sávban. Ilyen módon a szűrő áteresztő sávjába eső két jel változatlan formában jut el a jobboldali hibrid 1-es és 2-es kapujára, mégpedig a baloldali hibrid 3-as kapujáról a jelek

a jobboldali hibrid 1-es kapujára kerülnek, valamint a baloldali hibrid 4-es kapujáról a jelek a jobboldali hibrid 2-es kapujára jutnak. A jobboldali hibrid 2-es kapujára jutó jel azonban az 1-es kapura jutó jelhez viszonyítva 90° fáziskéséssel van. Ennek következtében a jobboldali hibrid 1-es és 2-es kapujára jutó jelek a 4-es kapun összegződnek, ugyanakkor a 3-as kapura jel nem jut. Ennek oka, hogy a jobboldali hibrid 1-es kapujára beérkező jel a 4-es kapura 90° fáziskéséssel kerül, míg a 2-es kapura érkező jel a 4-es kapura jutva újabb fáziskésést nem szenved el, s így a jobboldali hibrid 1-es és 2-es kapujáról a 4-es kapura jutó két jel azonos fázisban van, tehát összegződik. Ezzel egyidejűleg a jobboldali hibrid 1-es és 2-es kapujára érkező jelek a 3-as kapura ellenkező fázisban jutnak, s így egymást kioltják. Ezt a kaput célszerűen illesztetten lezárják.



1. ábra Hagyományos szűrőváltó felépítése

A másik változatban a több különböző vivőfrekvenciájú jelet teljesítményosztóra vezetnek és ennek az egyes ágaihoz sáváteresztő szűrőket kapcsolnak, melyekkel a kívánt frekvenciájú jelet kiválasztják. A jelosztó és az egyes sávszűrők közé izolátort iktatnak, hogy a szétválasztott jelek egymásra hatását kiküszöböljék. Ennek a megoldásnak az egyik hátránya, hogy sok elemből épül fel, a másik hátránya pedig az, hogy a csillapítása nagy a teljesítmény osztása miatt. A csillapítás annál nagyobb, minél nagyobb számú különböző frekvenciájú jelet kell szétválasztani.

A kifejlesztett új elvű szűrőváltó az ismert típusokhoz képest lényegesen kisebb méretű és kisebb csillapítású, továbbá integrált kivitele miatt kisebb költséggel és jól reprodukálhatóan gyártható.

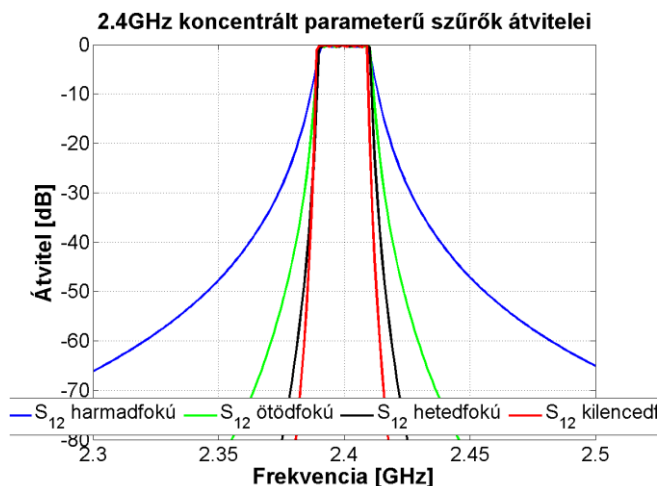
Szűrő tervezése

Az áramkörök tervezését minden esetben a AWR Microwave Office program segítségével végeztem. Az alkatrészek microstrip, más néven mikroszalagvonalas kivitelben készültek Rogers hordozóra. Bár ez a hordozó drágább, mint a mikrohullámú technikában gyakran alkalmazott FR4-es hordozó, de előnyösebb tulajdonságai miatt, mint például a kisebb veszteségi tényező, ezt használtam munkám során. Mivel szinte minden szűrő származtatható koncentrált elemekből felépített áramkörökből, ezért ennek vizsgálatával kezdtem a tervezést.

- Első megoldandó feladat a szűrő jellegének kiválasztása. Mint említettem, ez alkalmazás függő. Ebben az esetben legfontosabb, hogy a záró sávban a lehető legnagyobb legyen a csillapítás, amellyel az áteresztő tartományban a veszteségek minimálisra adódnak. Mivel az áteresztő sávban a szűrő átvitelében enyhe hullámmegengedhető, ezért ahhoz hogy a fentebb leírt követelményeknek minél inkább eleget tegyünk, az egyenletesen hullámos szűrő választása a legcélravezetőbb. Konkrétan a 0,5dB-es hullámosságú Chebyshev szűrő és az ehhez tartozó elemértékek kerültek felhasználásra.

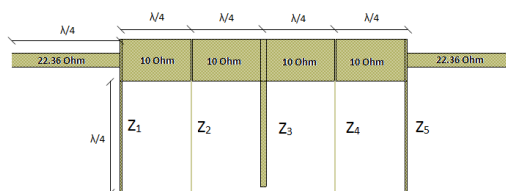
- Második lépés a fokszám meghatározása volt. Mérlegettem azt a tényt, hogy a fokszám emelkedése mellett a veszteségek nőnek, illetve a koncentrált paraméterű szűrők esetén előtérbe kerülnek a parazita hatások okozta problémák. A fokszám vizsgálatára elvégeztem az ideális elemekből felépített koncentrált paraméteres sáváteresztő szűrő szimulációját $N=3,5,7,9$ értékek mellett. Az eredmény a 2. ábrán látható.

Ezt a vizsgálatot mind 2,4, 2,6 és 1,3 GHz sávközépi frekvenciával rendelkező szűrőre elvégeztem. Ezek alapján ötödfokú szűrőre esett a választás, amely megfelelő levágást biztosít az áteresztő tartományon kívül.



2-ábra Koncentrált paraméterű sáváteresztő szűrő válasza $N=3,5,7,9$ fokszám értékek mellett

Először egy csatolt vonalas lépcsős szűrőt terveztem, amit méréssel is megvizsgáltam. Azonban a kellő csatolás biztosításához két vonalszakasz között nagyon szűk rést kellett alkalmazni, ez nagyfokú gyártási pontosságot igényel. Ezért a tervezést egyenlő hosszúságú tápvonal-szakaszokból felépített szűrőtípussal folytattam. Az így felépített szűrő a 3. ábrán látható.



3..ábra A tépvonalcsonkos szűrő rajzolata

A szűrők tervezését az 1,3 GHz-es, 2,4 GHz-es és a 2,6 GHz-es frekvenciára elvégeztem. A kapott értékeket a táblázatban foglaltam össze.

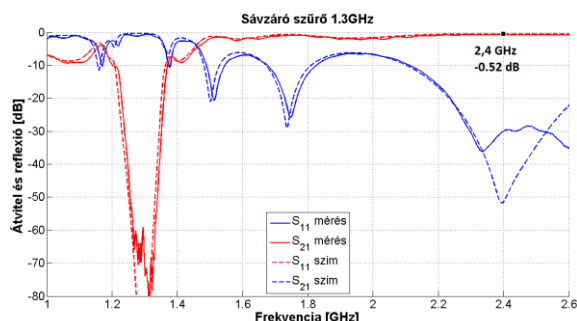
Táblázat

	2,4 GHz-es szűrő	2,6 GHz-es szűrő	1,3 GHz-es szűrő
Forrás impedancia [Ω]	10	10	12,5
Sávszélesség [MHz]	250	270	170
Z_1 [Ω]	71	71,8	71,3
Z_2 [Ω]	99,4	99,7	98,9
Z_3 [Ω]	48	48,3	47,9
Z_4 [Ω]	99,4	99,7	98,9
Z_5 [Ω]	71	71,8	71,3
Z impedancia transzformátor [Ω]	22,36	22,36	25

- Az egyik felhasználásban a szűrőváltóval az a célunk, hogy a több frekvencia-komponensből álló jelből szétválasszunk két távoli frekvenciájú jelet, mégpedig az 1,3 GHz-es és a 2,4 GHz-es jelet.

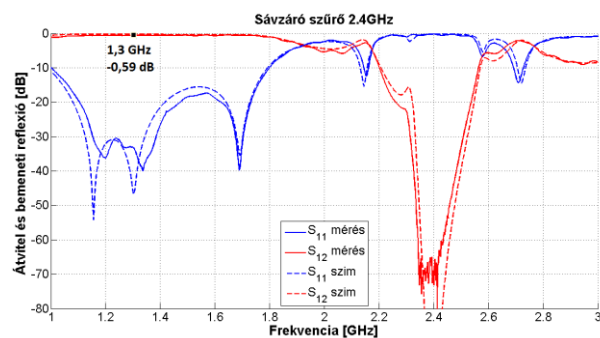
- A másik felhasználásban két közeli frekvenciájú jelet, a 2,4 GHz-es és a 2,6 GHz-es sávot szeretnénk szétválasztani.

A kétféle alkalmazásban kétféle elvárást támasztunk a 2,4 GHz-es szűrővel kapcsolatban. Az első esetben fontos hogy a szűrő beiktatási csillapítása 1,3 GHz-en a lehető legnagyobb legyen, míg a második esetben ezt az elvárást 2,6 GHz-re fogalmazzuk meg. Mivel nem sikerült a két követelményt egyszerre teljesíteni, sor került két független szűrő tervezésére és elkészítésére.

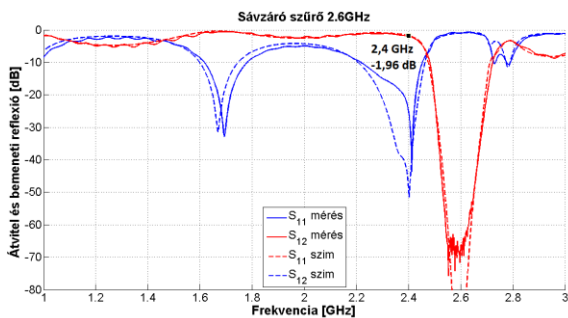


4. ábra. 1,3 GHz-en záró, 2,4 GHz-en átesztő sávval rendelkező szűrő mért és szimulációs eredményei

A tervezés és optimalizálás elvégzése után az 1,3 GHz-en záró és 2,4 GHz-en áteresztő sávval rendelkező szűrőre a 4. ábrán szereplő eredményeket kaptam. Hasonló eredményeket értem el az 1,3 GHz-en áteresztő és 2,4 GHz-en záró sávval rendelkező szűrőre, amit az 5. ábra ad meg. A szaggatott vonalak a szimuláció adatait, míg a folytonos vonalak a mért értékeket mutatják. Leolvasható hogy a záró sávi csillapítás a 60-65 dB-t is eléri. Ezzel szemben a számunkra nagyon fontos áteresztő sávi veszteség csak körülbelül 0.5 dB, ami nagyon kedvező érték. A bemeneti reflexió nagysága is megfelelően alakul a teljes sávon.

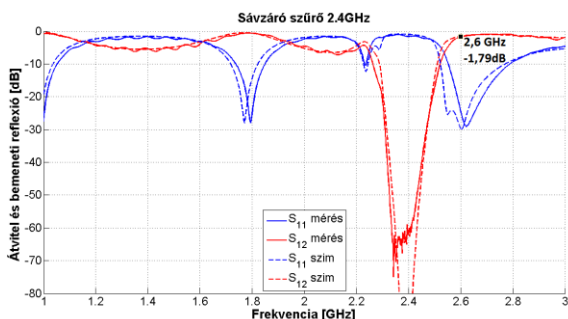


5. ábra. 1,3GHz-en áteresztő, 2,4 GHz-en záró sávval rendelkező szűrő mért és szimulációs eredményei



6. ábra. 2,4GHz-en áteresztő, 2,6 GHz-en záró sávval rendelkező szűrő mért és szimulációs eredményei

A 2,4 GHz-en áteresztő és 2,6 GHz-en záró sávval rendelkező szűrő mért és számított eredményeit a 6. ábra mutatja. A 2,6 GHz-en áteresztő és 2,4 GHz-en záró sávval rendelkező szűrő mért és számított eredményeit a 7. ábra adja meg. A fentebb említett esethez képest itt a záró és áteresztő sáv egymáshoz közelebb helyezkedik el. Ez a tulajdonság a tervezést nagyban megnehezíti, valamint rontja az elérhető eredményeket. Az áteresztő sávban mérhető beiktatási csillapítás közel 2 dB, míg az előző szűrőnél az áteresztő sávban csak 0,5dB-es veszteséget tapasztaltunk. A záró sávi csillapítás azonban a fentebb leírtakhoz hasonlóan közel ideális nagyságú, körülbelül 65 dB.



7. ábra. 2,4GHz-en záró, 2,6 GHz-en áteresztő sávval rendelkező szűrő mért és szimulációs eredményei

Jelosztó tervezése

A szűrőváltónak a szűrők mellett jelosztóval is kell rendelkeznie. Erre a célra kiindulásként a Wilkinson típusú jelosztót választottuk. Általában a Wilkinson jelosztót a beérkező jel teljesítményének a szétosztására használják. Ilyen alkalmazásban a jel frekvenciája azonos a jelosztó két ágában. Azonban szűrőváltó esetén a jelosztó két ágában levő jelek frekvenciája különböző.

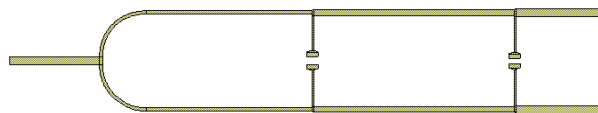
Következésképpen a jelosztó felépítése is el kell térjen az ismert Wilkinson megoldástól. Szűrőváltó üzemben a beérkező jelet a frekvenciájuknak megfelelően külön kimenetekre kell továbbítani, mégpedig úgy, hogy a jel vesztesége minél kisebb legyen.

A szimulációnál figyelembe vettem a tápvonalak csatolásából fakadó hatásokat. S emellett összevettem az ideális felépítés és a módosítások adta eredményeket. A változtatásokra a kiegyenlítő ellenállások bekötése miatt volt szükség. Ebben az esetben ezt két hozzávezető tápvonal és a forrasztáshoz szükséges felületek beiktatásával oldottam meg.

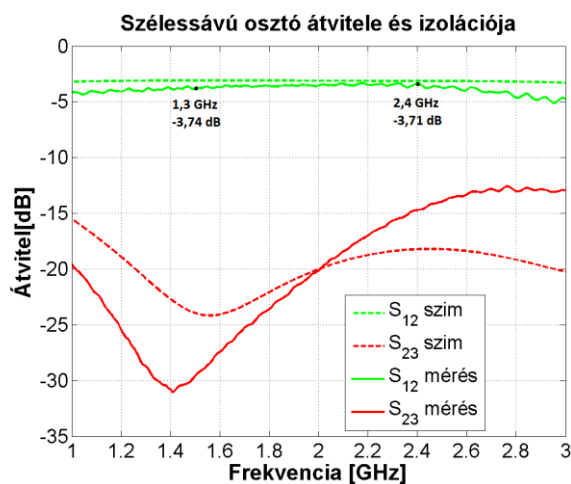
Fontos még megemlíteni, hogy az AWR-ben szimulált ellenállások teljesen ideálisak. Azonban a valóságban ezek az alkatrészek parazita tulajdonságokkal is rendelkeznek. Az ebből fakadó hatásokat modelleztem az ideális ellenállással sorba kötött induktivitás és párhuzamosan kapcsolt kapacitás révén. Ezt az elrendezést használva a szimulációban nem tapasztaltam számottevő különbségeket.

Az egymáshoz közelebb levő frekvenciájú sávok, vagyis a 2,4 GHz-es és 2,6 GHz-es sávok szétválasztására keskenysávú jelosztó használható. Ez egyszerű felépítésű egy elemes jelosztóval megoldható

Az egymástól távolabb levő frekvenciájú sávok, vagyis az 1,3 GHz-es és 2,6 GHz-es sávok szétválasztására szélessávú jelosztóra van szükség. Ezt bonyolultabb, módosított struktúrával tudtam elérni, amit a 8. ábra mutat. A szélessávú jelosztó átvitelét és izolációját a 9. ábra adja meg. Az átviteli csillapítás 3,74 dB, amiből a jel felezése 3 dB-t tesz ki, vagyis az áramkör csillapítás csupán 0,74 dB. A két ág izolációja pedig legalább 15 dB.



8. ábra. Szélessávú jelosztó módosított rajzolata



9. ábra. Szélessávú jelosztó mérési és szimulációs eredményei

Szűrőváltó

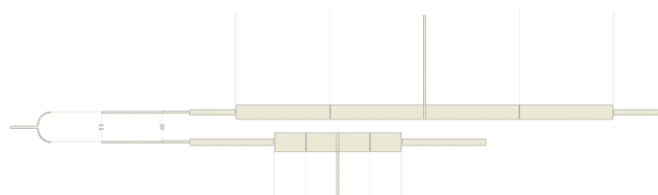
A következőkben két különböző szűrőváltó működését mutatom be a szimulációs és mérési eredmények alapján.

Az első áramkör feladata a 1,3 GHz-es és 2,4 GHz-es 50 MHz szélességű sávok szétválasztása. Ezt a szélessávú jelosztó kimeneteire kapcsolt, sáváteresztő szűrők segítségével valósítottam meg (10. ábra).

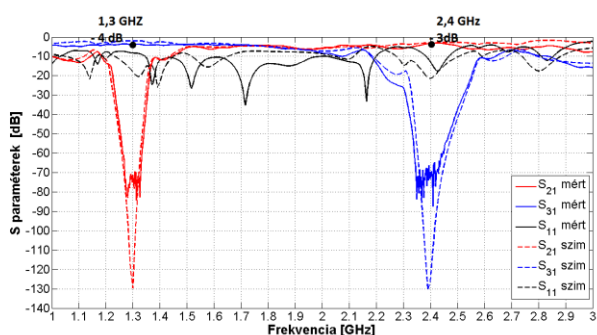
Fentebb már megvizsgáltam az egyes építőelemek tulajdonságait külön-külön. A legjobb eredményeket az egyenlő hosszúságú tápvonalakból felépített szűrők és a módosított jelosztók adták. A szűrőváltót ezeket az áramköri elemeket közös hordozóra integrálva építettem meg.

A szűrőváltó helyes működése érdekében lényeges új követelményt kell teljesíteni, ami a jelosztás síkja és a szűrők bemeneti síkja közötti távolságra vonatkozik. Ezt a távolságot két különböző frekvenciájú jel szétválasztása esetén úgy kell beállítani, hogy a szétosztás síkjában az f_1 frekvenciájú sáváteresztő szűrő az f_2 frekvencián rövidzárat mutasson, az f_2 frekvenciájú sáváteresztő szűrő pedig az f_1 frekvencián mutasson rövidzárat a szétosztás síkjában. Ezeket a követelményeket a sávszűrők záró tartománybeli viselkedésének kell kielégítenie. A jelosztó helyes működése érdekében további követelményt kell teljesíteni a kiegyenlítő ellenállás csatlakozási helyén annak érdekében, hogy ez az ellenállás gyakorlatilag terhelést ne jelentsen.

Két szűrőváltó változatot fejlesztettem ki. A szélessávú szűrőváltó rajzolatát a 10. ábra adja meg. Ez a szűrőváltó az 1,3 GHz-es és a 2,4 GHz-es sávokat választja szét. A szűrőváltó jelleggörbéit a 11. ábra mutatja.



10. ábra. Szélessávú szűrőváltó rajzolata



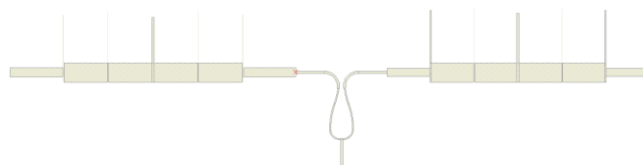
11. ábra Szélessávú szűrőváltó jelleggörbéi az 1,3 GHz-es és a 2,4 GHz-es sávok szétválasztása esetére

A szűrőváltó 1,3 GHz-es ágának az átvitelét a kék görbe, a 2,4 GHz-es ágának az átvitelét a piros görbe adja meg. A folytonos vonalú görbék a mért értékeket, a szaggatott vonalú görbék a szimuláció eredményeit

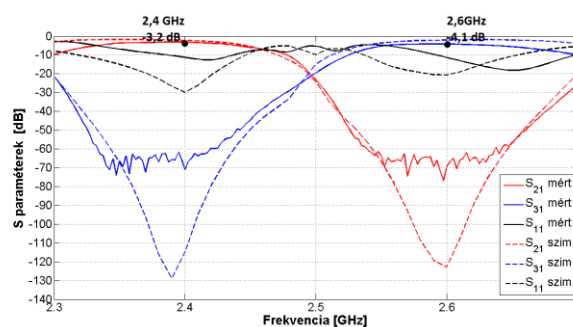
mutatják. A szűrőváltó csillapítása 4 dB az 1,3 GHz-es sávban és 3 dB a 2,4 GHz-es sávban. Továbbá az ágak elválasztása vagy másként az ágak közötti áthallás csillapítása legalább 65 dB.

A második felépítés egy keskenysávú jelosztót és szintén két sáváteresztő szűrőt foglal magában. Ez a konstrukció a 2,4 GHz-es és 2,6 GHz-es 50 MHz szélességű sávok szétválasztását teszi lehetővé.

A keskenysávú szűrőváltó rajzolatát a 12. ábra adja meg. Ez a szűrőváltó a 2,4 GHz-es és a 2,6 GHz-es sávokat választja szét. A szűrőváltó jelleggörbéit a 13. ábra mutatja.



12. ábra. Keskenysávú szűrőváltó rajzolata



13. ábra Keskenysávú szűrőváltó 2,4 GHz-es és 2,6 GHz-es sávok szétválasztására

A szűrőváltó 2,4 GHz-es ágának az átvitelét a kék görbe, a 2,6 GHz-es ágának az átvitelét a piros görbe adja meg. A folytonos vonalú görbék a mért értékeket, a szaggatott vonalú görbék a szimuláció eredményeit mutatják. A szűrőváltó csillapítása 3,2 dB a 2,4 GHz-es sávban és 4,1 dB a 2,6 GHz-es sávban. Továbbá az ágak elválasztása vagy másként az ágak közötti áthallás csillapítása legalább 65 dB.

Minkét új szűrőváltó áteresztő sávi csillapítása csupán 3-4 dB, ami lényegesen kisebb, mint az ismert mikroszalagvonalas megoldású szűrőváltoké. Ugyanis a szokásos megoldások esetében magának a jelosztónak a csillapítása kb. 4 dB, amihez még hozzáadódik a szűrők kb 2 dB-es és az izolátorok kb 1 dB-es csillapítása. Így a kifejlesztett új szűrőváltó csillapítása legalább 3 dB-lel kisebb, mint az ismert megoldásoké.

Összefoglalás

A mikrohullámú összeköttetések alapvető problémája a többutas hullámterjedésből adódó elhalkulás (fading), ami az átvitel minőségét sok esetben jelentős mértékben rontja. Az átvitel minőségének a javítására új lehetőséget kínál az

összeköttetés vivő-frekvenciájának az adaptív változtatása. Ennek vizsgálatára két, új megoldású szűrőváltót fejlesztettem ki. Az új szűrőváltó csillapítása 3-4 dB-lel kisebb, mint az ismert megoldásoké. Továbbá az új szűrőváltó az ismert típusokhoz képest lényegesen kisebb méretű, valamint integrált kivitele miatt kisebb költséggel és jól reprodukálhatóan gyártható.

Irodalom

1. GL Matthaei, L Young, EMCT Jones: Microwave filters, impedance-matching networks, and coupling structures, Artech House, 1980
2. David M. Pozar. Microwave Engineering. Fourth edition, John Wiley and Sons, 2011.
3. Roberto Sorrentino, Giovanni Bianchi: Microwave and RF Engineering, John Wiley and Sons, 2010
4. Giuseppe Macchiarella, Stefano Tamiazzo: „Novel approach to the synthesis of microwave diplexers”, IEEE Transactions on MTT, Volume: 54, Issue: 12, pp. 4281 – 4290, 2006.
5. Dr. Fodor György: Elektromágneses terek. Műegyetemi kiadó, 2005.
6. Dr. Kása István. Mikrohullámú integrált áramkörök. Műszaki Könyvkiadó, 1978.