Садржај

1. Увод 1

2. Основни појмови и теорија филтара 4

2.1. Основне величине филтара 4

2.1.1. Спецификација филтра 7

2.1.2. Апроксимација 9

2.1.3. Шема филтра са идеалним елементима 14

2.1.4. Реализација филтра 15

2.1.5. Проучавање имперфекције 17

2.2. Прототип и LC-лествичаста реализација филтра 18

2.3. Реализација секција вода каскадном везом 31

2.4. Ричардсова трансформација и Куродини идентитети 31

2.5. Имитансни инвертори 36

2.6. Четвртталасни резонатор 40

2.7. Полуталасни резонатор 41

3. Структуре за вођење електромагнетских таласа 43

3.1. Основне карактеристике система за вођење таласа 43

3.2. Типови вођених таласа 46

3.3. Простирање таласа код правоугаоног таласовода 47

3.3.1. Простирање ТЕ таласа 48

3.3.2. Простирање ТМ таласа 51

3.3.3. Снага која се преноси правоугаоним таласоводом 54

3.3.4. Микроталасне компоненте у таласоводној техници 54

3.4. Планарни водови и основне компоненте 56

3.4.1. Основне карактеристике микротракастих водова 56

3.4.2. Осврт на подлоге за микротракасте филтре 58

3.4.3. Дисконтинуитети у техници микротракастих водова 59

3.4.4. Компоненте у техници микротракастих водова 60

3.4.4.1. Концентрисани елементи: калемови и кондензатори 60

3.4.4.2. Квази-концентрисани елементи 60

3.4.4.3. Резонатори у планарној техници 62

4. Општа теорија синтезе филтара са спрегнутим резонаторима.....76
4.1. Основни модел филтра са спрегнутим резонаторима.....77
4.2. Одређивање коефицијента спреге два резонатора.....86
4.3. Одређивање Q-фактора оптерећеног резонатора.....88
4.4. Одређивање Q-фактора резонатора оптерећеног са два приступа.....91
4.5. Поступак реализације филтра (не)пропусника опсега учестаности.....93
4.5.1. Реализација микротракастог филтра пропусника опсега учестаности.....95
4.5.2. Реализација таласоводног филтра непропусника опсега учестаности.....101
5. Филтри у микротракастој техници 105
5.1. Филтар пропусник ниских учестаности реализован каскадом секција водова ...105
5.2. Филтар пропусник ниских учестаности реализован каскадом одсечака водова и отворених огранака.....109
5.3. Квази-концентрисани филтар пропусник ниских учестаности са коначним нулама.....112
5.4. Филтар пропусник високих учестаности у микротракастој техници.....115
5.5. Филтар непропусник опсега учестаности у микротракастој техници.....119
6. Филтри пропусници опсега у микротракастој техници.....126
6.1. Реализације полиномског филтра помоћу идеалних елемената.....127
6.2. Преглед реализација полиномског филтра у микротракастој техници.....131
6.2.1. Филтар са паралелно спрегнутим полуталасним резонаторима.....132
6.2.2. Филтар са укосницама.....136
6.2.3. Интердигитални филтар.....138
6.2.4. Чешљасти филтар.....143
6.2.5. Модификација чешљастог филтра.....147
6.2.6. Филтри пропусници опсега реализовани са ограницима водова.....149
6.3. Експериментални резултати филтра пропусника опсега у микротракастој техници.....150
6.3.1. Спецификација филтра.....151
6.3.2. Алгоритам за реализацију филтара са локализованим импулсним одзивом..151
6.3.3. Преглед експерименталних резултата реализације филтара у микротракастој техници.....153
6.3.3.1. Филтар са паралелно спрегнутим полуталасним резонаторима.....155
6.3.3.2. Модификовани чешљасти филтар.....158
6.3.3.3. Филтар са укосницама.....162
6.3.3.4. Интердигитални филтар.....168
5.3.3.5. Чешљасти филтар.....173
6.3.4. Избор оптималне реализације филтра.....179
6.3.5. Коришћена технологија и запажања при мерењу.....181
7. Микроталасни филтри са квази-концентрисаним елементима 183
7.1. Резонатор калем-вија-кондензатор у вишеслојној техници.....183
7.1.1. Реализација калема у микротракастој техници.....184
7.1.2. Реализација кондензатора у микротракастој техници.....187
7.1.3. Реализација вија у микротракастој техници.....191
7.1.4. Еквивалентна шема резонатора калем-вија-кондензатор у вишеслојној техници.....192
7.2. Реализација филтра пропусника опсега учестаности.....193

7.2.1. Филтар пропусник опсега учестаности другог реда са капацитивном спрегом уводника и калема резонатора 193
7.2.1.1. Одређивање димензија резонатора 193
7.2.1.2. Фактор доброте оптерећеног резонатора 195
7.2.1.3. Коефицијент спреге два резонатора 197
7.2.1.4. Реализација филтра и експериментални резултати 202
7.2.2. Филтар пропусник опсега учестаности другог реда са интердигиталном спрегом уводника и калема резонатора 205
7.2.2.1. Фактор доброте оптерећеног резонатора са интердигиталном спрегом уводника и калема 205
7.2.2.2. Еквивалентна шема уводника и резонатора са интердигиталном спрегом уводника и калема 207
7.2.2.3. Коефицијент спреге два резонатора са интердигиталном спрегом уводника и калема 210
7.2.2.4. Реализација и експериментални резултати филтра са интердигиталном спрегом уводника и калема 210
7.2.3. Филтар пропусник опсега учестаности другог реда са интердигиталном спрегом уводника и кондензатора резонатора 214
7.2.3.1. Фактор доброте оптерећеног резонатора са интердигиталном спрегом између уводника и кондензатора 215
7.2.3.2. Коефицијент спреге два резонатора са интердигиталном спрегом између уводника и кондензатора 216
7.2.3.3. Реализација филтра са интердигиталном спрегом између уводника и кондензатора 217
7.2.3.4. Еквивалентна електрична шема филтра са интердигиталном спрегом између уводника и кондензатора 219
7.3. Реализација филтра пропусника три опсега учестаности коришћењем еквивалентних електричних шема 227
7.3.1. Еквивалентна електрична шема филтра са капацитивном спрегом уводника и калема 228
7.3.2. Апроксимативне формуле и параметри елемената еквивалентне електричне шеме 229
7.3.3. Утицај вредности елемената еквивалентне шеме на карактеристике филтра 236
7.3.4. Пројектовање филтра пропусника опсега учестаности коришћењем еквивалентне електричне шеме 238
7.3.5. Пројектовање филтра пропусника три опсега учестаности 246
7.3.6. Имплементација и резултати мерења филтра пропусника три опсега учестаности 248

8. Планарни филтри са резонаторима са више резонантних учестаности 251

8.1. Филтри пропусници опсега учестаности у микротракастој техници 251
8.2. Реализација филтара пропусника опсега учестаности у вишеслојној техници 260
8.2.1. Филтри пропусници опсега учестаности у вишеслојној техници пројектовани са резонатором са две резонантне учестаности 260
8.2.2. Филтри пропусници опсега учестаности у вишеслојној техници пројектовани помоћу резонатора са три резонантне учестаности 265
8.3. Реализација филтра са два пропусна опсега у вишеслојној техници 272
8.4. Реализација реконфигурабилног вишеслојног филтра са два пропусна опсега коришћењем мемристора 279

8.4.1. Вишеслојни резонатор са две резонантне учестаности са мемристором.....280
8.4.2. Вишеслојни филтар са два пропусна опсега са резонаторима са две резонантне учестаности модификованим мемристорима.....282

9. Таласоводни филтри пропусници опсега учестаности у H-равни.....289

9.1. Комплементарни полуталасни резонатори у таласоводу.....289
9.1.1. Комплементарни полуталасни резонатор на вишеслојној планарној прегради.....289
9.1.2. Комплементарни полуталасни резонатор са централном секцијом вода на планарној прегради.....292
9.2. Таласоводни филтри пропусници опсега са комплементарним полуталасним резонаторима.....301
9. 3. Филтар са два пропусна опсега са полуталасним планарним резонантним преградама.....309
9.4. Филтар са два пропусна опсега са полуталасним металним резонантним преградама.....313

10. Таласоводни филтри пропусници опсега учестаности у E равни.....328

10.1. Таласоводни филтри пропусници опсега учестаности реализовани са металном преградом.....331
10.1.1. Полуталасни резонатор пропусник опсега реализован помоћу металне преграде.....331
10.1.2. Филтар пропусник опсега учестаности трећег реда са металном преградом.....332
10.2. Подешавање селективности филтра пропусника опсега помоћу четвртталасних резонатора.....335
10.2.1. Компактни филтар пропусник опсега са штампаним преградама и четвртталасним резонаторима за подешавање селективности.....339
10.3. Подела пропусног опсега филтра применом четвртталасних резонатора.....341

11. Филтри непропусници опсега у H-равни правоугаоног таласовода.....344

11.1. Полуталасни таласоводни резонатор у H-равни.....344
11.1.1. Алгоритам пројектовања таласоводног резонатора у H-равни.....345
11.1.2. Еквивалентна шема полуталасног резонатора у H-равни.....350
11.2. Филтар непропусник опсега учестаности у H-равни.....352
11.2.1. Еквивалентна шема филтра непропусника опсега са преградама у H-равни правоугаоног таласовода.....354
11.3. Филтар трећег реда са два непропусна опсега учестаности.....355
11.3.1. Компактни таласоводни филтар трећег реда са два непропусна опсега учестаности.....356
11.3.2. Еквивалентна шема компактног филтра са два непропусна опсега учестаности у H-равни.....360
11.3.3. Експериментална верификација компактног филтра са два непропусна опсега учестаности у H-равни.....362

12. Филтри непропусници опсега учестаности у E-равни таласовода 364
12.1. Филтри са четвртталасним резонаторима 364
12.1.1. Четвртталасни таласоводни резонатор 364
12.1.2. Еквивалентна шема таласоводног четвртталасног резонатора.....368
12.1.3. Филтри са четвртталасним резонаторима везаним за наспрамне зидове правоугаоног таласовода.....370
12.1.3.1. Филтар са једним непропусним опсегом учестаности 370
12.1.3.2. Филтри са два непропусна опсега учестаности.....373
12.1.3.3. Филтар са три непропусна опсега учестаности.....376
12.1.4. Филтри са четвртталасним резонаторима везаним за исти зид правоугаоног таласовода.....377
12.1.4.1. Филтар другог реда са једним непропусним опсегом учестаности.....377
12.1.4.2. Еквивалентна шема филтра другог реда са једним непропусним опсегом учестаности.....383
12.1.4.3. Минијатуризација таласоводног филтра са два непропусна опсега учестаности 387
12.1.4.4. Еквивалентна електрична шема филтра са два непропусна опсега учестаности 390
12.1.4.5. Ултра-компактни филтар са два непропусна опсега учестаности.....391
12.1.4.6. Снага таласоводног филтра.....393
12.1.4.7. Филтар са три непропусна опсега учестаности.....394
12.2. Филтри са полуталасним резонаторима.....395
12.2.1. Полуталасни таласоводни резонатор у E-равни.....395
12.2.2. Филтар другог реда непропусник опсега са полуталасним резонаторима ...399
12.2.3. Филтар трећег реда са једним непропусним опсегом са полуталасним резонаторима.....402
12.2.4. Филтар другог реда са два непропусна опсега са полуталасним резонаторима 403

Литература 405
Опште референце 405
Референце аутора 413
Докторске дисертације.....422
Техничка решења 423

Предговор

Пројектовање РФ и микроталасних филтара је једна од стручних области које су заступљене кроз предмете на академским мастер и докторским студијама Модула за микроталасну технику Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Уџбеник који је пред вама, под насловом Пројектовање микроталасних филтара, настао је од предавања на истоименом предмету која аутори дуги низ година држе на академским мастер студијама на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Уџбеник садржи све области и образовне јединице предвиђене савременим планом и програмом предмета Пројектовање микроталасних филтара на Електротехничком факултету у Београду. Основна замисао уџбеника је да пружи студенту сва потребна темељна знања теорије и праксе пројектовања РФ и микроталасних филтара. Са друге стране, уџбеник је писан да буде сажет и педагошки уобличен тако да студент циљно градиво може успешно савладати у предвиђеном временском оквиру.

Успешно савладавање градива предмета Пројектовање микроталасних филтара подразумева да студент поседује знања из предмета претходних семестара, а пре свега из предмета Микроталасна техника, Електромагнетика и Теорија електричних кола.

Поред излагања темељних знања пројектовања микроталасних филтара, Уџбеник пружа увод у синтезу електричних мрежа и основе пројектовања стандардних микроталасних филтара, као што су филтри са одсечцима и ограницима водова, самерљиви филтри, филтри са паралелном спрегом, интердигитални филтри, чешљасти филтри и филтри-укоснице. Уџбеник уобличава стручне садржаје са нагласком на (1) разумевању основних концепата и корака приликом пројектовања филтра, (2) препознавању спецификације филтра и технолошких ограничења, (3) пројектовању стандардних микроталасних филтара синтезом, подешавањем и оптимизацијом, као и (4) верификацији пројекта филтра симулацијом на нивоу микроталасног кола. Такође, Уџбеник на концизан начин представља напредна знања и методе пројектовања RF/микроталасних филтара, било да се ради о концентрисаним филтрима, планарним филтрима или таласоводним филтрима са преградама и сложеним резонантним уметцима. Илуструје се пројектовање оваквих сложених микроталасних филтара, синтезом, подешавањем и оптимизацијом, као и верификација пројекта филтра потпуном 3D електромагнетском симулацијом.

Посебност Уџбеника чини исцрпна литература која садржи и бројне референце аутора, а на основу којих су уобличени и поједини практични примери пројектовања и фабрикације микроталасних филтара наведени у Уџбенику. Део експерименталних резултата аутора, мерењем на фабрикованом прототипу филтра, такође је изложен у Уџбенику да би се читаоцу што сликовитије приближила реална слика перформанси пројектованих филтара.

Аутори се захваљују колегама који су их охрабривали и подстицали на писање уџбеника. И поред изузетне жеље да уџбеник буде написан што је могуће боље, аутори су свесни чињенице да у њему могу постојати грешке и пропусти, те су сва запажања читалаца о уџбенику добродошла.

Београд, јун 2019. године

Милка М. Потребић и Дејан В. Тошић

1. Увод

Развој савремених система и сервиса који раде на микроталасним учестаностима, подразумева већу потражњу за фреквенцијским опсезима, а самим тим и планирање расподеле блиских канала заинтересованим корисницима. Филтри у овом случају играју значајну улогу у раздвајању фреквенцијских канала, а сложеност савремених примена често поставља противречне захтеве при њиховом пројектовању, као што су мали габарит, висок квалитет и приступачна цена. Овакви захтеви тржишта подстичу развој микроталасних филтара.

Микроталасни филтри су неизоставни елементи сваког савременог комуникационог система који ради на микроталасним учестаностима. Примери таквих система су мобилна телефонија, радарски системи, сателитски системи, GPS (Global Positioning System), WLAN (Wireless Local Area Network), Bluetooth и многи други.

Пројектовање микроталасних филтара представља актуелну област савремене микроталасне технике, што показују и пет посебних издања реномираног часописа IEEE Microwave Magazine посвећена микроталасним филтрима ("Focus on Filters", vol. 8, no. 2, April 2007; "All the World is a Filter", vol. 8, no. 5, Oct. 2007; "Microwave Filter Synthesis", vol. 12, no. 6, Oct. 2011; "Filters, PAs and Propagation and Refraction", vol. 13, no. 5, July/Aug. 2012; "Flexible Variety of Filters", vol. 15, no. 5, July/Aug. 2014) и пет релевантних монографија. Једна монографија приказује напредне поступке пројектовања микроталасних филтара (P. Jarry and J. Beneat, Advanced Design Techniques and Realizations of Microwave and RF Filters. NJ: Wiley, 2008), док две излажу методе синтезе филтара у таласоводној техници (I. C. Hunter, Theory and Design of Microwave Filters. London, UK: IET, 2006; R. J. Cameron, C. M. Kudsia and R. R. Mansour, Microwave Filters for Communcation Systems: Fundamentals, Design and Applications. NJ: Wiley, 2007). Две монографије дају преглед савремених реализација микроталасних планарних филтара (J.-S. Hong, Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. Hoboken, NJ: Wiley, 2011; R. Garg, I. Bahl, M. Bozzi, Microstrip Lines and Slotlines. Norwood, MA: Artech House, 2013).

И даље се интензивно ради на развоју нових микроталасних филтара коришћењем различитих технологија, са акцентом на новим применама и све популарнијој и захтевнијој минијатуризацији структура, уз задовољавање задатих карактеристика у фреквенцијском и временском домену. У фреквенцијском домену задају се услови у

пропусном опсегу, као што су минимално унето слабљење и прилагођење, а при прелазу са пропусног на непропусни опсег задаје се селективност. У временском домену постављају се захтеви за обликом импулсног одзива и његовим што краћим трајањем, односно концентрисаношћу у времену.

Развој микроталасних филтара одвија се већ неколико деценија. У зависности од области намене филтара, основне технологије за имплементацију су планарна и таласоводна. Персонални уређаји су намењени за комуникационе сервисе као што су: мобилна телефонија (900 MHz, 1,8 GHz, 1,9 GHz, 2,1 GHz), GPS (1,6 GHz), WiMAX (3,5 GHz), WiFi (2,4 GHz, 5,8 GHz). За ове намене се захтевају ускопојасни филтри пропусници опсега учестаности, мале величине и што мање цене производње. Наведени услови се могу испунити употребом планарне штампане технике за израду резонатора и целог филтра. Иако таласоводне структуре могу бити великих димензија, оне и даље представљају незаменљива решења за системе у којима су потребне велике снаге и мали губици. Примери оваквих система су радарски и сателитски системи.

Књига је организована у дванаест глава, а поред тога дат је и списак коришћене литературе. Поред општих референци, приказане су референце аутора и списак техничких решења. Дат је шири списак референци аутора, који може послужити читаоцу за проширивање знања из области пројектовања филтара. У књизи је приказан део резултата аутора који су проистекли из техничких решења, што говори о актуелности пројектовања микроталасних филтара. На крају је дат и списак доктората, који су урађени под менторством аутора ове књиге. Део истраживања из доктората приказан је у књизи као допринос новим методама пројектовања.

Поред уводне главе где се даје осврт на актуелност области, друга глава даје основне појмове и величине о филтрима. Наведене су основне апроксимације које се користе код пројектовања микроталасних филтара. Резонатор се уводи као основни градивни елемент филтра. Посматрају се полуталасни и четвртталасни резонатори као одсечци водова.

Трећа глава даје преглед структура за вођење електромагнетских таласа. Дате су основне карактеристике система за вођење таласа, типови вођених таласа, простирање таласа кроз правоугаони таласовод (TE и TM таласа), снага која се преноси правоугаоним таласоводом, као и таласоводне компоненте. Анализирани су и планарни водови. Дат је преглед резонатора у планарној техници, као и основних компоненти реализованих помоћу планарних водова. Анализирани су резонатори са једном и више резонантних учестаности.

У четвртој глави описана је општа теорија синтезе филтара са спрегнутим резонаторима позната под називом Дишалов метод. Метод је описан на примеру филтара пропусника и непропусника опсега учестаности. Представљена је општа теорија синтезе филтара посредством коефицијената спреге два резонатора, Q-фактора оптерећеног и неоптерећеног резонатора, и централне учестаности филтра, која омогућава да се нађу све потребне геометријске димензије филтра без обзира на циљну технологију реализације. За циљне технике одабране су планарна и таласоводна техника као једне од најзаступљенијих при пројектовању савремених микроталасних кола.

Планарни филтри су анализирани у четири главе књиге (пета, шеста, седма и осма глава). Анализирани су филтри у микротракастој техници као што су пропусници ниских учестаности, високих учестаности, пропусници и непропусници опсега учестаности. Дат је преглед реализација филтара са и без спрегнутих водова. Анализа је проширена на пројектовање филтара у вишеслојној техници. Разматране су реализације филтара пропусника опсега учестаности и филтара са два и три пропусна опсега.

Анализирано је и пројектовање филтара са квази-концентрисаним елементима. Приказане су и реализације реконфигурабилних филтара коришћењем мемристора као прекидача на микроталасним учестаностима. Приказано је и пројектовање филтара кад се користе резонатори са две или три резонантне учестаности.

Преглед таласоводних филтара дат је у четири главе (деветој, десетој, једанаестој и дванаестој глави). Анализирани су пропусници опсега учестаности са резонантним преградама постављеним у *H*-раван таласовода. Прво се даје преглед резонатора са еквивалентним електричним шемама. Приказује се пример реализације филтра пропусника опсега учестаности трећег реда са резонантним преградама. Затим се уводе филтри са два пропусна опсега. Разматра се и реализација филтра са резонантним преградама постављеним у *E*-раван таласовода. Уводи се филтар са металном преградом. Анализира се могућност повећања селективности филтра, као и подела пропусног опсега на подопсеге.

У једанаестој и дванаестој глави изложен је поступак пројектовања филтара непропусника опсега учестаности у зависности од равни у коју се постављају резонантне преграде у таласоводу. Приказују се и еквивалентне шеме, као резонатора, тако и филтра. Анализирани су и филтри са два и више непропусних опсега. Приказује се могућност реализације инвертора чија је дужина мања од стандардне.

У књизи су приказане и структуре за прецизно позиционирање резонантних преграда унутар таласовода, код реализација које резонантне преграде стављају у *H*-раван таласовода.