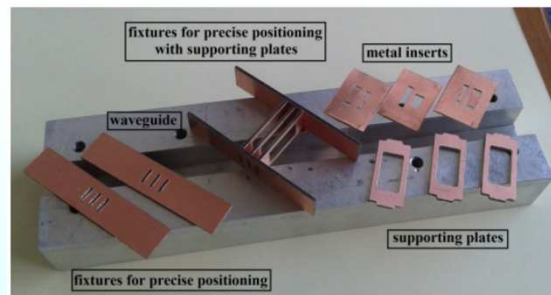


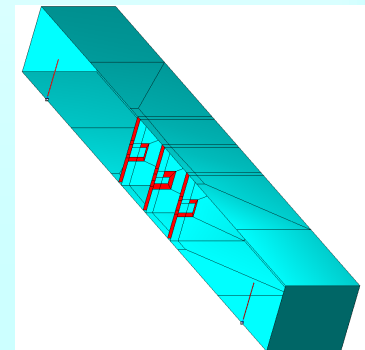
Пројектовање микроталасних филтара



Дејан Тошић
Милка Потребих

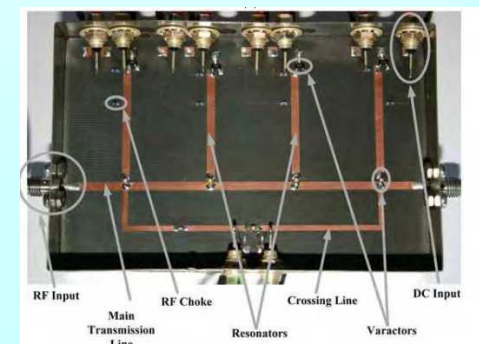
Пројектовање микроталасних филтара

- **Настава се изводи према студијском програму који је Електротехнички факултет акредитовао 2013. године**
- Тип студија: **мастер академске студије**
- Студијски програм: **Електротехника и рачунарство**
- Изборно подручје (модул): **Електроника, Микроталасна техника**
- Статус предмета: **изборни**
- Број часова активне наставе по семестру: Предавања **60**,
4 часа предавања недељно
- Методе извођења наставе: Предавања
- Оцена знања (максималан број поена је 100)
Предиспитне обавезе: **Пројекат са презентацијом 50**
Усмени испит 50
- Појединости акредитованог студијском програма се налазе на званичном Веб-сајту Факултета
- Шифра предмета: **13М071ПРМФ**



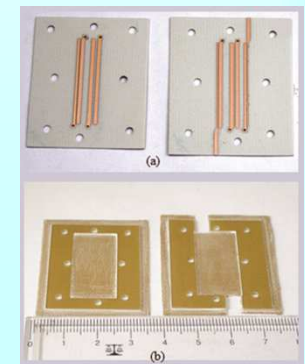
Циљ, исход и садржај

- Излагање темељних знања пројектовања микроталасних филтара. Увод у синтезу електричних мрежа. Основи пројектовања стандардних микроталасних филтара, као што су филтри са одсечцима и огранцима водова, самерљиви филтри, филтри са ивичном спрегом, филтри са паралелном спрегом, интердигитални филтри, чешљасти филтри и филтри-укоснице.
- Разумевање основних концепата и корака приликом пројектовања филтра. Препознавање спецификације филтра и технолошких ограничења. Пројектовање стандардних микроталасних филтара синтезом, подешавањем и оптимизацијом. Верификација пројекта филтра симулацијом на нивоу микроталасног кола.
- Основне величине, концепти и кораци у пројектовању микроталасних филтара: спецификација, апроксимација, реализација, имплементација, студија имперфекција, подешавање, оптимизација. Синтеза LC филтара. Фостерова, Кауерова, и Дарлингтонова процедура. Имитансни инвертори, Ричардсова трансформација, Куродини идентитети. Реализација одсечцима и огранцима водова. Филтри са спрегнутим резонаторима.
- Симулација на рачунару. Израда лабораторијског прототипа.



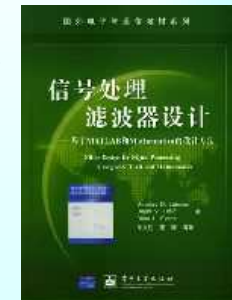
Предметни наставници

- Др **Дејан Тошић**, редовни професор, соба 80, телефони 337.007.4, 3218.338
- Др **Милка Потребих**, ванредни професор, соба 64, телефони 3370.143, 3218.351, 3218.352
- **Саветовања** (консултације) су у време наведено на ознаци кабинета, после часова наставе, као и у паузама између часова
- Препорука је да се за саветовање припреме **писмено** садржаји о којима ће бити речи, задаци, питања, белешке са наставе, уџбеници, и слично
- За предмет је задужена **Катедра за општу електротехнику**



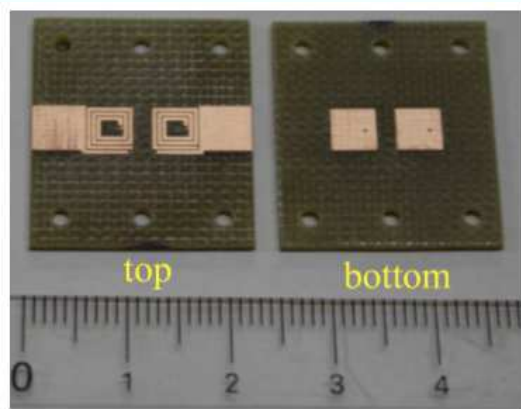
Литература

- **М. М. Потребих, Д. В. Тошић,**
Пројектовање микроталасних филтара,
Академска мисао, Београд, 2019.
- **В. В. Петровић, Д. В. Тошић, А. Р. Ђорђевић,**
Микроталасна пасивна кола,
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет, Београд, 2010.
[online] http://www.etf.rs/etf_files/udzbenici/MPK_2010.pdf
- **Р. Хорват, Синтеза електричних мрежа,** Научна књига, Београд, 1977.
- **J.-S. Hong, Microstrip Filters for RF/Microwave Applications, 2/e,**
John Wiley & Sons, Hoboken, 2011.
- **M. D. Lutovac, D. V. Tošić, B. L. Evans,**
Filter Design for Signal Processing using MATLAB and Mathematica,
Prentice Hall, Upper Saddle River, 2001.
---, Reprint for P. R. China, Publishing House of Electronics Industry , PHEI,
Beijing, China, 2002.
---, Translated in Chinese, Publishing House of Electronics Industry, PHEI,
Beijing, P. R. China, 2004.
- **I. C. Hunter, Theory and Design of Microwave Filters,**
The Institution of Engineering and Technology (IET), London, 2001.
(Reprinted 2006)

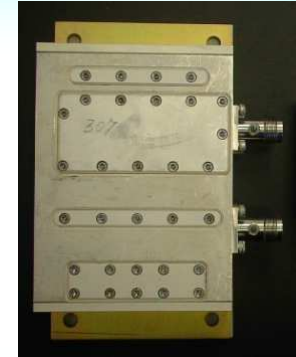


Увод

Основни појмови

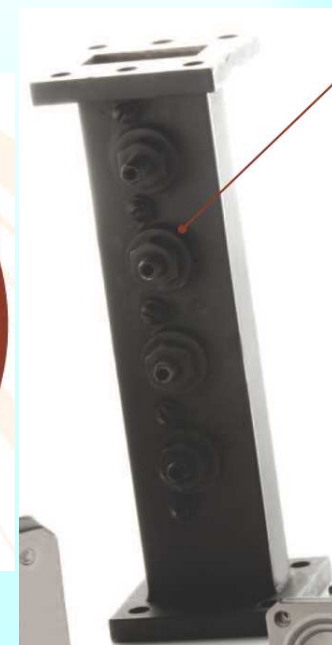
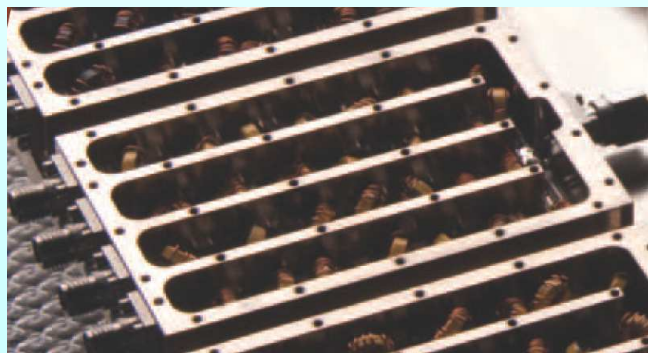
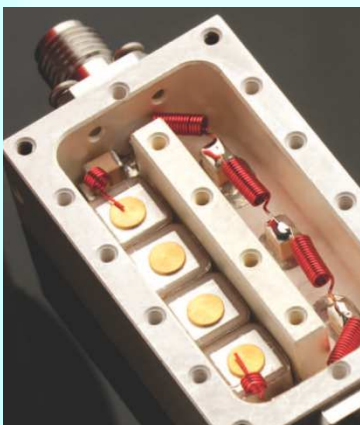
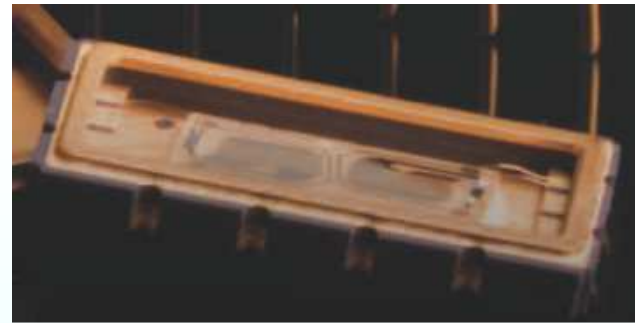


Појам

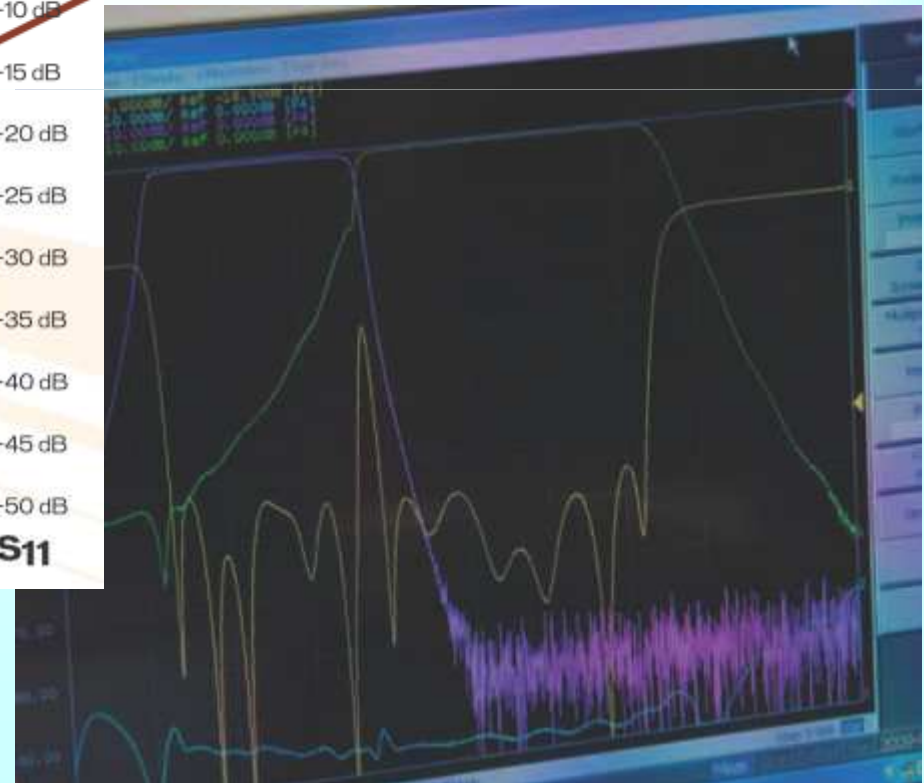
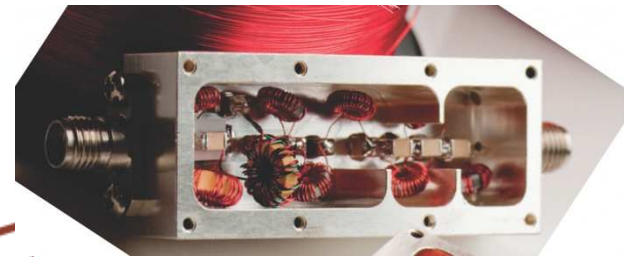
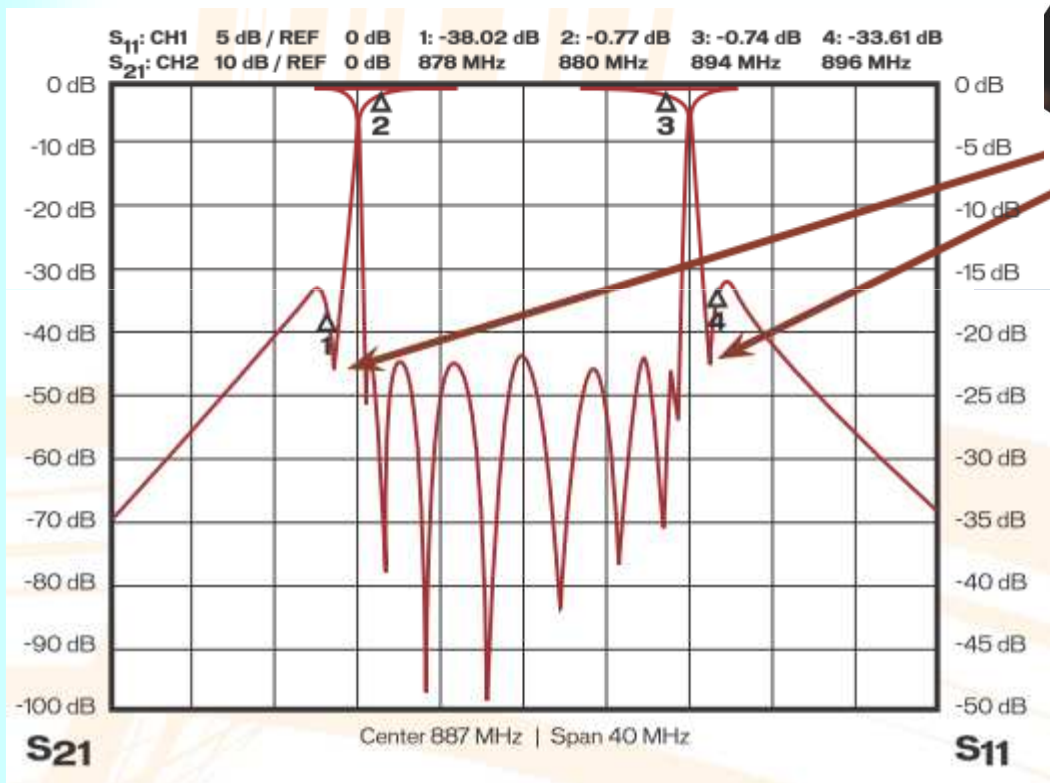


- ***RF/Микроталасни филтар*** је линеарна временски непроменљива микроталасна мрежа са два или више приступа, без извора, чији параметри расејања задовољавају посебне услове по опсезима учестаности
- У пракси су ове мреже, по правилу, пасивне и реципрочне, а често са два приступа и симетричне
- Модул параметра расејања обично има малу вредност у једној групи опсега учестаности а блиску јединици у другој

Изглед



Карактеристике



Задатак

- RF/Микроталасни филтри су мреже селективне по учестаности које аналогно обрађују микроталасни сигнал уобличавањем његовог фреквенцијског спектра
- Филтри најчешће издвајају део фреквенцијског спектра сигнала мењајући амплитудски спектар, али постоје и обраде у којима се обликује фазни спектар сигнала
- Слободније речено, филтри сигнале неких учестаности добро пропуштају, а сигнале других учестаности слабе



Примена

- RF/Микроталасни филтри су неопходни у свим радиокомуникационим уређајима
- Филтри се примењују практично у свим RF мерним уређајима
- Постоје разноврсне посебне примене, као што су примене у радиолокацији, наменској индустрији и здравству

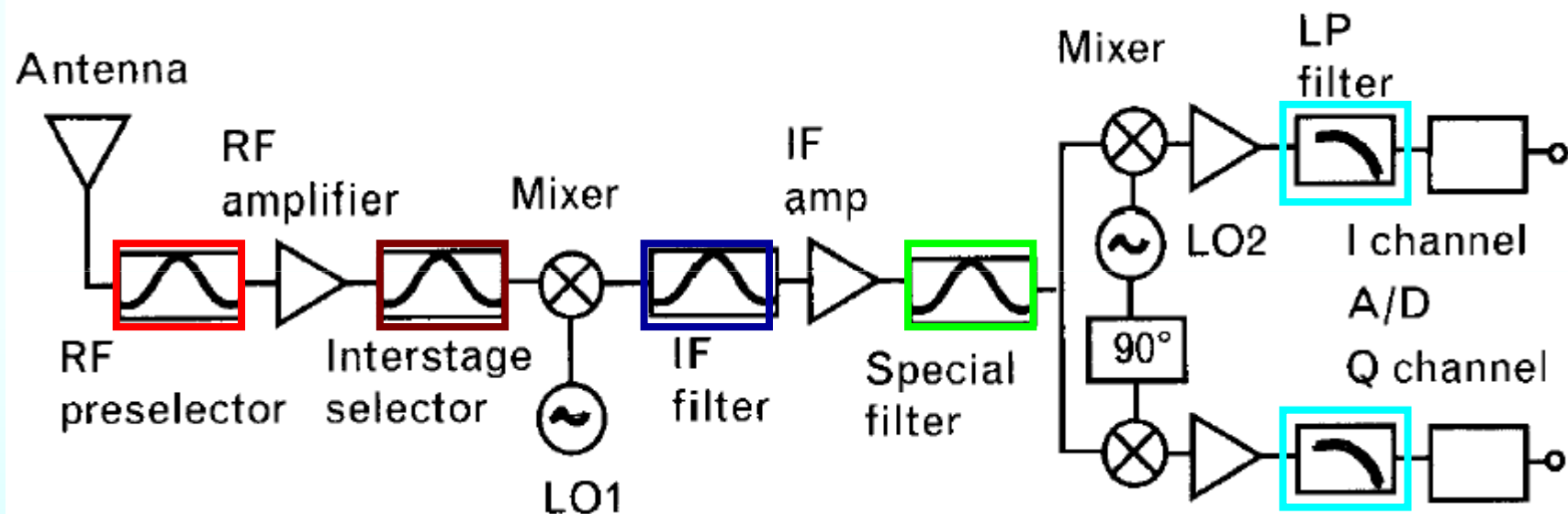


Ограничавање спектра

- RF/Микроталасни филтри ограничавају фреквенцијски спектар сигнала
- Предајника на излазу
- Пријемника на улазу
- У току обраде, на пример, после мешача, детектора, и слично
- Аналогни филтри су неопходни пре дигиталне обраде аналогног сигнала

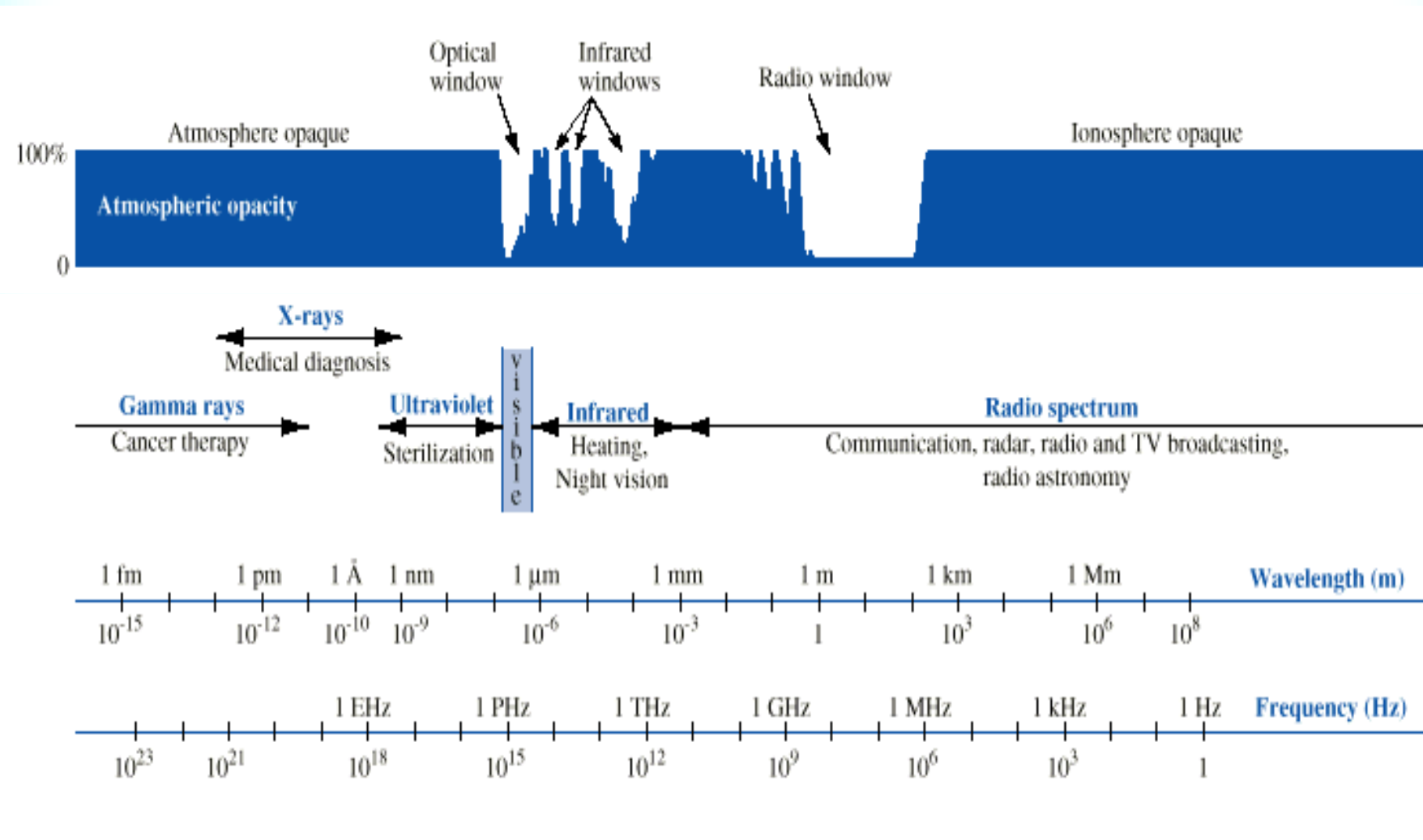


Филтри комуникационог уређаја



У радиокомуникационим уређајима обично постоје бар три филтра: за издвајање **радио** сигнала од интереса, за обраду сигнала на **међуфреквенцији** и за издвајање жељеног **канала**

Електромагнетски спектар



Band	Frequency Range	Principal Applications
HF	3–30 MHz	Over-the-horizon radar
VHF	30–300 MHz	Long-range search
UHF	300–1000 MHz	Long-range surveillance
L	1000–2000 MHz	Long-range surveillance
S	2000– 4000 MHz	Surveillance Long-range weather characterization Terminal air traffic control
C	4000–8000 MHz	Fire control Instrumentation tracking
X	8–12 GHz	Fire control Air-to-air missile seeker Marine radar Airborne weather characterization
Ku	12–18 GHz	Short-range fire control Remote sensing
Ka	27– 40 GHz	Remote sensing Weapon guidance
V	40–75 GHz	Remote sensing Weapon guidance
W	75–110 GHz	Remote sensing Weapon guidance

Радне учестаности радарских система у којима су филтри важан и незаобилазан део

Опсези учестаности ЕМ таласа

Типични опсези

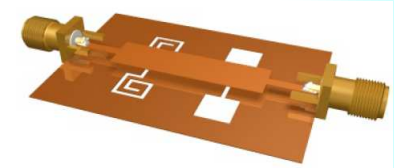
Називи и ознаке

АМ радиодифузија*	526,5 – 1606,5 kHz	Средњи таласи	0,3 – 3 MHz
краткоталасни опсег*	3 – 30 MHz	Кратки таласи (HF)	3 – 30 MHz
FM радиодифузија	87,5 – 108 MHz	VHF таласи	30 – 300 MHz
VHF I (TV канали 2 – 4, Европа)	47 – 68 MHz	Ултратратки таласи	0,3 – 3 GHz
VHF III (TV 5 – 12, Европа)	174 – 230 MHz	L опсег	1 – 2 GHz
UHF IV, V (TV 21 – 69, Европа)	470 – 862 MHz	S опсег	2 – 4 GHz
мобилна мрежа (САД)	824 – 849 MHz	C опсег	4 – 8 GHz
	869 – 894 MHz	X опсег	8 – 12 GHz
GSM мобилна мрежа (Европа)	880 – 915 MHz	Ku опсег	12 – 18 GHz
	925 – 960 MHz	K опсег	18 – 26 GHz
GPS	1575,42 MHz	Ka опсег	26 – 40 GHz
	1227,60 MHz	U опсег	40 – 60 GHz
Микроталасне рерне	2,45 GHz	V опсег	50 – 75 GHz
DBS (САД)	11,7 – 12,5 GHz	E опсег	60 – 90 GHz
ISM (САД)	902 – 928 GHz	W опсег	75 – 110 GHz
	2,400 – 2,484 GHz	F опсег	90 – 140 GHz
	5,725 – 5,850 GHz		
UWB радио (САД)	3,1 – 10,6 GHz		

*предстоји увођење дигиталних система

WiFi, WLAN, Bluetooth

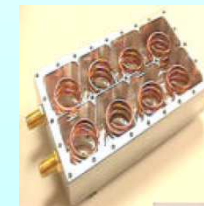
Технологије



- **LC** lumped element, Ceramic, Crystal
- SAW surface acoustic wave
- **TL** transmission-line structures: coaxial line, tubular, **microstrip**, stripline, suspended substrate, coplanar waveguide (CPW), slotline, ...
- DGS defected ground structures
- **WG** waveguide, Cavity
- SIW substrate-integrated waveguide
- DR dielectric resonator
- LCP liquid crystal polymers
- HTS high-temperature superconductors
- LTCC low-temperature cofired ceramics
- MMIC monolithic microwave-integrated circuit
- MEMS micro-electromechanic system
- Active microwave filters
- Multiband filters, Dual-mode filters
- Ultra-wideband (UWB) filters
- Tunable and reconfigurable filters, Multi-layer filters, ...

ЧИНИОЦИ

- Масовност производње (Volume/Mass)
- Фактор доброте резонатора (Q-factor)
- Нежељени одзив (Spurious)
- Цена (Cost, Time-to-market)
- Технологија (Technology, Reproducibility)
- Примена (Application, Complexity)
- Фреквенцијски опсег (Band)





Примена и технологија

Band	UHF	L/S	C	X/Ku	Ka
Technology	SAW Helical Dielectric Compline Planar Waveguide	Compline SAW Dielectric Planar HTS Waveguide	Dielectric Waveguide HTS Planar Compline	Dielectric Waveguide Planar	Waveguide Dielectric Planar
Application	Cellular Satcom	PCS Satcom MMDS	Satcom	Satcom Link	LMDS Satcom

Важна питања

- **Тип таласа** који се простире у филтру: опште узев, виши типови таласа повећавају Q -фактор, запремину и сложеност, е.г. за кружни таласовод
- **Материјал диелектрика резонатора**: за диелектричне филтре, избор материјала има значајан утицај на Q -фактор, запремину, масовност и цену



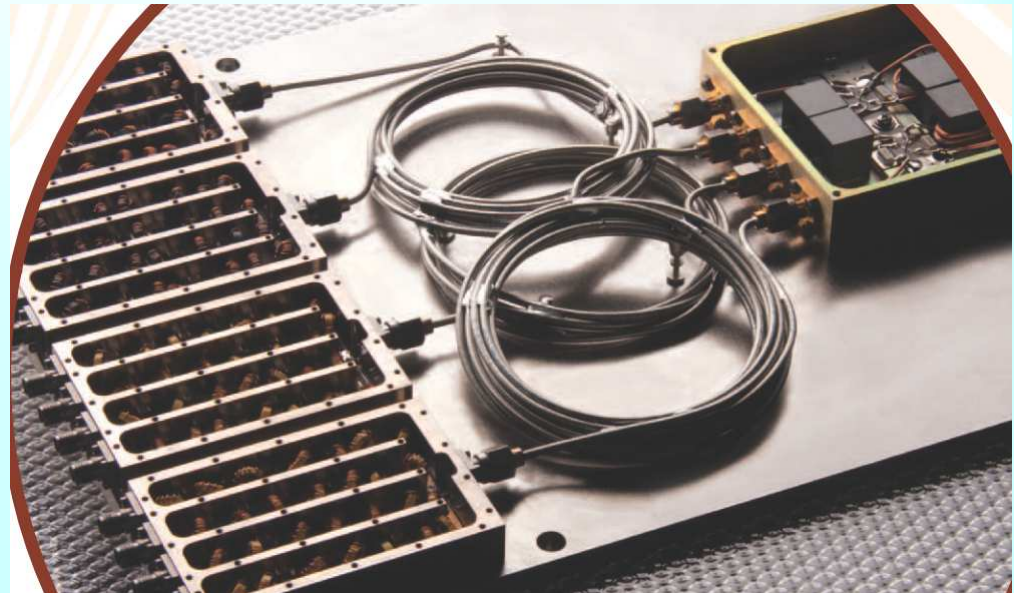
Инжењерска питања

- Опсег подешавања (**Tuning range**)
- Остварљив фреквенцијски опсег (**Achievable bandwidth**)
- Утицај нежељених спрега (**Effect of unwanted couplings**)
- Снага сигнала који се обрађује/филтрира (**Power handling requirement**)
- Осетљивост (**Sensitivities**)



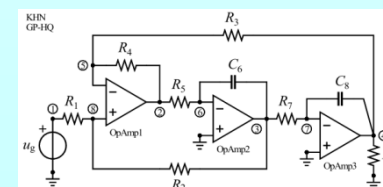
Филтри посебне намене

- Switched Filter Banks
- Diplexers
- Triplexers
- Multiplexers
- Equalizers



Технологије и фреквенције

- Дискретни калемови и кондензатори од неколико десетина Hz до неколико GHz
- Кристална решетка до око 250 MHz
- SAW до неколико GHz
- Хибридни хеликоидални до неколико GHz
- Водови од неколико GHz до око 100 GHz
- Диелектрични резонатори од неколико GHz до око 100 GHz
- Таласоводни у целом опсегу
- Активни до око 50 MHz
- Дигитални FIR, IIR до око 10 MHz (100 MHz ?)



Теоријска основа

- RF/Микроталасни филтри су **линеарне** временски **непроменљиве** микроталасне мреже па је могућа примена интегралних трансформација
- **Фазорска** трансформација, сигнали су **простопериодичне** функције времена на истој учестаности
- **Фуријеова** трансформација, сигнали су **апериодични** и дефинисани у сваком времену, а **нема** почетне енергије
- **Лапласова** трансформација, сигнали су **каузални** и **може** постојати почетна енергија

Функција мреже

- **Функција мреже** се дефинише за сваку од трансформација као количник трансформата два сигнала када нема почетне енергије и када делује само једна побуда
- **Трансфер функција** (функција преноса, преносна функција) је количник трансформата сигнала различитих приступа
- **Улазна функција** је количник трансформата сигнала истих приступа
- **Фреквенцијски одзив** је функција мреже за Фуријеову трансформацију
- **Фреквенцијске карактеристике** су графици модула и аргумента фреквенцијског одзива у функцији учестаности
- **Добитак** (Gain) је количник трансформата излазног сигнала и трансформата побуде
- **Слабљење** (Attenuation) је реципрочна функција добитка

Основне величине

$\underline{s} = \sigma + j\omega$, $\sigma \in R$, $\omega \in R$ Комплексна учестаност (Лапласова променљива)

$\underline{H}(s)$ Функција мреже за Лапласову трансформацију

$\underline{H}(j\omega)$ Фреквенцијски одзив (Функција мреже за Фуријеову трансформацију)

$M(\omega) = \text{abs}(\underline{H}(j\omega))$ Амплитудски одзив

$M_{\text{dB}}(\omega) = 20 \log_{10} M(\omega)$

$\Phi(\omega) = \text{arg}(\underline{H}(j\omega))$ Фазни одзив

Амплитудски одзив у dB

$\tau(\omega) = -\frac{d\Phi(\omega)}{d\omega}$ Групно кашњење

$\Phi_{\text{deg}}(\omega) = \frac{180}{\pi} \Phi(\omega)$

Фазни одзив у степенима

$f = \frac{\omega}{2\pi}$ Учестаност (Hz-frequency)

Величине се могу посматрати и као функције од f

Импулсни и одскочни одзив

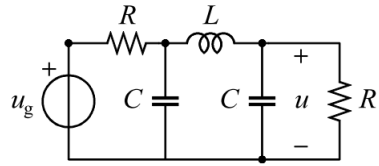
- **Импулсни одзив** је инверзна Лапласова трансформација трансфер функције, односно одзив филтра без почетне енергије у временском домену, на јединичну импулсну побуду (**Дираков** δ -импулс)
- Импулсни одзив је и инверзна Фуријеова трансформација фреквенцијског одзива
- **Одскочни одзив** је одзив филтра на јединичну одскочну побуду (**Хевисајдову** побуду)

Нуле и полови

- Трансфер функција филтра са концентрисаним елементима је рационална функција комплексне учестаности са реалним коефицијентима
- Нуле трансфер функције су нуле бројитеља
- Полови трансфер функције су нуле именитеља
- Фактор доброте (Q-фактор) комплексног пола
- Дефинише се и Q-фактор комплексне нуле

$$Q_{\text{pol}} = \frac{-\text{abs}(s_{\text{pol}})}{2 \text{Re}(s_{\text{pol}})}$$

Разликовати Q-фактор комплексног пола или нуле од фактора доброте резонатора!



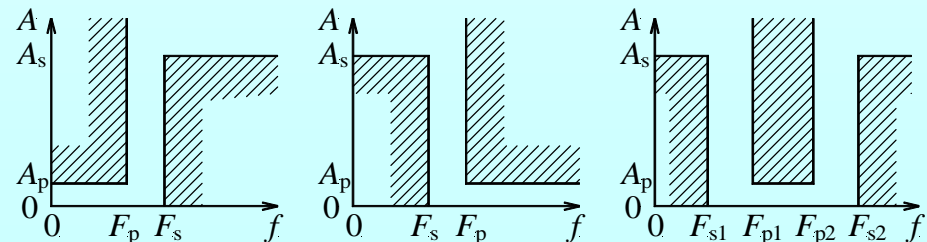
Пројектовање (design)

- Пројектовање (design) RF/микроталасног филтра је поступак од више корака (фаза, активности, задатака)
- **Спецификација**
- **Апроксимација** (e.g. Filter Solutions)
- **Реализација** (шема са идеалним елементима)
- Симулациони модел (микроталасно коло, тродимензионална електромагнетска структура, **circuit model**, **3D EM full wave model**)
- Рачунарска **симулација** (e.g. MWO, **WIPL-D Pro**)
- Проучавање несавршености (Study of imperfections)
- Подешавање (fine **tuning**, trimming)
- Оптимизација
- Поправка (корекција)
- **Имплементација**, лабораторијски прототип (фабрикација)
- **Мерење** (експериментална провера)
- Документација



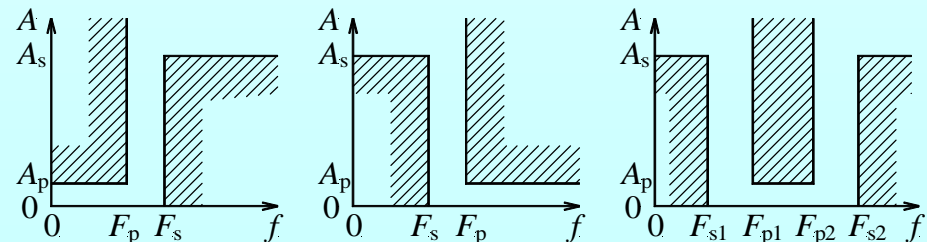
Спецификација (1)

- Скуп услова које филтар треба да задовољи
- Габарит, границе области у којој треба да буде фреквенцијска карактеристика
- Најчешће се задаје за амплитудску карактеристику, за слабљење, у децибелима, на осу учестаности



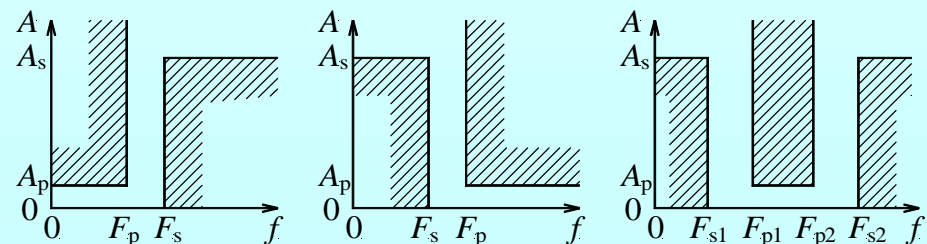
Спецификација (2)

- **Пропусни опсег (passband), највеће дозвољено слабљење**
- **Непропусни опсег (stopband), најмање дозвољено слабљење**
- **Прелазни опсег (transition), дефинише селективност**



Спецификација (3)

- Дефинишу се основне врсте филтара
- Пропусник ниских учестаности (**lowpass**, LP)
- Пропусник високих учестаности (**highpass**, HP)
- Пропусник опсега учестаности (**bandpass**, BP)
- Неропусник опсега учестаности (**bandstop**, BS, band reject, BR)
- Свепропусник учестаности (**allpass**, AP)



Спецификација (4)

- Стрмина карактеристике у прелазној области (slope, roll-off, skirt)
- Изразито велико слабљење буде на задатим учестаностима
- Габарит за фазну карактеристику
- Габарит за карактеристику групног кашњења
- Номиналне импедансе приступа

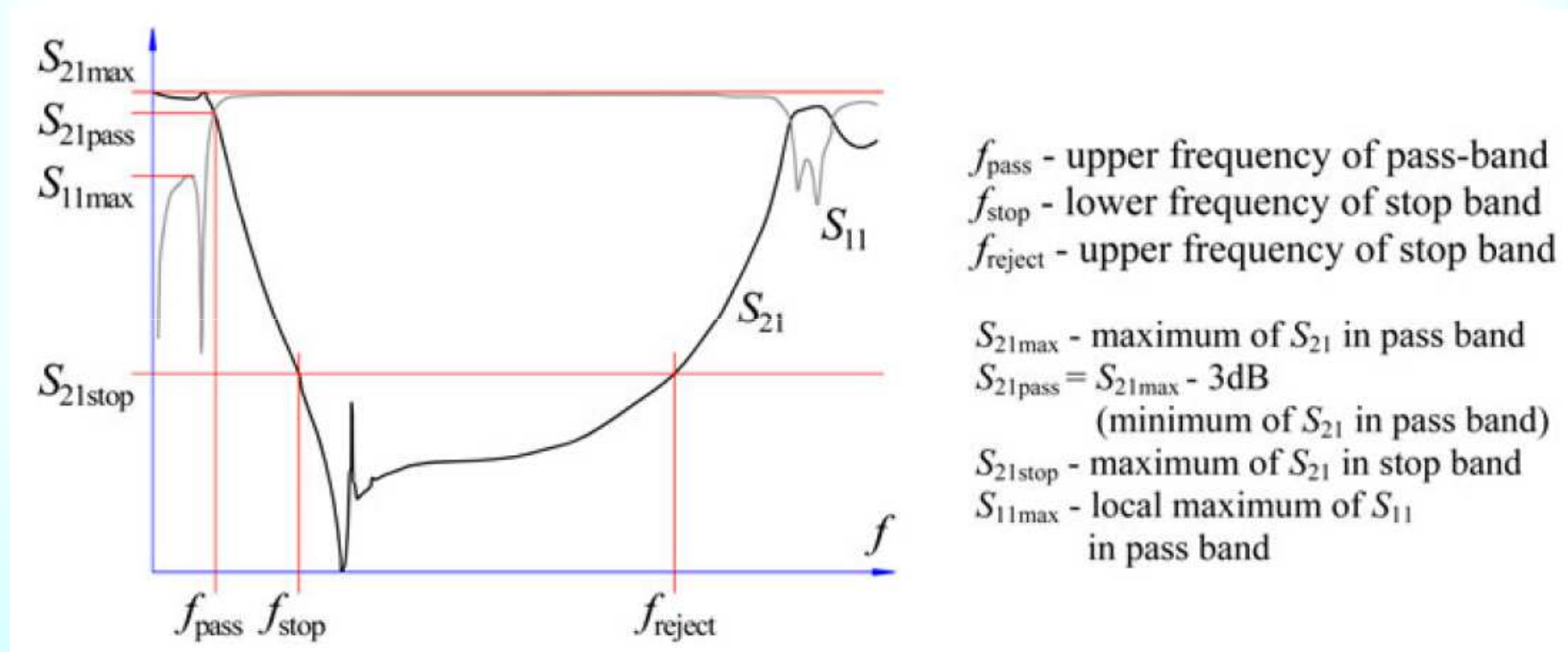
Спецификација (5)

- Габарит за параметре **расејања**
- Габарит за коефицијент стојећих таласа (voltage standing wave ratio, **VSWR**)
- Облик **импулсног** одзива
- Облик **одскочног** одзива
- **Пренапон** на елементима филтра
- Циљна **технологија**

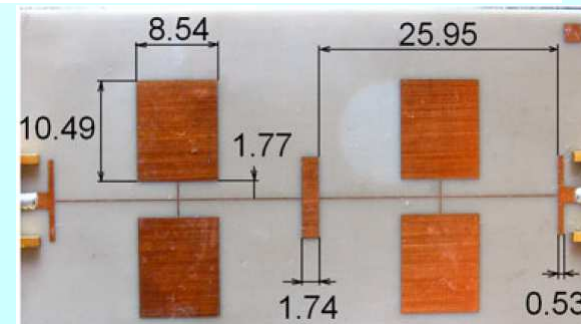
Спецификација (6)

- Микроклиматски услови (температурни опсег, притисак, влажност, ...)
- Захтевано посебно понашање (отпорност на пад, водоотпорност, отпорност на вибрације, ...)
- Снага улазног сигнала
- Дисипација компоненти (грејање, хлађење)
- Радни напони, струје, ЕМ поље
- Максимална величина филтра, footprint код планарне имплементације
- Буџет

Пример спецификације



Dusan A. Nestic, Branko M. Kolundzija, Dejan V. Tošić and Dario S. Jeremic,
Low-pass filter with deep and wide stop band and controllable rejection bandwidth,
International Journal of Microwave and Wireless Technologies,
vol. 7, no 2, pp. 141–149, April 2015. DOI: 10.1017/S1759078714000555
<http://dx.doi.org/10.1017/S1759078714000555>
ISSN: 1759-0795, URL: http://journals.cambridge.org/article_S1759078714000555



Апроксимација (1)

- Апроксимација је **аналитички** израз фреквенцијског одзива који задовољава спецификацију и може да се оствари у пракси
- Мора задовољити услов **каузалности**: импулсни одзив мора бити каузалан, тј. не може да почне пре побуде
- Уобичајено је да се апроксимација прво тражи као функција која се може остварити мрежама са идеалним кондензаторима и калемовима

Апроксимација (2)

- Апроксимација се често изражава као слабљење у dB
- Задаје се, по правилу, за филтар пропусник ниских учестаности (ФПНУ)
- Из апроксимације ФПНУ се могу извести апроксимације за остале врсте филтара (пропуснике високих учестаности, пропуснике опсега учестаности, ...)

Апроксимација (3)

- Батервортова (Butterworth)
- Чебишевљева (Chebyshev, Tschebyscheff)
- Елиптичка или Кауерова (Cauer)
- Беселова (Bessel)
- Гаусова (Gauss)
- Лежандрова (Legendre)
- „подигнути косинус“, ...

Апроксимација (4)

- Амплитудски и фазни одзив су међусобно зависни
- Селективан амплитудски одзив по правилу значи неравномерније групно кашњење и обрнуто
- Стрма амплитудска карактеристика условљава велике варијације групног кашњења.

Апроксимација (5)

- ✱ Апроксимација је функција која је приближна жељеној функцији мреже
- ✱ Апроксимација је аналитички израз којим апроксимирамо фреквенцијску карактеристику филтра
- ✱ Апроксимација се најчешће тражи за амплитудску карактеристику филтра

Апроксимација: Мотив

- ❄ Ретко можемо остварити филтер који има задату (специфицирану) фреквенцијску карактеристику
- ❄ Специфицирану карактеристику замењујемо другом функцијом која се приближно мења као и задата (жељена) фреквенцијска карактеристика

Основне апроксимације

$$\text{ButterworthMagnitude}[n_, \omega_] := \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^{2n}}}$$

$$\text{ChebyshevMagnitude}[n_, \epsilon_, \omega_] :=$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 \text{ChebyshevT}[n, \omega]^2}}$$

$$\text{EllipticMagnitude}[n_, \epsilon_, \xi_, \omega_] :=$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 \text{EllipticRationalFunction}[n, \xi, \omega]^2}}$$

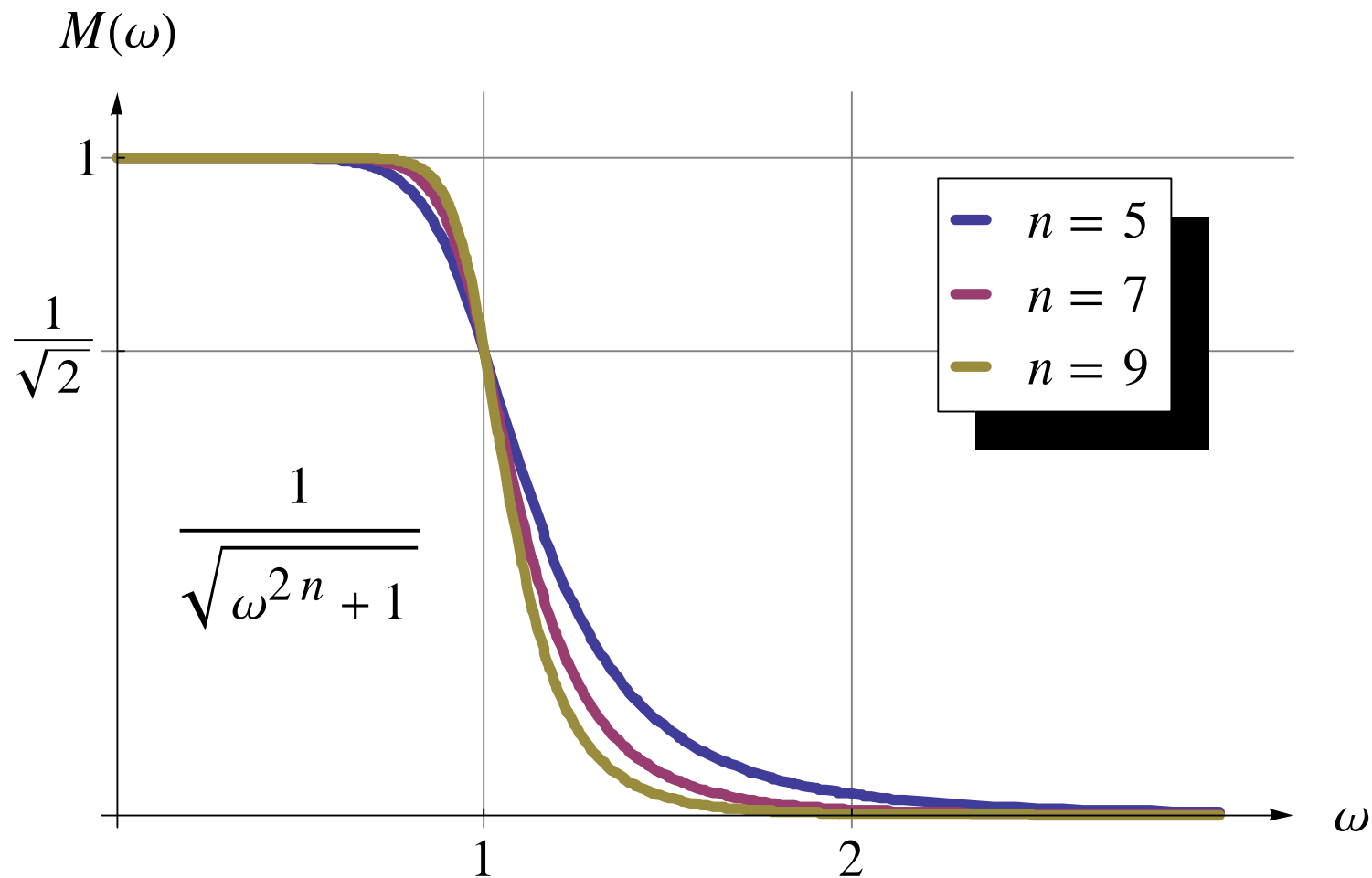
Остале апроксимације ...

LegendreMagnitude [n _, ϵ _, ω _] :=

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 \text{LegendreP}[n, \omega]^2}}$$

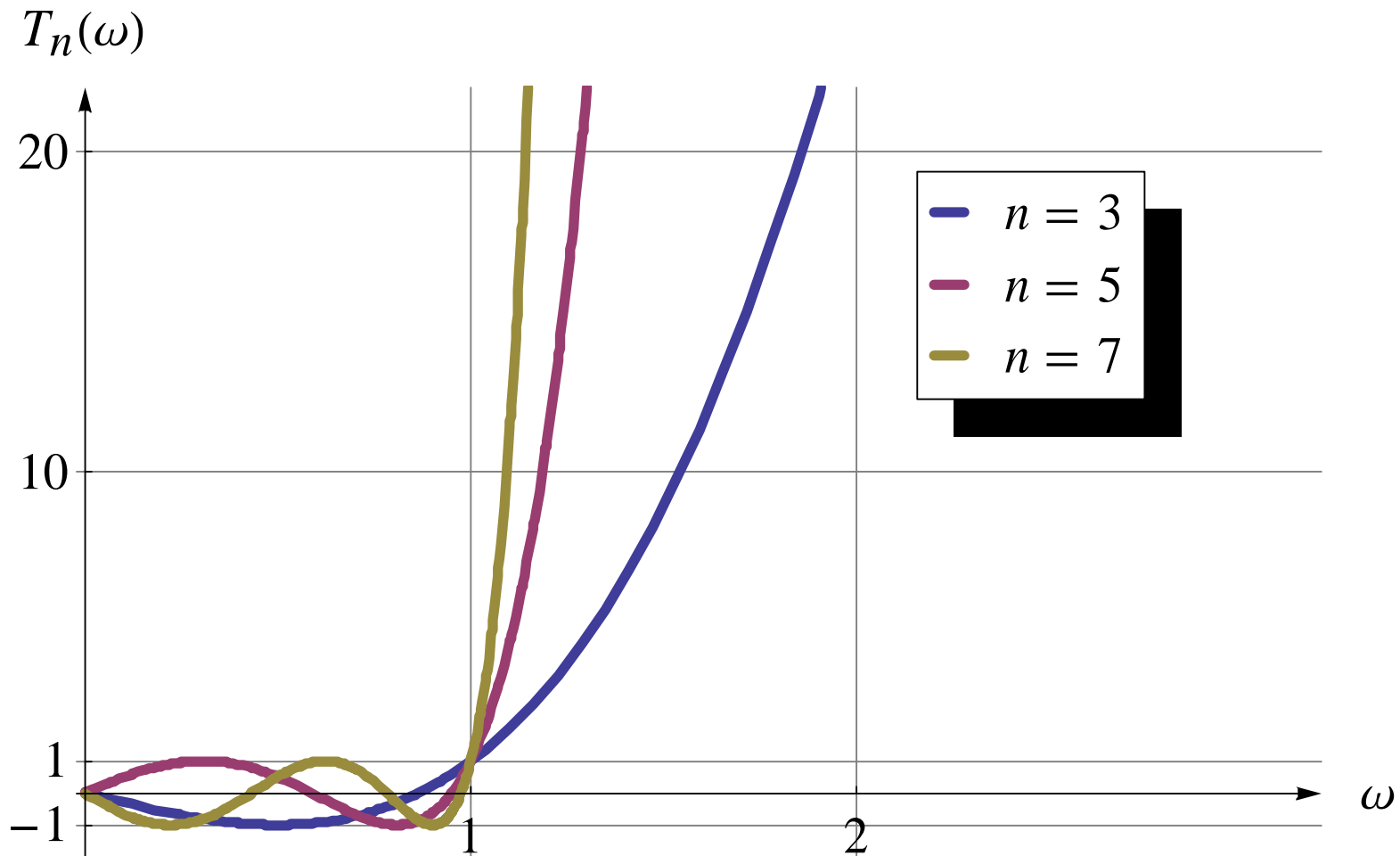
Батервортова апроксимација

Butterworth Approximation



Чебишевљево полином (1)

Chebyshev Polynomial



Чебишевљеви полиноми (1)

$$T_1(x) = x$$

$$T_2(x) = 2x^2 - 1$$

$$T_3(x) = 4x^3 - 3x$$

$$T_4(x) = 8x^4 - 8x^2 + 1$$

$$T_5(x) = 16x^5 - 20x^3 + 5x$$

$$T_6(x) = 32x^6 - 48x^4 + 18x^2 - 1$$

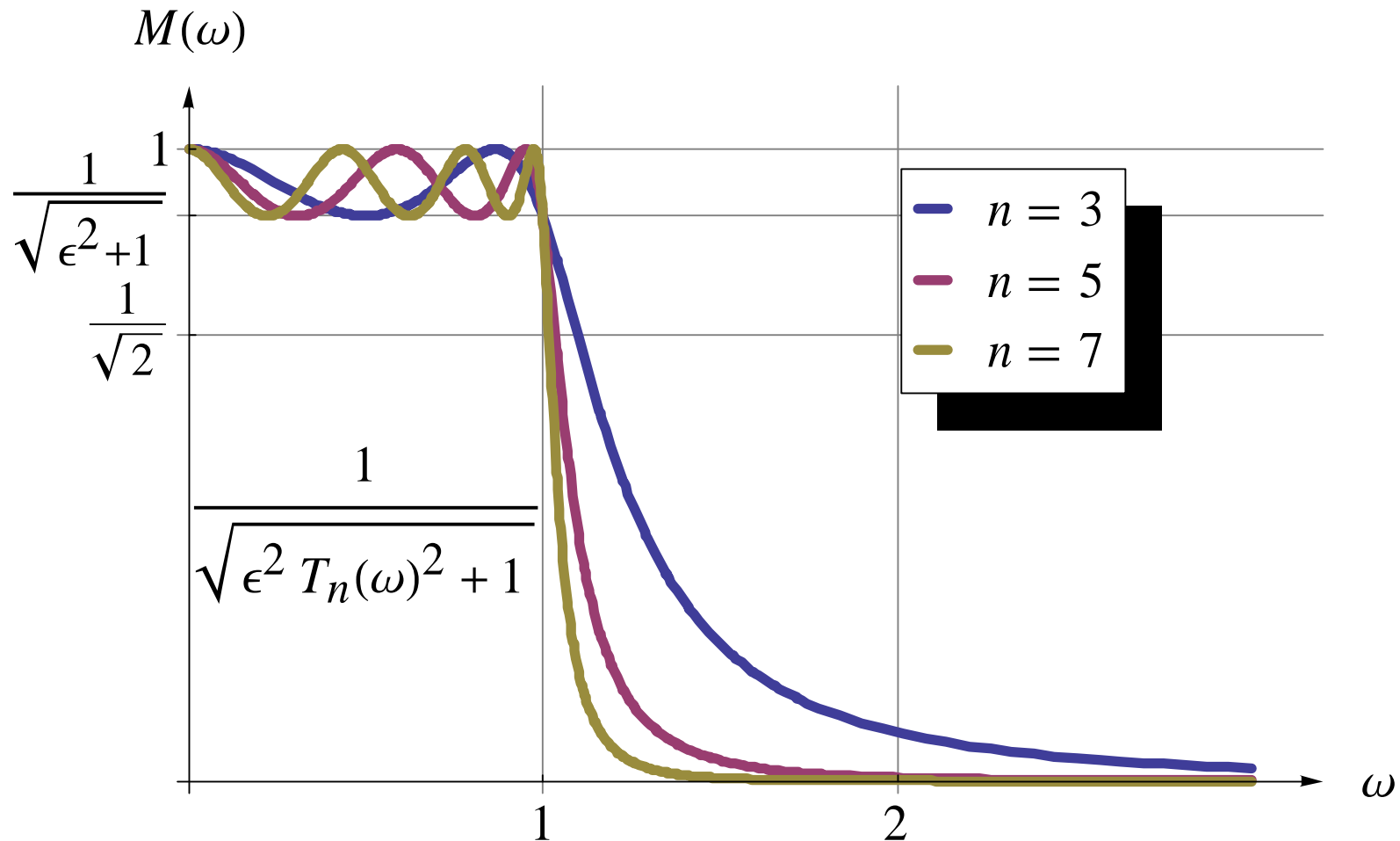
$$T_7(x) = 64x^7 - 112x^5 + 56x^3 - 7x$$

$$T_8(x) = 128x^8 - 256x^6 + 160x^4 - 32x^2 + 1$$

$$T_9(x) = 256x^9 - 576x^7 + 432x^5 - 120x^3 + 9x$$

Чебишевљева апроксимација I

Chebyshev Approximation, $\epsilon = 0.5$

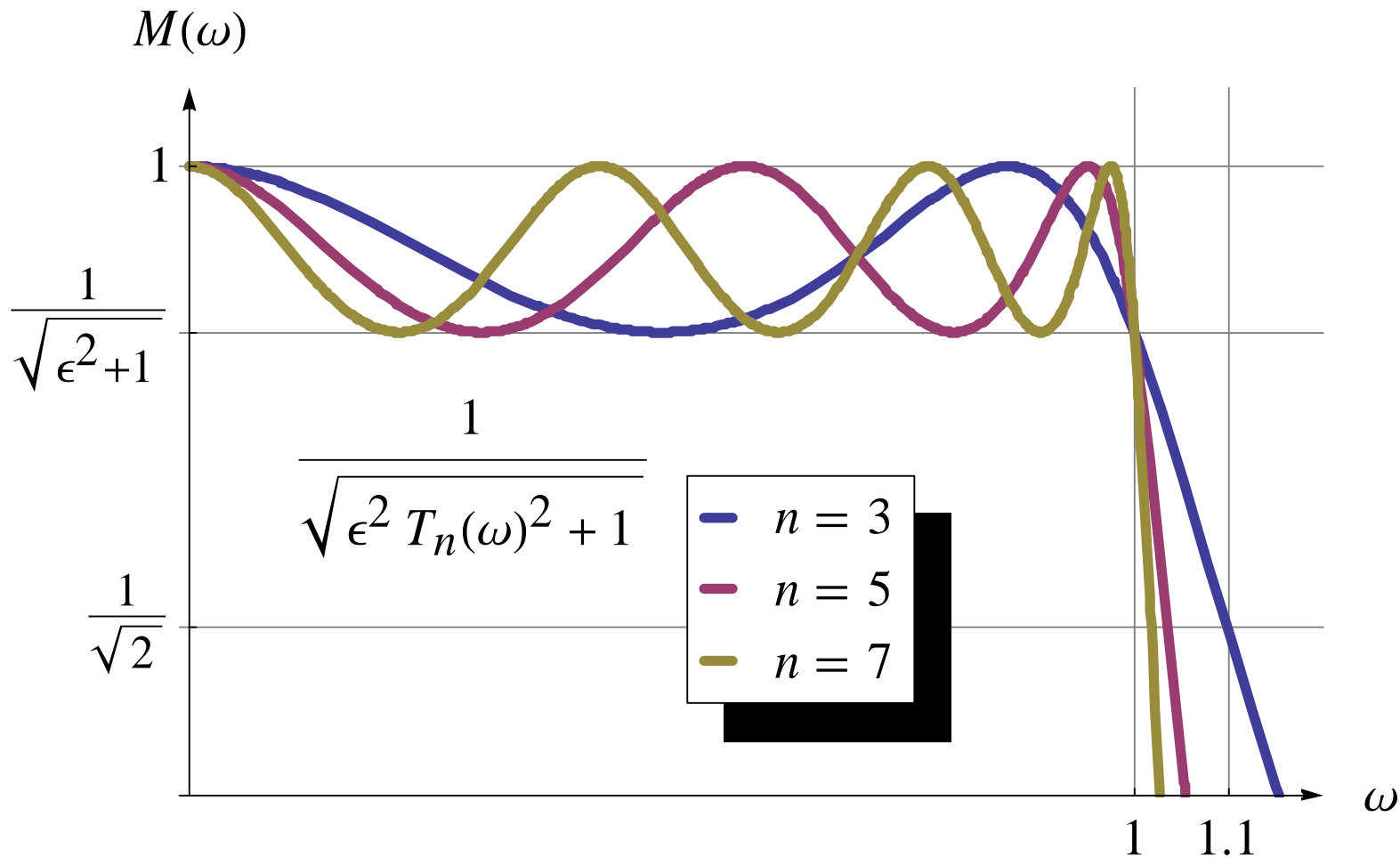


$$-20 \text{Log} \left[10, \frac{1}{\sqrt{1 + 0.5^2}} \right]$$

0.9691

Чебишевљева апроксимација II

Chebyshev Approximation, $\epsilon = 0.5$

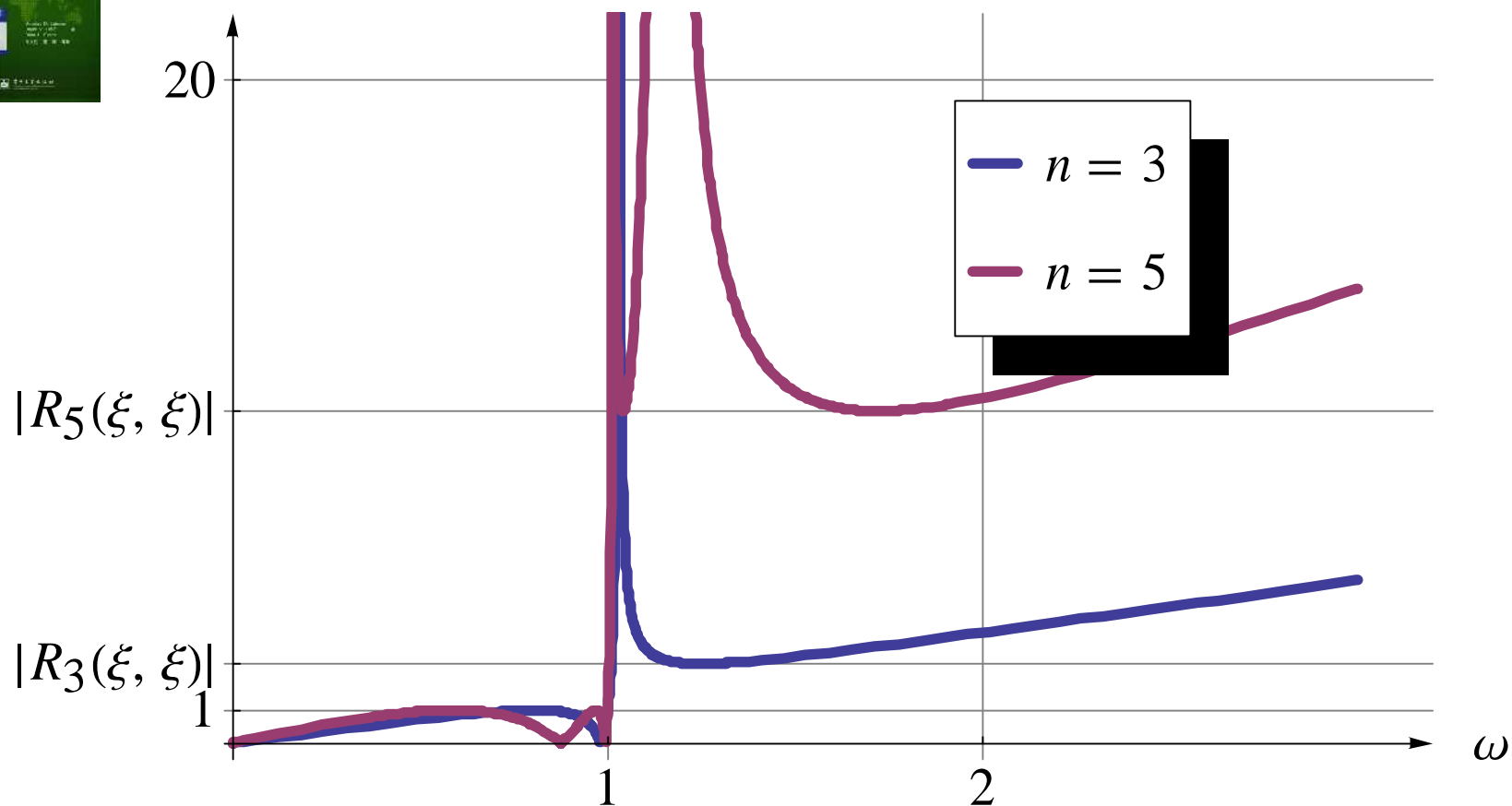


Елиптичка рационална функција 1

Elliptic Rational Function, $\xi = 1.01$



$|R_n(\xi, \omega)|$



Елиптичка рационална функција 2



$$R_1(1.01, \omega) = \omega$$

$$R_2(1.01, \omega) = \frac{1.14037 \omega^2 - 1.}{1. - 0.859629 \omega^2}$$

$$R_3(1.01, \omega) = \frac{1.52493 \omega^3 - 1.46976 \omega}{1. - 0.944831 \omega^2}$$

$$R_4(1.01, \omega) = \frac{1.41599 \omega^4 - 2.06013 \omega^2 + 0.657086}{0.293022 \omega^4 - 0.93716 \omega^2 + 0.657086}$$

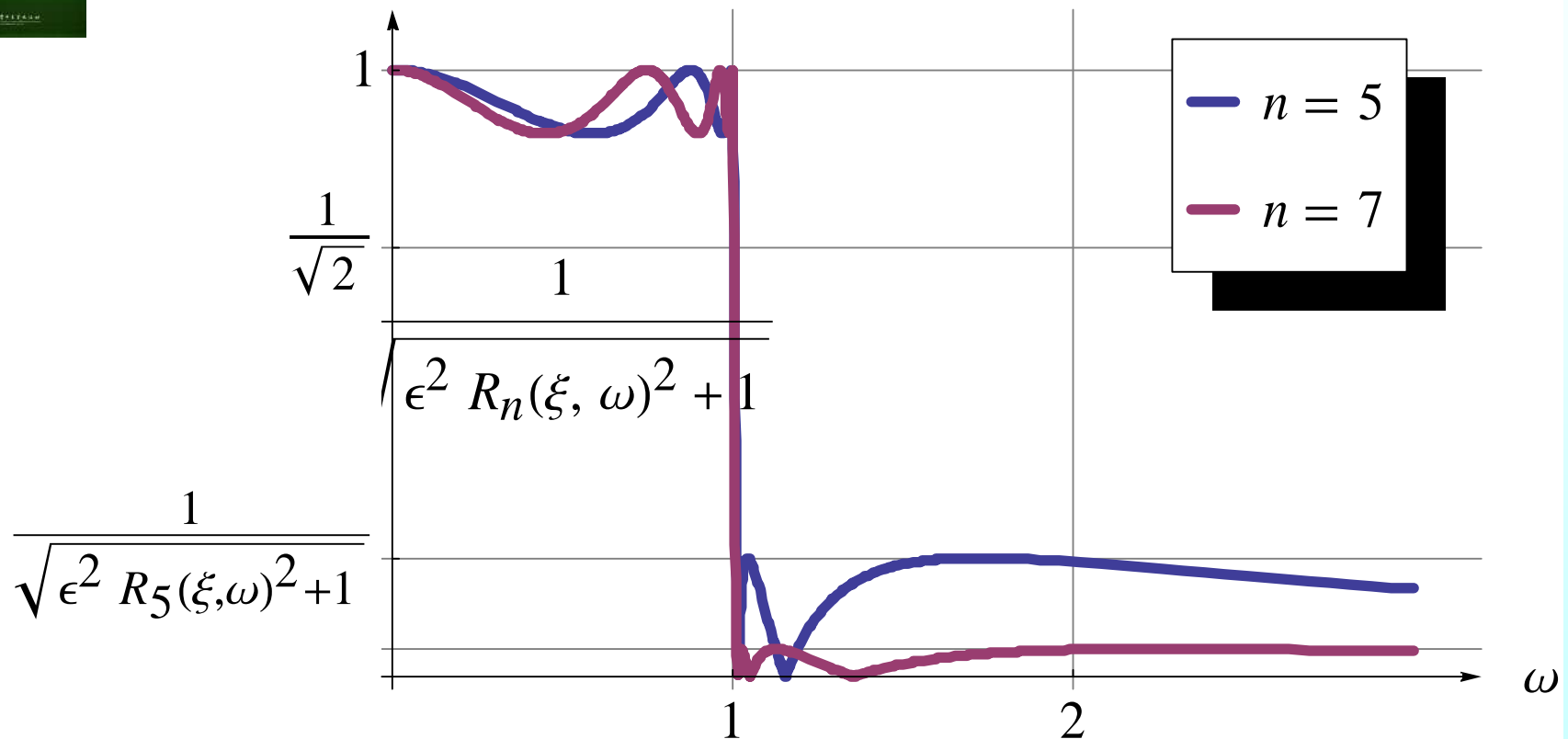
$$R_5(1.01, \omega) = \frac{4.2356 \omega^5 - 7.43855 \omega^3 + 3.2131 \omega}{\omega^4 - 2.3616 \omega^2 + 1.37175}$$

Елиптичка рационална функција 3



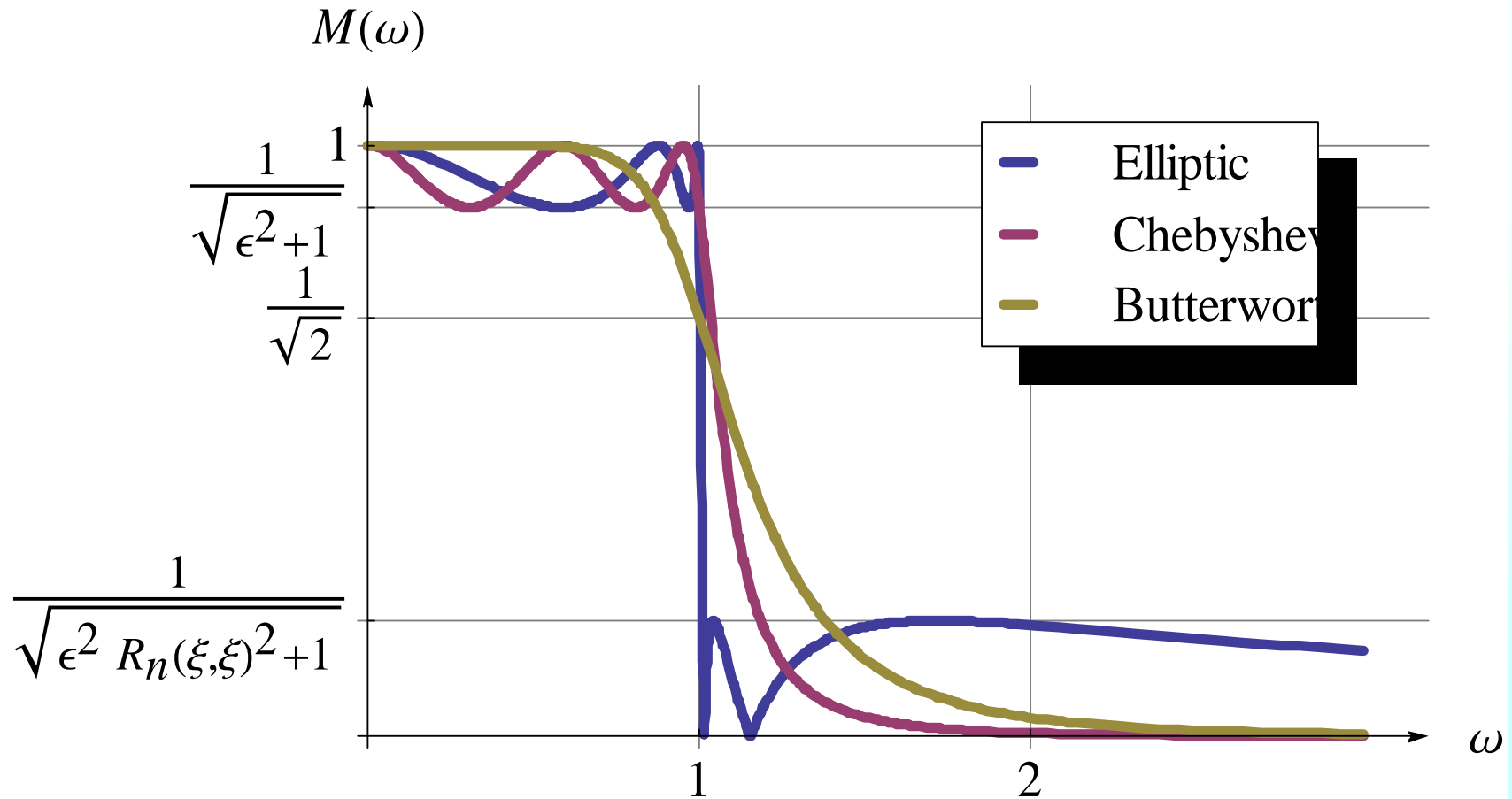
Elliptic Approximation, $\epsilon = 0.5$, $\xi = 1.01$

$M(\omega)$



Поређење апроксимација

$$n = 5, \epsilon = 0.5, \xi = 1.01$$



Лежандрови полиноми

$$P_1(x) = x$$

$$P_2(x) = \frac{1}{2} (3x^2 - 1)$$

$$P_3(x) = \frac{1}{2} (5x^3 - 3x)$$

$$P_4(x) = \frac{1}{8} (35x^4 - 30x^2 + 3)$$

$$P_5(x) = \frac{1}{8} (63x^5 - 70x^3 + 15x)$$

$$P_6(x) = \frac{1}{16} (231x^6 - 315x^4 + 105x^2 - 5)$$

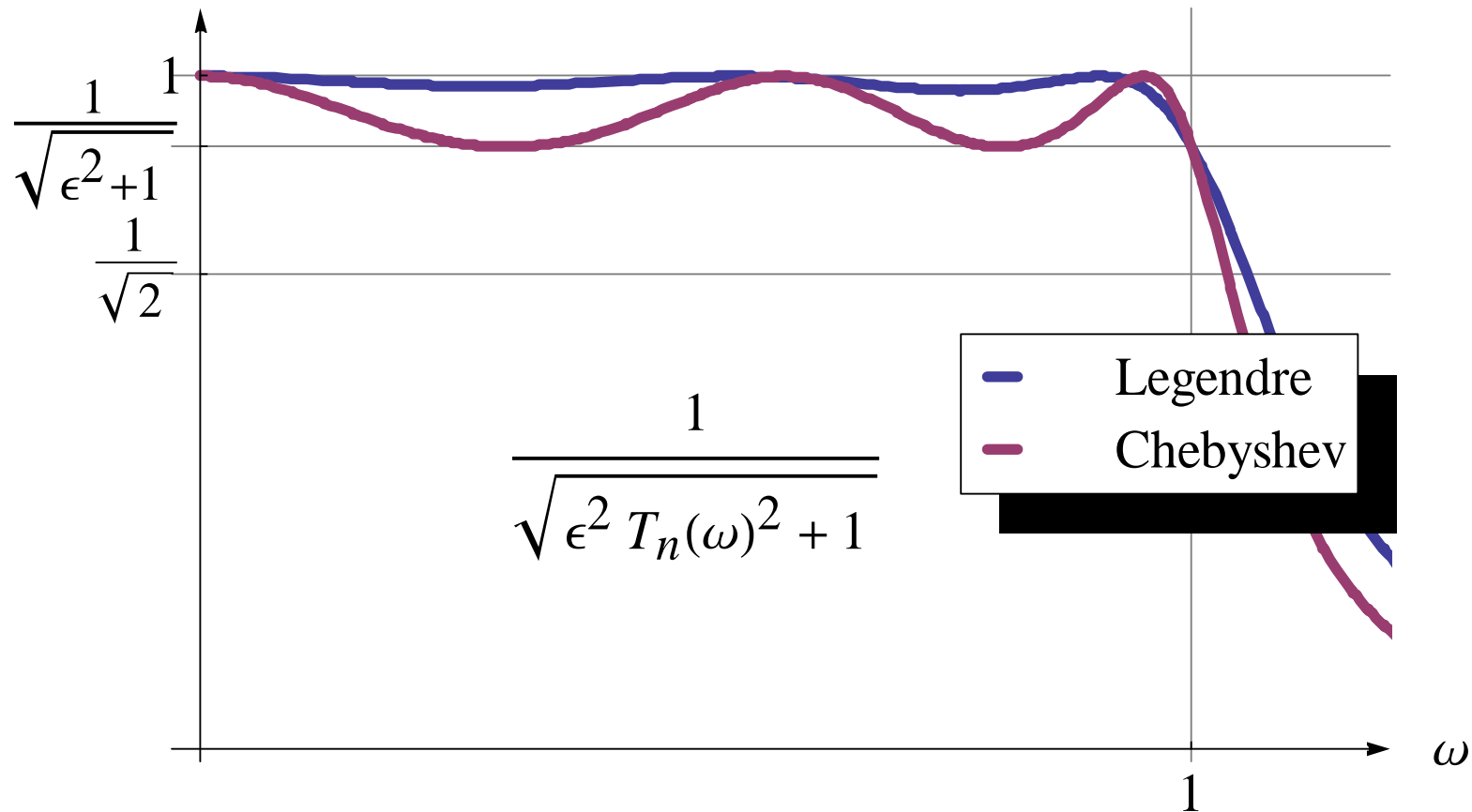
$$P_7(x) = \frac{1}{16} (429x^7 - 693x^5 + 315x^3 - 35x)$$

$$P_8(x) = \frac{1}{128} (6435x^8 - 12012x^6 + 6930x^4 - 1260x^2 + 35)$$

$$P_9(x) = \frac{1}{128} (12155x^9 - 25740x^7 + 18018x^5 - 4620x^3 + 315x)$$

Лежандрова апроксимација

Legendre & Chebyshev Approximation, $\epsilon = 0.5$
 $M(\omega)$



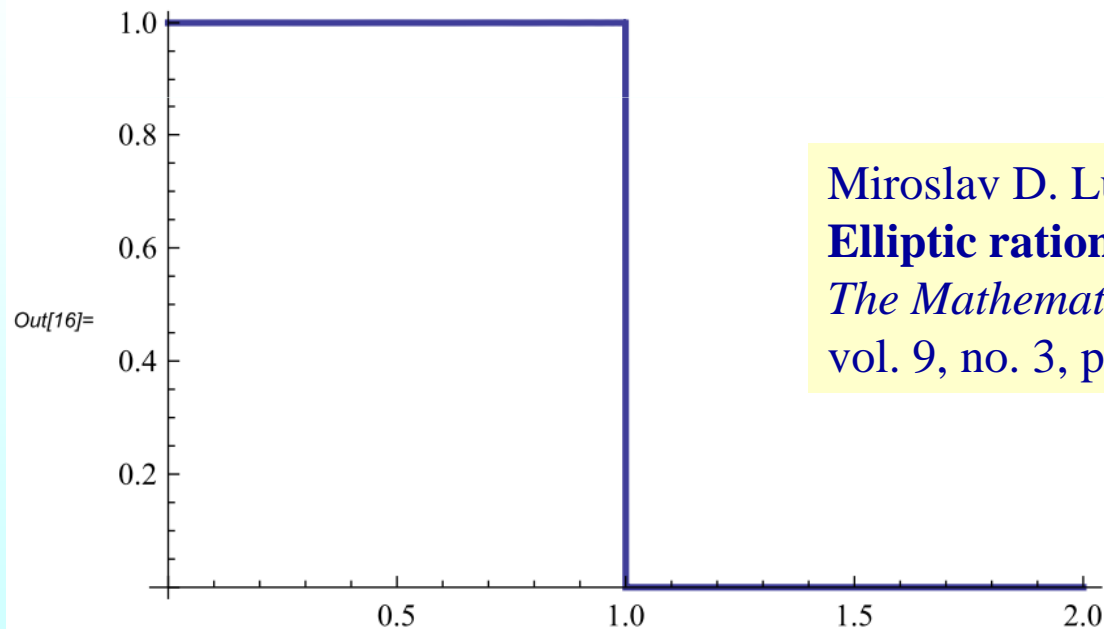
Одређивање апроксимација

- ✱ Аутоматизовано у софтверским алатима
- ✱ Треба разумети значење параметара апроксимације
- ✱ Имплементирани филтер **увек** има амплитудску карактеристику која **одступа** од апроксимације (због несавршености, губитака, ...)

Елиптичка рационална функција



```
In[16]:= With[{ε = 0.01, n = 32, ξ = 1.0001},  
Plot[ $\frac{1}{1 + \epsilon^2 \text{EllipticRationalFunction}[n, \xi, x]^2}$ ,  
{x, 0, 2}, PlotStyle -> {Thickness[0.007]}]]
```



Miroslav D. Lutovac, Dejan V. Tošić,
Elliptic rational functions,
The Mathematica Journal,
vol. 9, no. 3, pp. 598-608, 2005.

<http://mathworld.wolfram.com/EllipticRationalFunction.html>
http://en.wikipedia.org/wiki/Elliptic_rational_functions

Реализација

- Реализација је шема филтра са **идеалним** елементима: кондензатор, калем, отпорник, трансформатор, одсечак вода (stub), огранак вода (transmission line section) и одсечак спрегнутих водова (coupled lines)
- Реализација остварује трансфер функцију одређену апроксимацијом и везу елемената (топологију) подесну за имплементацију

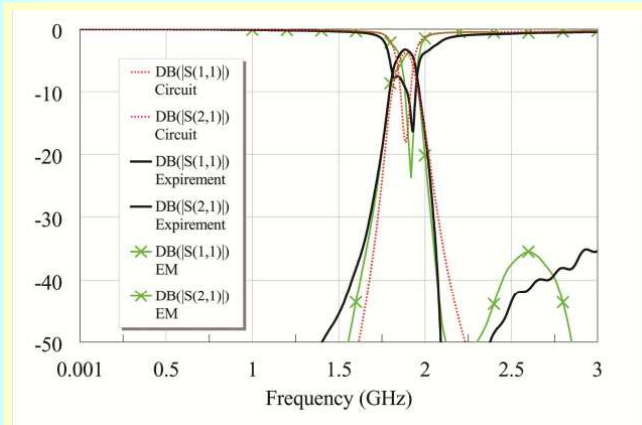
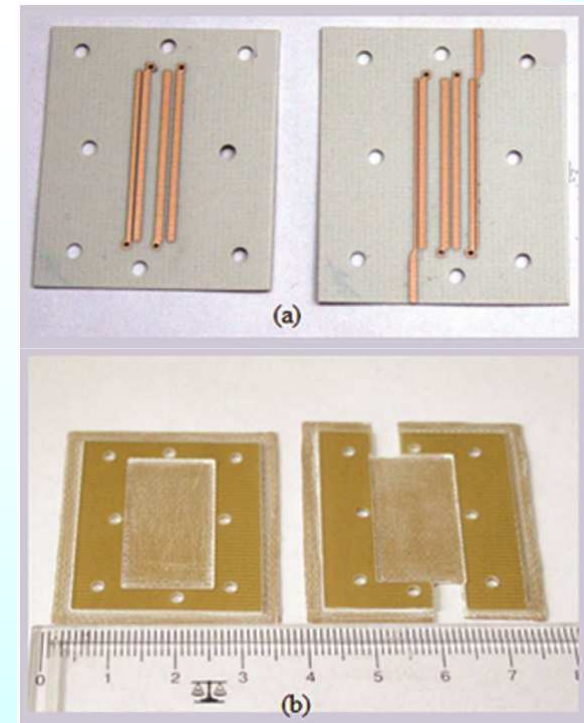
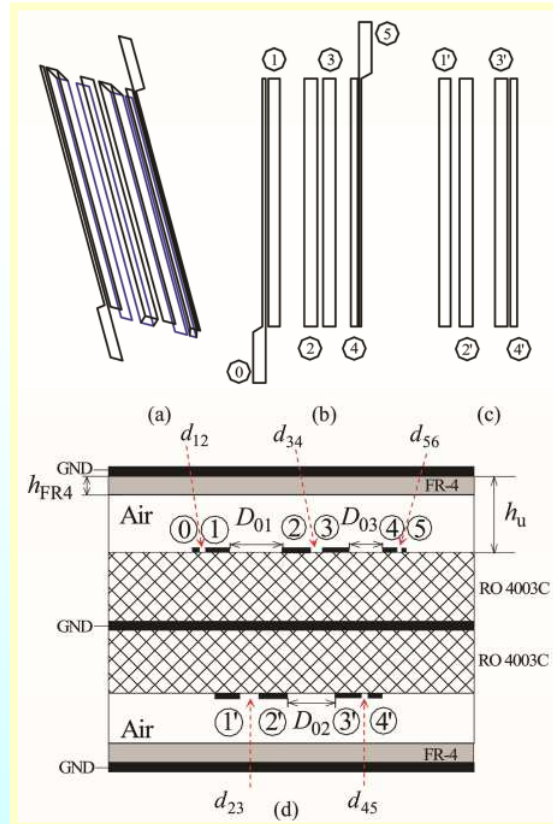
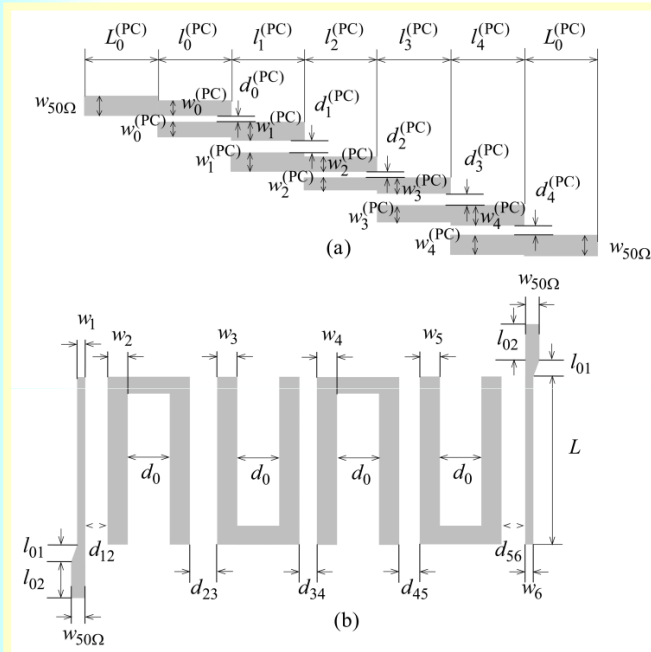
Синтеза

- Апроксимација и изведена шема са **идеалним елементима**
- Добија се из апроксимације **систематским поступком**
- Развијена за филтре са **дискретним калемовима и кондензаторима**

Имплементација

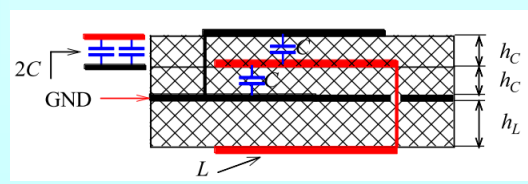
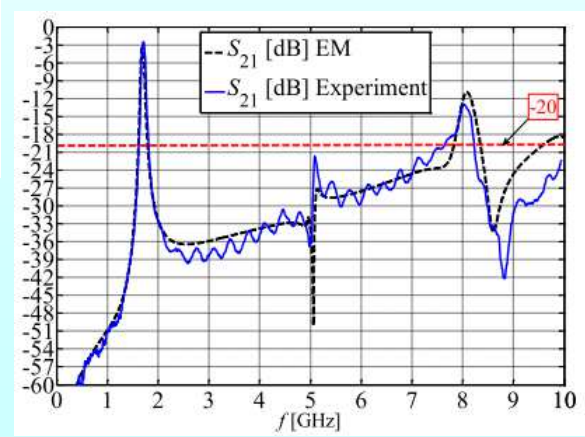
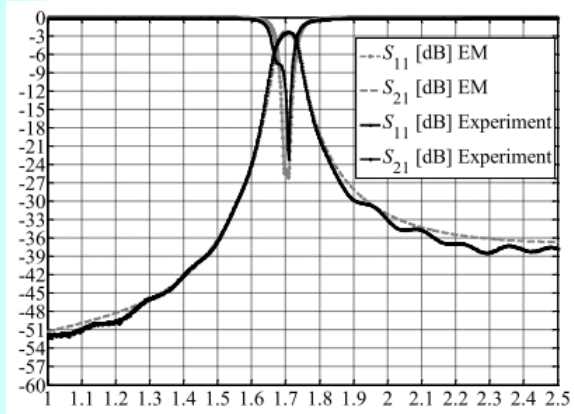
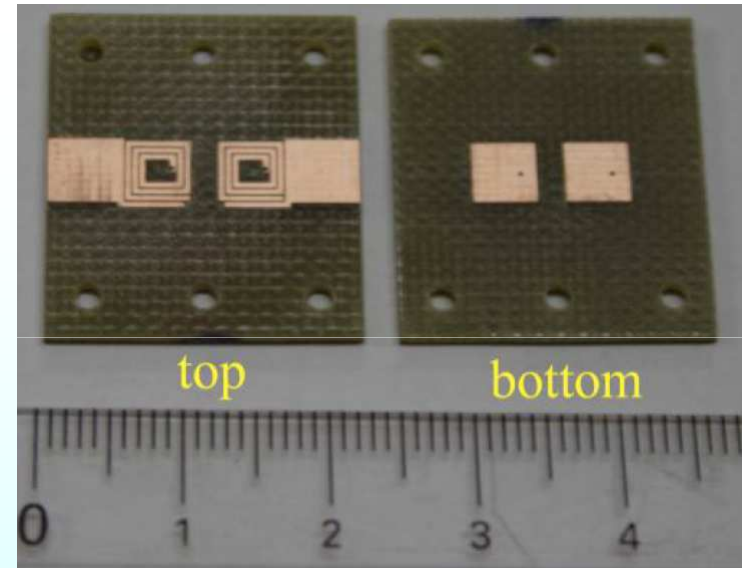
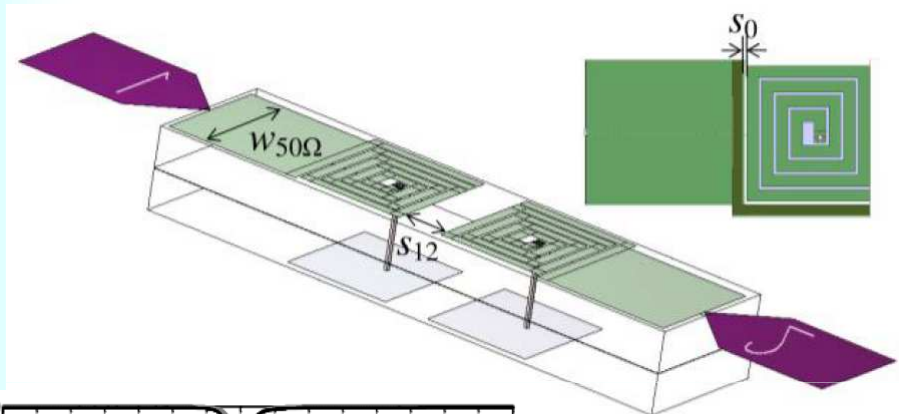
- Физичка направа (**хардвер**)
конструисана из шеме са идеалним елементима, а у циљној технологији
- Лабораторијски прототип филтра
- Познавање **технологија** и **тржишта**
компоненти је пресудно за учинковиту и делотворну имплементацију филтра

Пример имплементације (1)



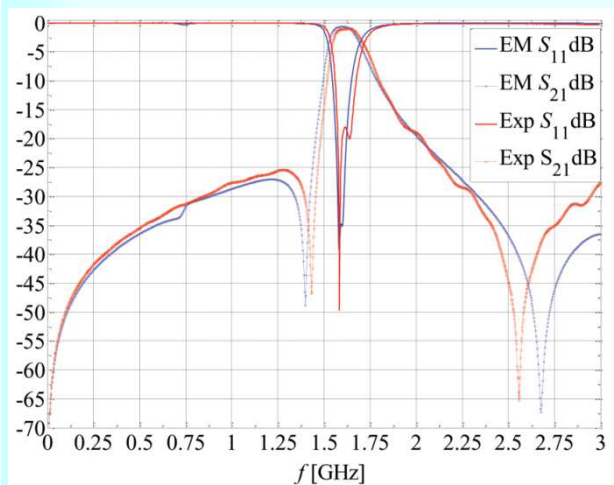
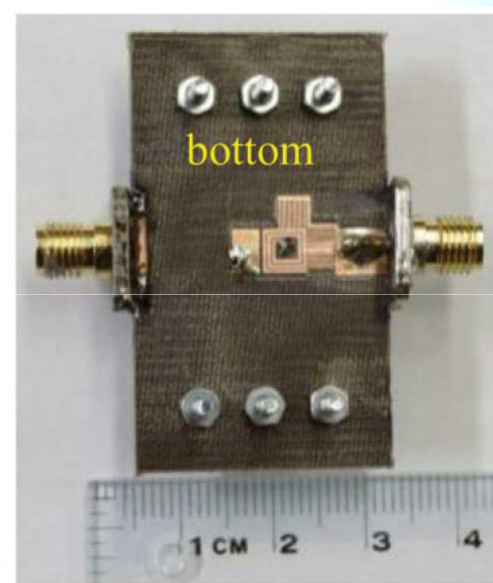
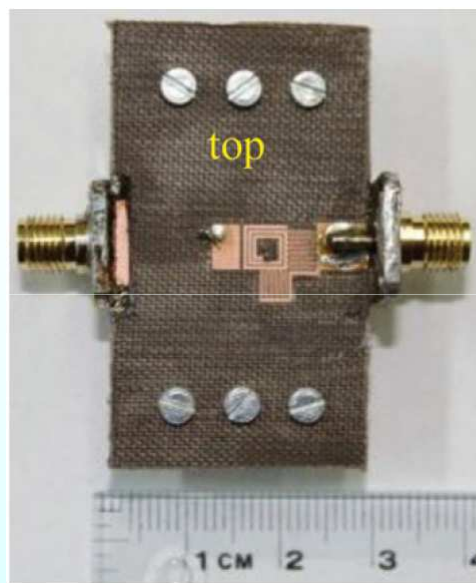
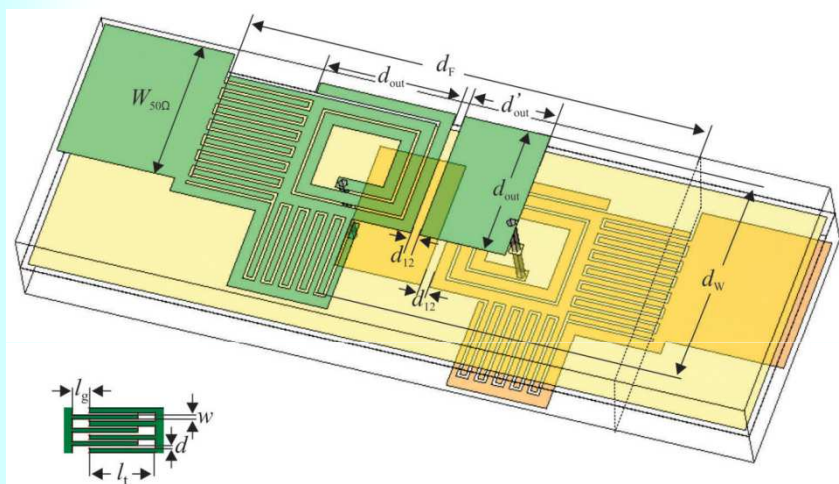
Dejan V. Tošić, Milka Potrebić, **Compact Multilayer Bandpass Filter with Modified Hairpin Resonators**, *Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials*, vol. 42, no. 2, pp. 123–130, 2012.

Пример имплементације (2)



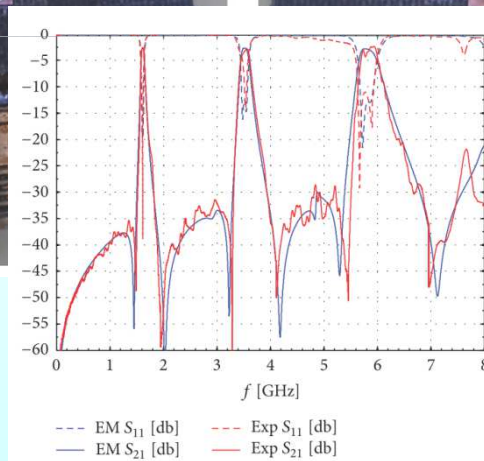
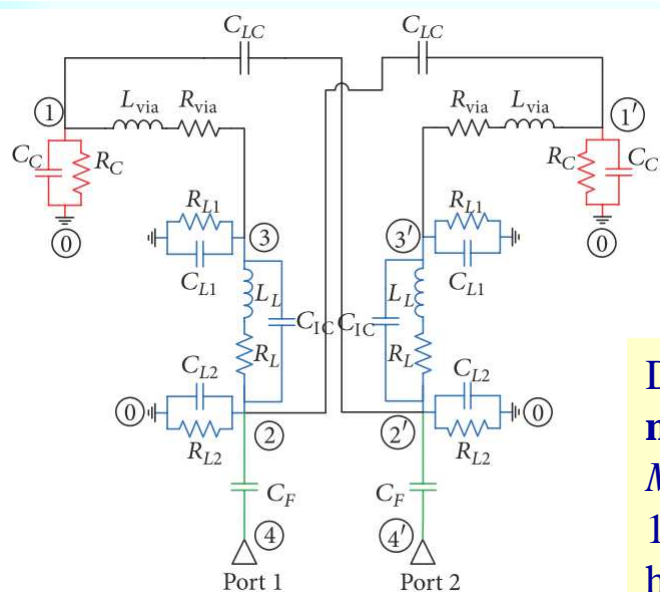
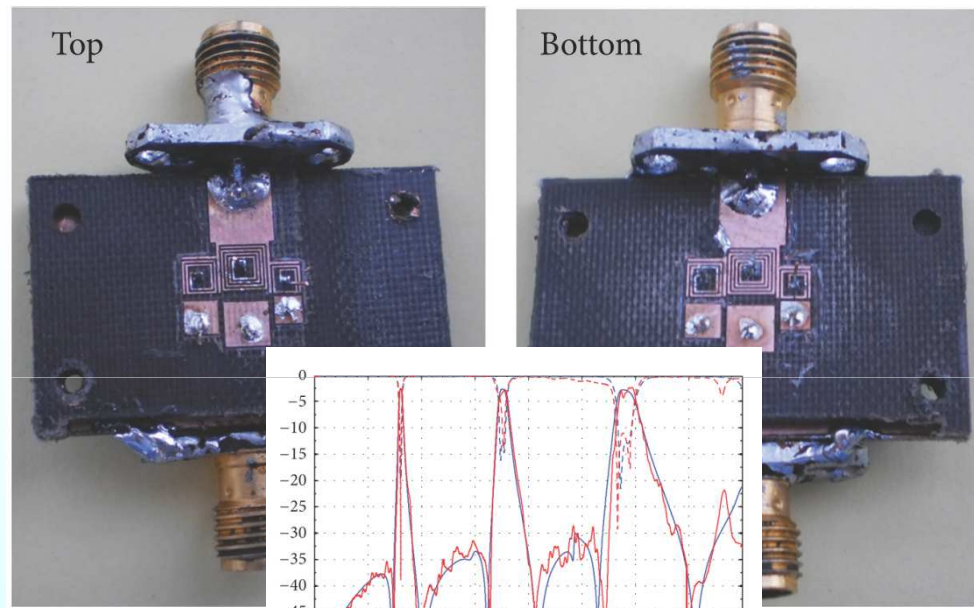
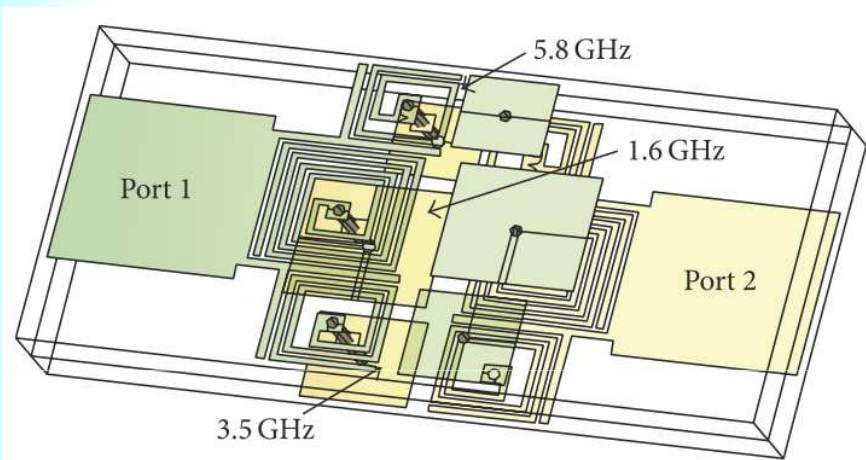
Milka M. Potrebić, Dejan V. Tošić,
**A novel design of a compact
multilayer resonator using double-
sided microstrip**, *Optoelectronics
And Advanced Materials – Rapid
Communications*, vol. 6, no. 3-4,
pp. 441-445, March-April 2012.

Пример имплементације (3)



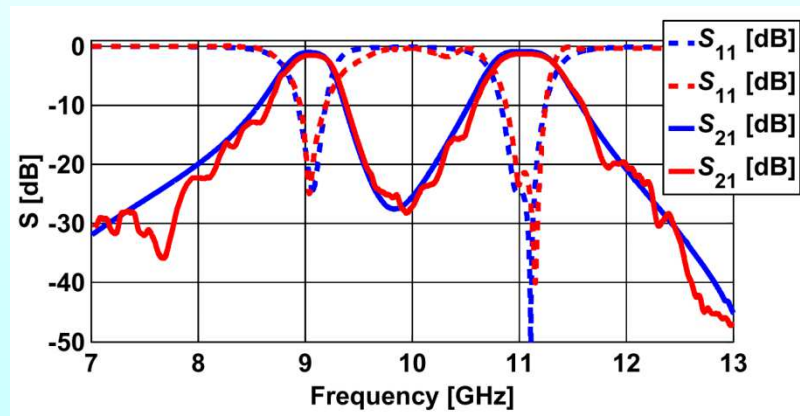
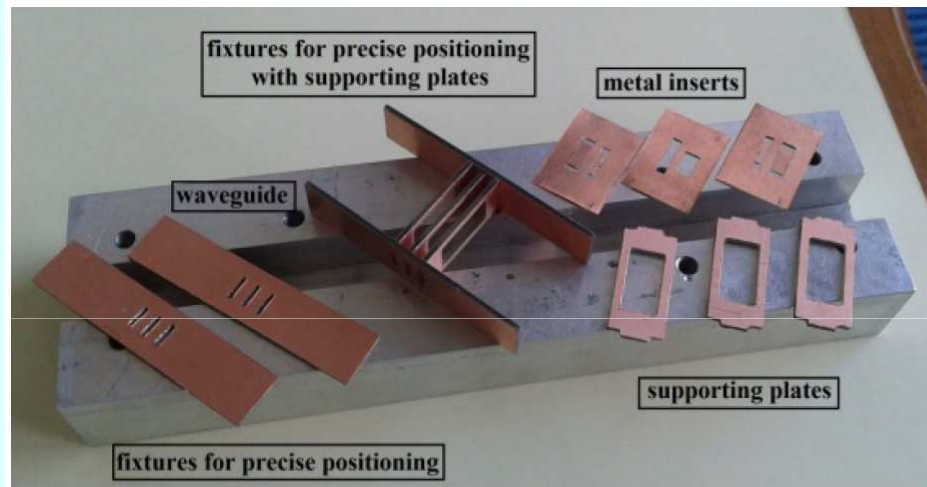
Dejan M. Miljanović, Milka M. Potrebić Dejan V. Tošić, Zoran Stamenković, **Design of miniaturized bandpass filters using quasi-lumped multilayer resonators**, *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, vol. 23, no. 6, pp. 1450083 (21 pages), July 2014. DOI: 10.1142/S0218126614500832, ISSN: 0218-1266, <http://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142/S0218126614500832>

Пример имплементације (4)



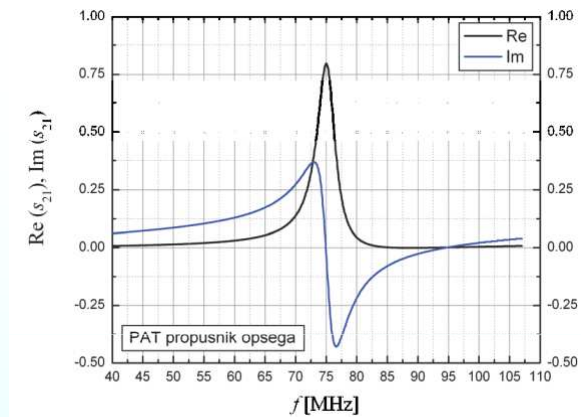
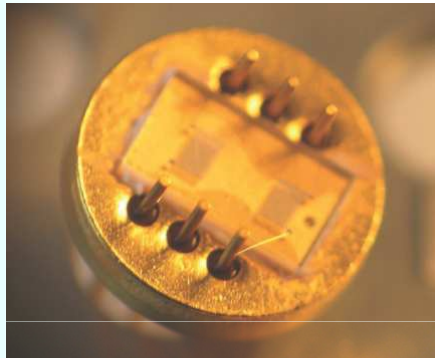
Dejan M. Miljanović, Milka M. Potrebić Dejan V. Tošić, **Design of microwave multibandpass filters with quasilumped resonators**, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, Article ID 647302, 14 pages, 2015. doi:10.1155/2015/647302 [online] <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2015/647302/>

Пример имплементације (5)



Snežana. Lj. Stefanovski, Milka M. Potrebić Dejan V. Tošić, Zoran Stamenković, **Compact dual-band bandpass waveguide filter with H-plane inserts**, *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, vol. 25, no. 2, pp. 1640015 (18 pages), July 2016.

Пример имплементације SAW

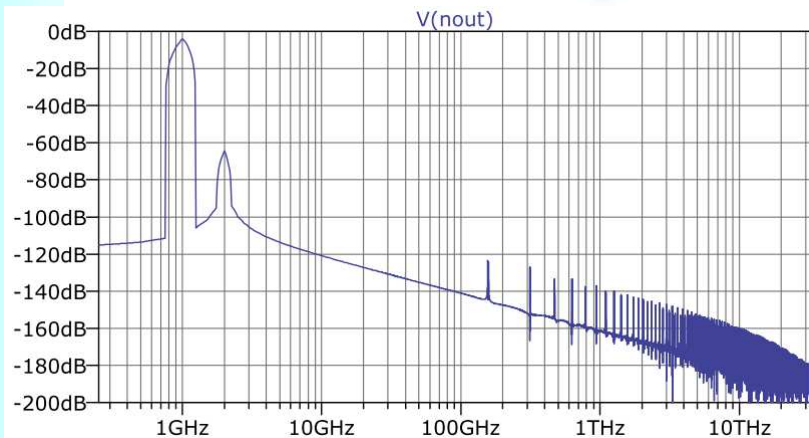
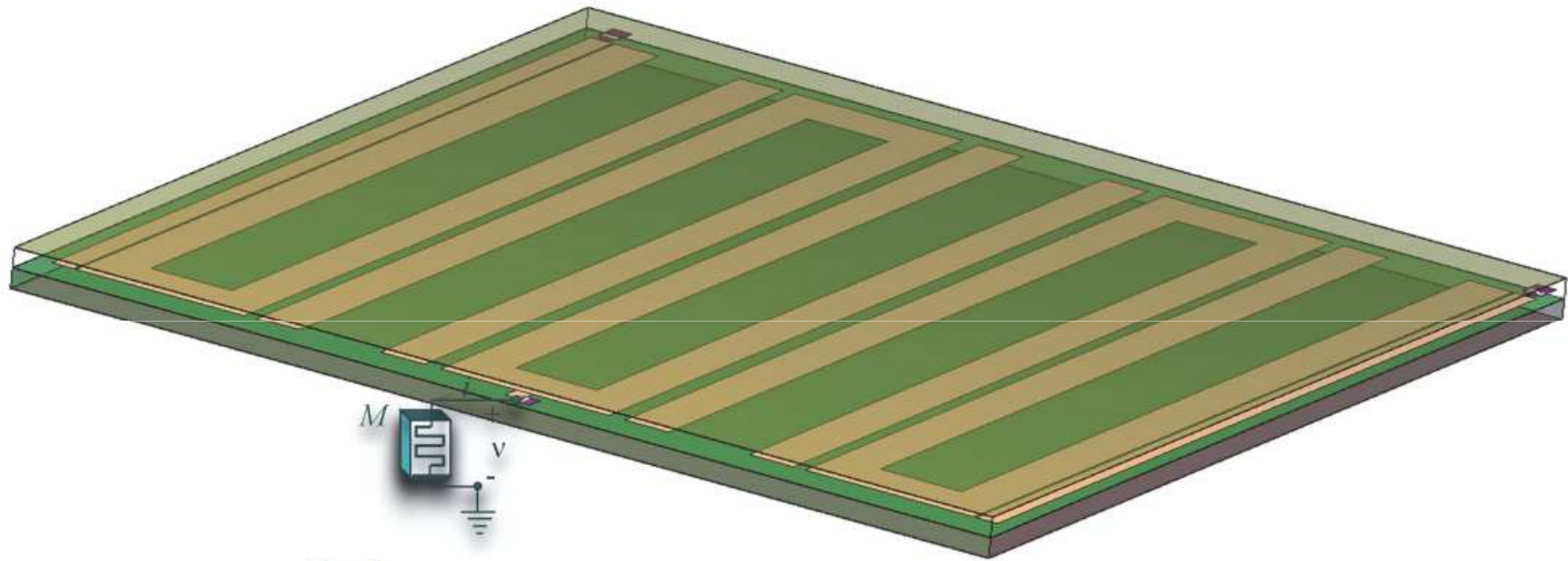


Dejan V. Tošić, Marija F. Hribšek, **Modelling and wave velocity calculation of multilayer structure SAW sensors**, *Microelectronics International*, vol. 28, no. 2, pp. 3-7, 2011. ISSN: 1356-5362

Marija Hribšek, Dejan Tošić, **Analysis and modeling of surface acoustic wave chemical vapor sensors**, Chapter 16, pp. 359-376, Don Dissanayake (Editor), *Acoustic Waves*, Sciyo, 2010. ISBN: 978-953-307-111-4, [online] <http://www.intechopen.com/articles/show/title/analysis-and-modeling-of-surface-acoustic-wave-chemical-vapor-sensors>

Zdravko Živković, Marija Hribšek, Dejan Tošić, **Modeling of surface acoustic wave chemical vapor sensors**, *Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials*, vol. 39, no. 2, pp. 111-117, 2009. ISSN: 0352-9045

Замисао имплементације

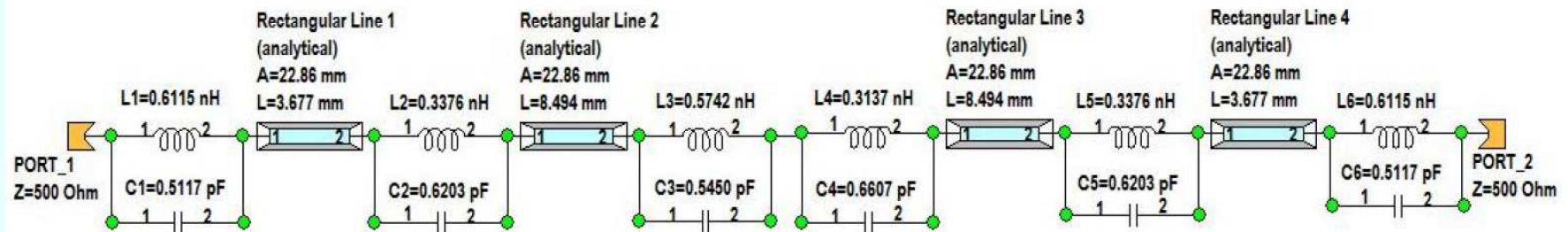


Milka M. Potrebić, Dejan V. Tošić,
Application of memristors in microwave passive circuits, *Radioengineering*, vol. 24, no. 2, pp. 408-419, June 2015. [online]
<http://www.radioeng.cz/papers/2015-2.htm>

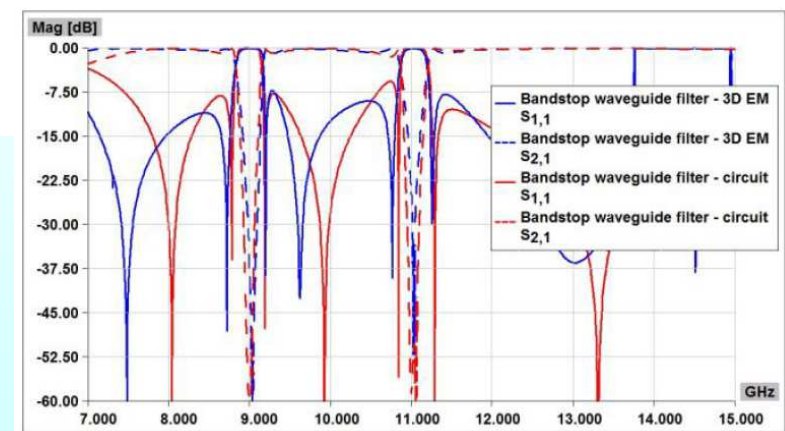
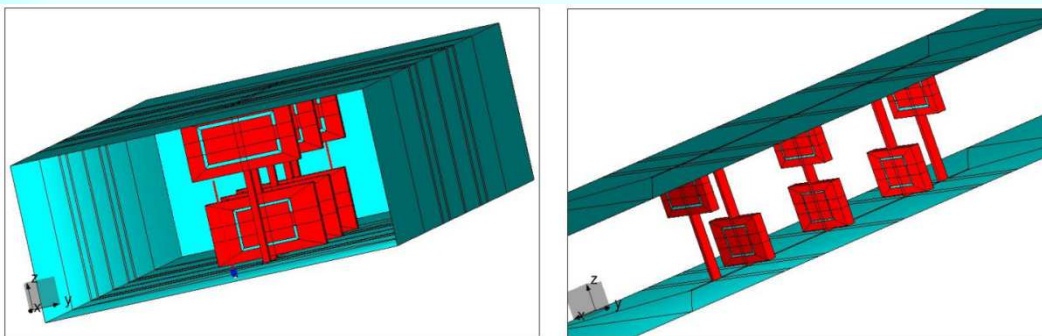
Симулациони модел

- Да би се што верније предвидео и опонашао рад направљеног филтра, образује се електрична шема у којој су идеални елементи реализације замењени моделима стварних делова филтра (компоненти)
- Модели компоненти могу бити заменске шеме, аналитички изрази, експериментални подаци (резултати мерења), резултати симулације, или сложени нумерички поступци
- Прецизнији симулациони модел је тродимензионална електромагнетска структура

Пример симулационог модела

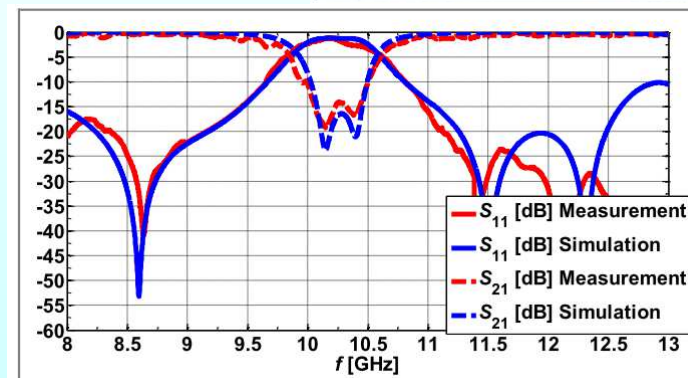
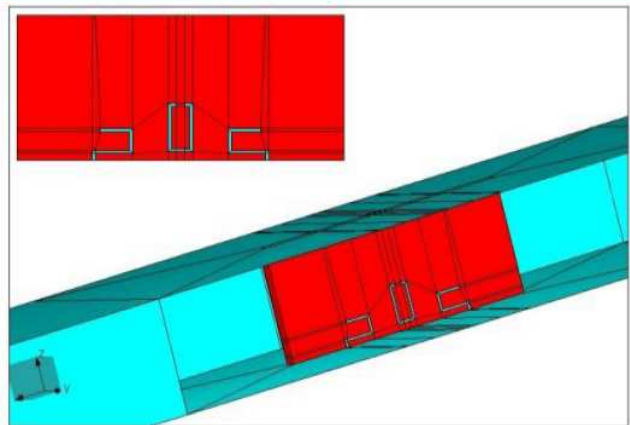
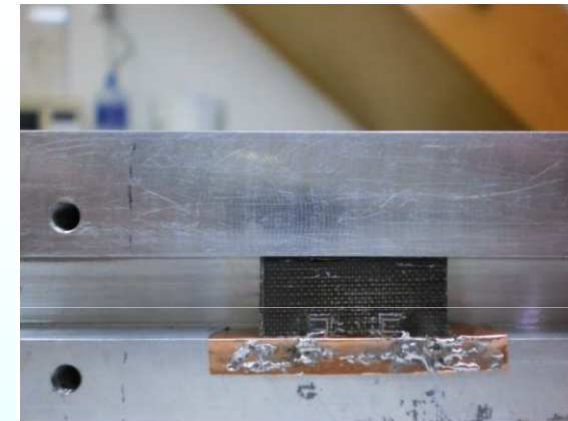
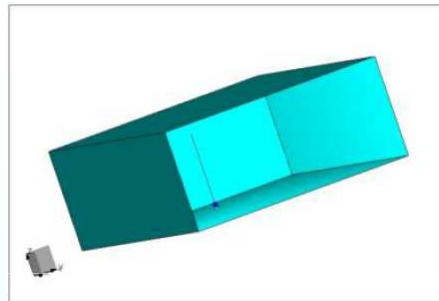
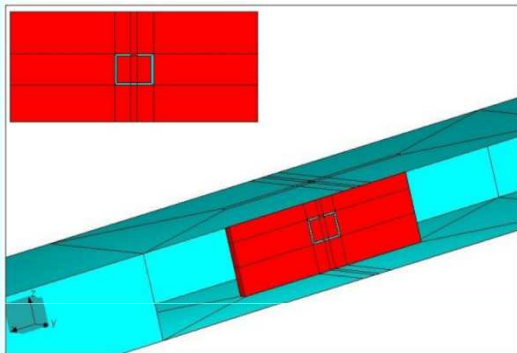


Rectangular Technology 1
B=10.16 mm
Er=1
Sigma=58.8 MS/m
TgD=0



S. Lj. Stefanovski, M. M. Potrebić, D. V. Tošić, **A novel design of dual-band bandstop waveguide filter using split ring resonators**, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 16, no. 3-4, pp. 486-493, March-April 2014. ISSN: print 1454-4164

Пример симулационог модела и експерименталне провере



S. Lj. Stefanovski, M. M. Potrebić, D. V. Tošić, **A novel design of E-plane bandstop waveguide filter using quarter-wave resonators**, *Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications*, vol. 9, no. 1-2, pp. 87-93, Jan.-Feb. 2015.

(Нека) Питања пред пројектантом

- Који је опсег капацитивности и индуктивности расположивих SMD компоненти и колики су њихови губици (Q-фактори)?
- Која је најмања ширина проводника микрострипа?
- Која је најмања ширина процепа спрегнутих микрострип водова?
- Како утичу конектори и кућиште на понашање филтра?
- Који машински парк је расположив у лабораторији за развој и израду прототипа филтра?
- Ако циљна технологија постоји у свету, да ли је доступна пројектанту филтра и да ли је цена реализације одговарајућа?
- Колика је толеранција компоненти и како утиче на шкарт у производњи? Каква је осетљивост филтра?
- Да ли постоји одговарајућа мерна опрема?
Конектори, прелази, каблови?
Калибрациони прибор?

Стратегије пројектовања

- Претпоставити шему или структуру, анализирати је за разне вредности параметара, направити радне криве за избор параметара и из њих прорачунавати филтар за дату спецификацију (**design by analysis**)
- Претпоставити шему или структуру, оптимизирати параметре да се задовољи спецификација (**design by optimization**)
- Синтеза (**design by synthesis**)

Пример пројектовања анализом 1

Отпорности отпорника електричног кола са слике су $R_1 = R_2 = R$. Посматра се трансфер функција $H(s) = \underline{U}(s) / \underline{U}_g(s)$, фреквенцијски одзив $H(i\omega)$ и амплитудска карактеристика $M(\omega) = |H(i\omega)|$.

(а) Одредити капацитивност C и индуктивност L тако да

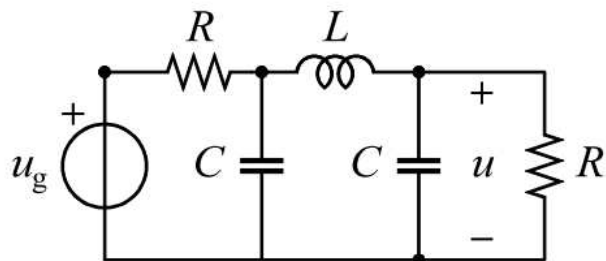
(1) амплитудска карактеристика буде максимално равна у координатном почетку, и

(2) амплитудска карактеристика на угаоној (кружној) учестаности $\omega = \Omega$ буде $\sqrt{2}$ пута мања од максималне вредности.

(б) За тако одређене вредности елемената одредити фреквенцијски одзив и амплитудску карактеристику.

(в) Нацртати амплитудску карактеристику из (б) и одредити пропусни опсег 3dB.

Функција је равна у тачки ако су у тачки једнаки нули први извод, други извод, ...



Пример пројектовања анализом 2

In[1]:= **Hs =**

$$\frac{V2}{Ug} /. \text{Solve}\left[\left\{\frac{V1 - Ug}{R} + \frac{V1 - V2}{L s} + C s V1 == 0, \frac{V2}{R} + \frac{V2 - V1}{L s} + C s V2 == 0\right\}, \{V1, V2\}, \{V2\}\right] // \text{First}$$

Out[1]=
$$\frac{R}{(1 + C R s) (2 R + L s + C L R s^2)}$$

In[2]:= **H ω = Hs /. s -> i ω**

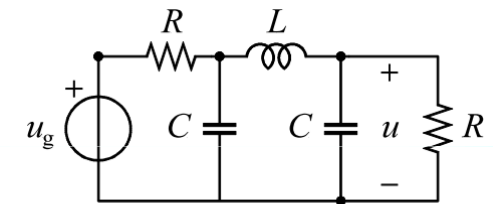
Out[2]=
$$\frac{R}{(1 + i C R \omega) (2 R + i L \omega - C L R \omega^2)}$$

In[3]:= **M ω = Abs[H ω] // ComplexExpand // Simplify[#, C > 0 && L > 0 && R > 0 && ω > 0] &**

Out[3]=
$$\frac{R}{\sqrt{(1 + C^2 R^2 \omega^2) (L^2 \omega^2 + (-2 R + C L R \omega^2)^2)}}$$

In[4]:= **D[M ω , ω]**

Out[4]=
$$-\left(R \left((1 + C^2 R^2 \omega^2) (2 L^2 \omega + 4 C L R \omega (-2 R + C L R \omega^2)) + 2 C^2 R^2 \omega (L^2 \omega^2 + (-2 R + C L R \omega^2)^2) \right)\right) / \left(2 \left((1 + C^2 R^2 \omega^2) (L^2 \omega^2 + (-2 R + C L R \omega^2)^2) \right)^{3/2}\right)$$



Пример пројектовања анализом 3

In[5]:= **D1M ω /. $\omega \rightarrow 0$**

Out[5]= 0

In[6]:= **D2M ω = D[D1M ω , ω]**

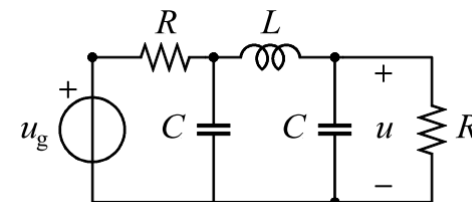
$$\text{Out[6]= } - \left(R \left(\left(1 + C^2 R^2 \omega^2 \right) \left(2 L^2 + 8 C^2 L^2 R^2 \omega^2 + 4 C L R \left(-2 R + C L R \omega^2 \right) \right) + \right. \right. \\ \left. \left. 4 C^2 R^2 \omega \left(2 L^2 \omega + 4 C L R \omega \left(-2 R + C L R \omega^2 \right) \right) + 2 C^2 R^2 \left(L^2 \omega^2 + \left(-2 R + C L R \omega^2 \right)^2 \right) \right) \right) / \\ \left(2 \left(\left(1 + C^2 R^2 \omega^2 \right) \left(L^2 \omega^2 + \left(-2 R + C L R \omega^2 \right)^2 \right) \right)^{3/2} \right) + \\ \left(3 R \left(\left(1 + C^2 R^2 \omega^2 \right) \left(2 L^2 \omega + 4 C L R \omega \left(-2 R + C L R \omega^2 \right) \right) + 2 C^2 R^2 \omega \left(L^2 \omega^2 + \left(-2 R + C L R \omega^2 \right)^2 \right) \right) \right) / \\ \left(4 \left(\left(1 + C^2 R^2 \omega^2 \right) \left(L^2 \omega^2 + \left(-2 R + C L R \omega^2 \right)^2 \right) \right)^{5/2} \right)$$

In[7]:= **D2M ω /. $\omega \rightarrow 0$ // Simplify**

$$\text{Out[7]= } - \frac{(L - 2 C R^2)^2}{8 R \sqrt{R^2}}$$

In[8]:= **jednacina1 = Simplify[(D2M ω /. $\omega \rightarrow 0$) == 0, R > 0]**

Out[8]= L == 2 C R²



Пример пројектовања анализом 4

```
In[9]:= MωCR = Mω /. Solve[jednacina1, L] // First // Simplify[#, C > 0 && R > 0 && ω > 0] &
```

$$\text{Out[9]} = \frac{1}{2 \sqrt{1 + C^6 R^6 \omega^6}}$$

```
In[10]:= Mmax = MωCR /. ω → 0
```

$$\text{Out[10]} = \frac{1}{2}$$

```
In[11]:= uslovC = Solve[MωCR^2 == \frac{1}{2} Mmax^2 /. ω → Ω, C]
```

$$\text{Out[11]} = \left\{ \left\{ C \rightarrow -\frac{1}{R \Omega} \right\}, \left\{ C \rightarrow \frac{1}{R \Omega} \right\}, \left\{ C \rightarrow -\frac{(-1)^{1/3}}{R \Omega} \right\}, \left\{ C \rightarrow \frac{(-1)^{1/3}}{R \Omega} \right\}, \left\{ C \rightarrow -\frac{(-1)^{2/3}}{R \Omega} \right\}, \left\{ C \rightarrow \frac{(-1)^{2/3}}{R \Omega} \right\} \right\}$$

```
In[12]:= uslovC1 = Select[Flatten[uslovC], ComplexExpand[Im[# // Last]] == 0 &]
```

$$\text{Out[12]} = \left\{ C \rightarrow -\frac{1}{R \Omega}, C \rightarrow \frac{1}{R \Omega} \right\}$$

```
In[13]:= uslovC2 = Select[uslovC1, Simplify[Positive[# // Last], R > 0 && Ω > 0] &]
```

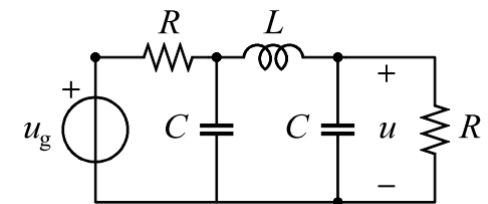
$$\text{Out[13]} = \left\{ C \rightarrow \frac{1}{R \Omega} \right\}$$

```
In[14]:= jednacina2 = Equal @@ uslovC2[[1]]
```

$$\text{Out[14]} = C == \frac{1}{R \Omega}$$

```
In[15]:= vrednostiCL = Solve[{jednacina1, jednacina2}, {C, L}] // First
```

$$\text{Out[15]} = \left\{ L \rightarrow \frac{2R}{\Omega}, C \rightarrow \frac{1}{R \Omega} \right\}$$



Пример пројектовања анализом 5

In[16]:= **HsButterworth = Hs /. vrednostiCL // Simplify**

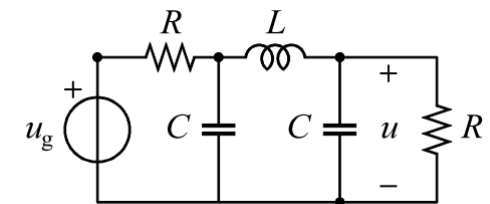
$$\text{Out[16]= } \frac{\Omega^3}{2 (s + \Omega) (s^2 + s \Omega + \Omega^2)}$$

In[17]:= **H ω Butterworth = H ω /. vrednostiCL // Simplify**

$$\text{Out[17]= } \frac{\Omega^3}{2 (-i \omega^3 - 2 \omega^2 \Omega + 2 i \omega \Omega^2 + \Omega^3)}$$

In[18]:= **M ω Butterworth = M ω /. vrednostiCL // Simplify[# , R > 0] &**

$$\text{Out[18]= } \frac{1}{2 \sqrt{1 + \frac{\omega^6}{\Omega^6}}}$$

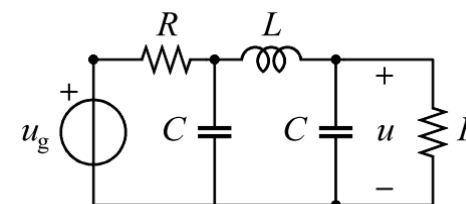
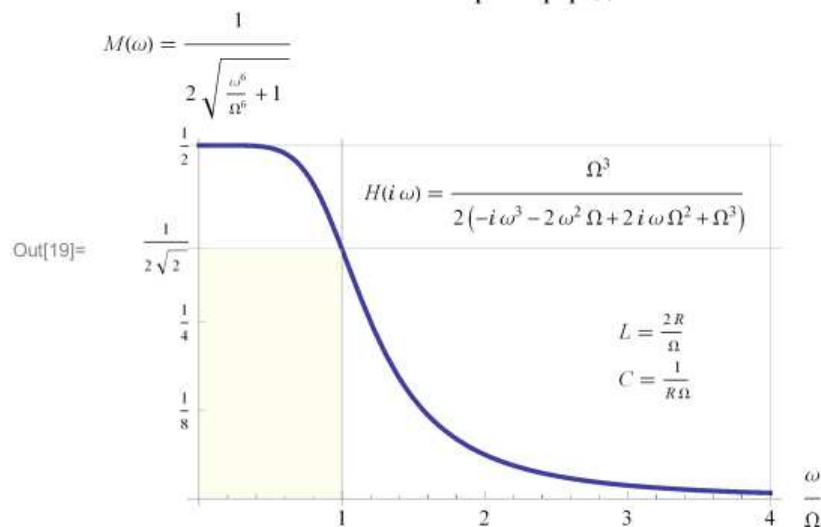


Пример пројектовања анализом б

```

In[19]:= Plot[MωButterworth /. ω → x Ω, {x, 0, 4},
  AxesLabel → { $\frac{\omega}{\Omega}$ , M[ω] == MωButterworth}, GridLines → {{1, 4}, { $\frac{1}{\sqrt{2}}$ , 1} Mmax},
  Ticks → {Automatic, {{ $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{4}$ }, { $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{2}$ }, { $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ,  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ }, {1, 1}} Mmax},
  PlotLabel → "Butterworth филтар реда 3", PlotStyle → Thick,
  Epilog → {Text[H[i ω] == HωButterworth, {2.5, 0.43}],
  Text[Column[(Equal @@ #) & /@ vrednostiCL], {3.2, 0.2}],
  LightYellow, Opacity[0.4], Rectangle[{0, 0}, {1,  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  Mmax}]]]}
  
```

Butterworth филтар реда 3



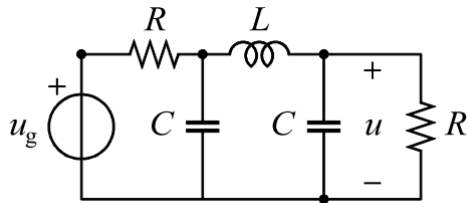
Пример пројектовања анализом 7

```
In[20]:= Ω3dB = ω /. Solve[MωButterworth ==  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  Mmax, ω] // Select[#, ComplexExpand[Im[#]] == 0 &] & //  
Select[#, Simplify[Positive[#], Ω > 0] &] &
```

Out[20]= {Ω}

```
In[21]:= Bω3dB = {0, Ω3dB[[1]]}
```

Out[21]= {0, Ω}

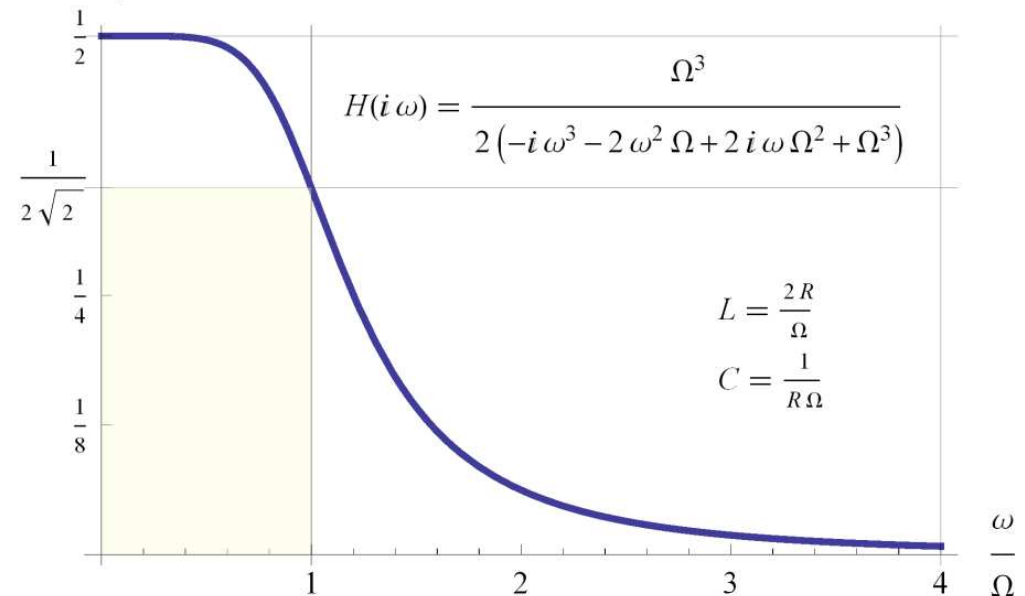


$$L = \frac{2R}{\Omega}$$

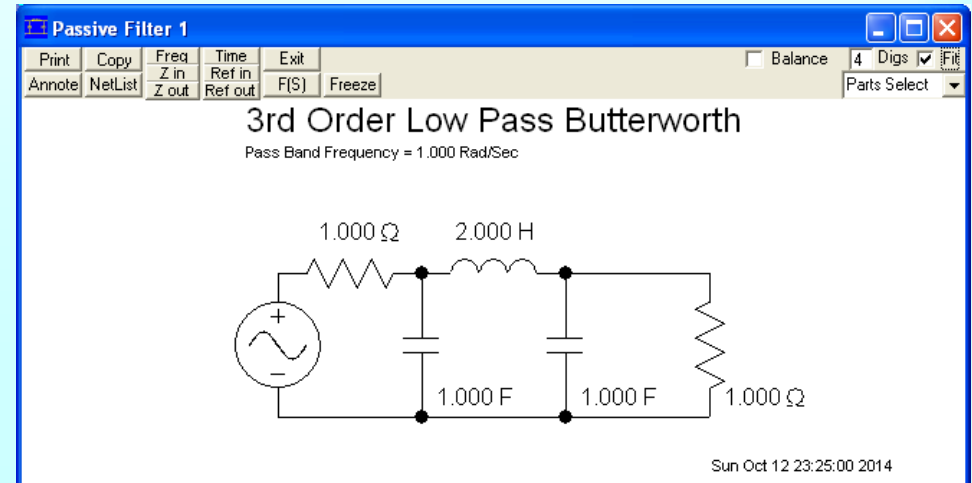
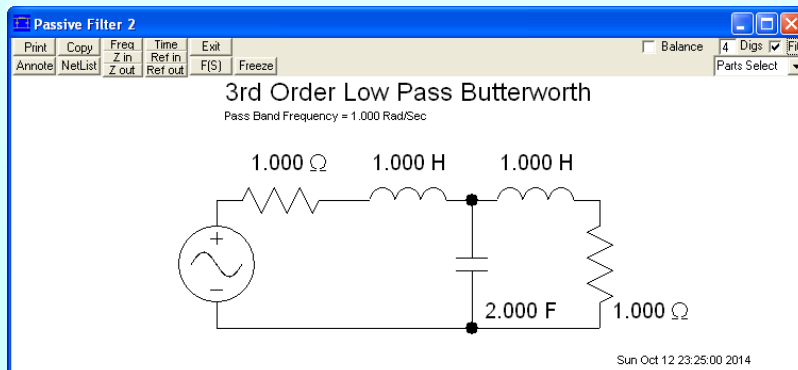
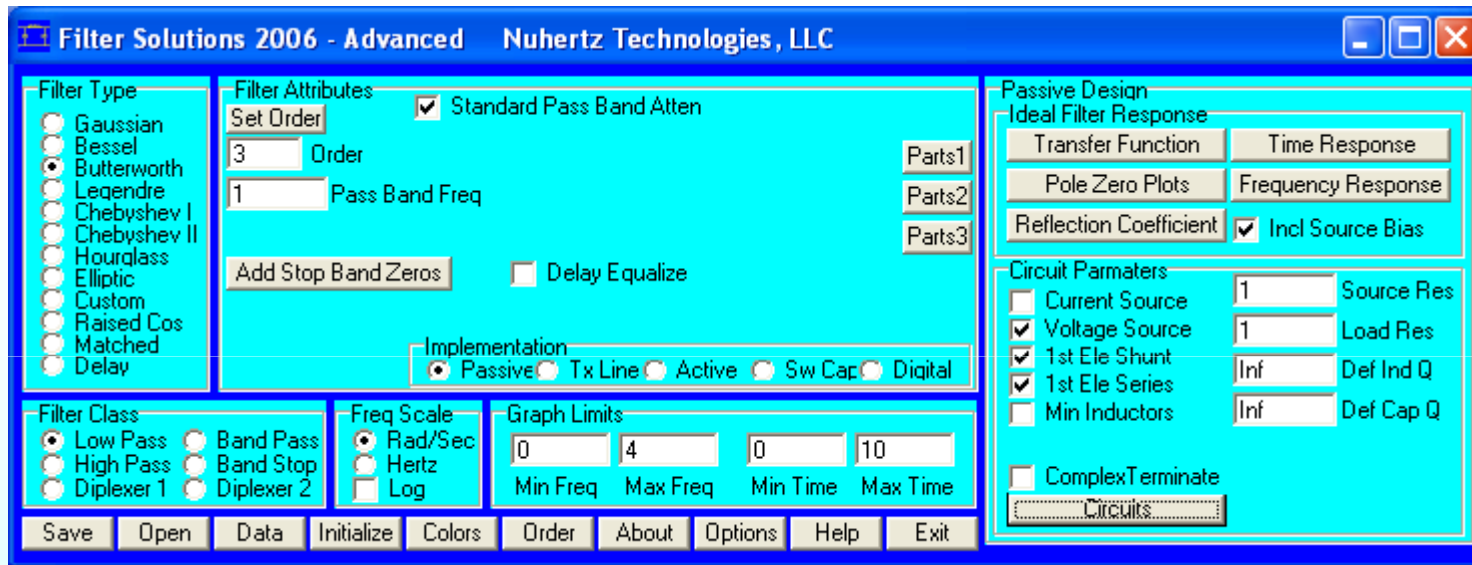
$$C = \frac{1}{R\Omega}$$

Butterworth филтар реда 3

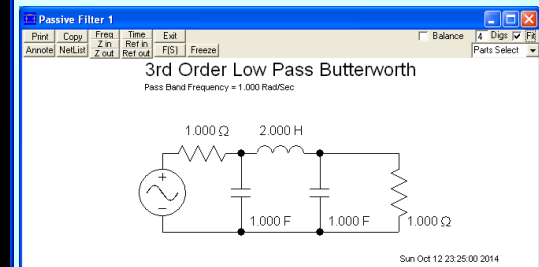
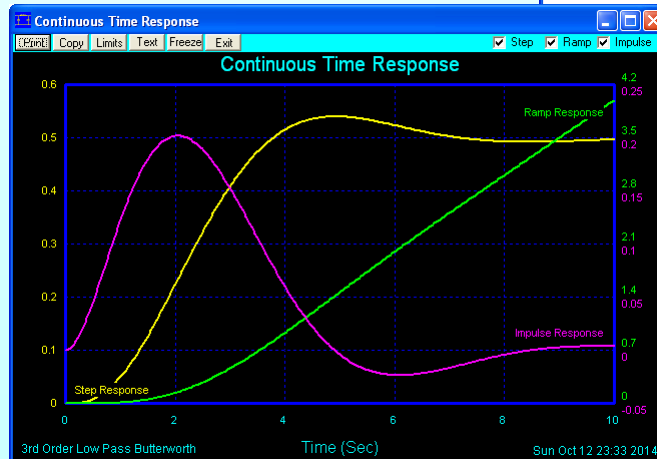
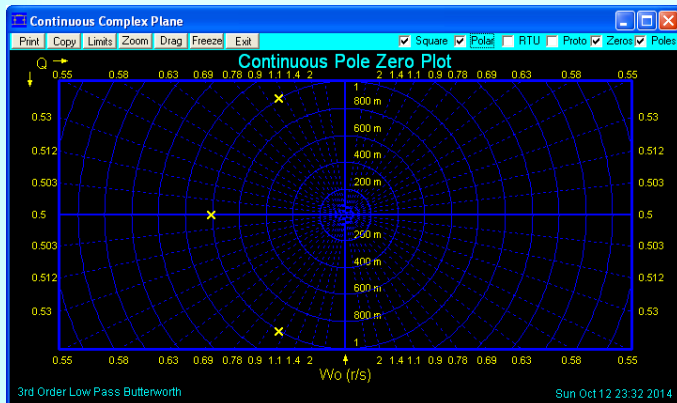
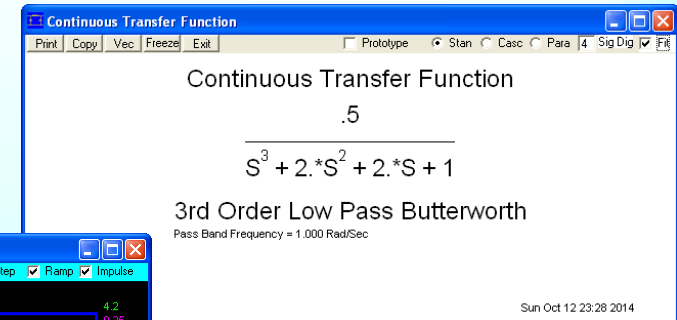
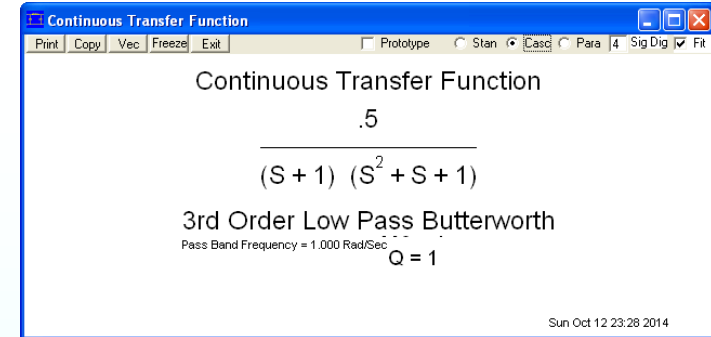
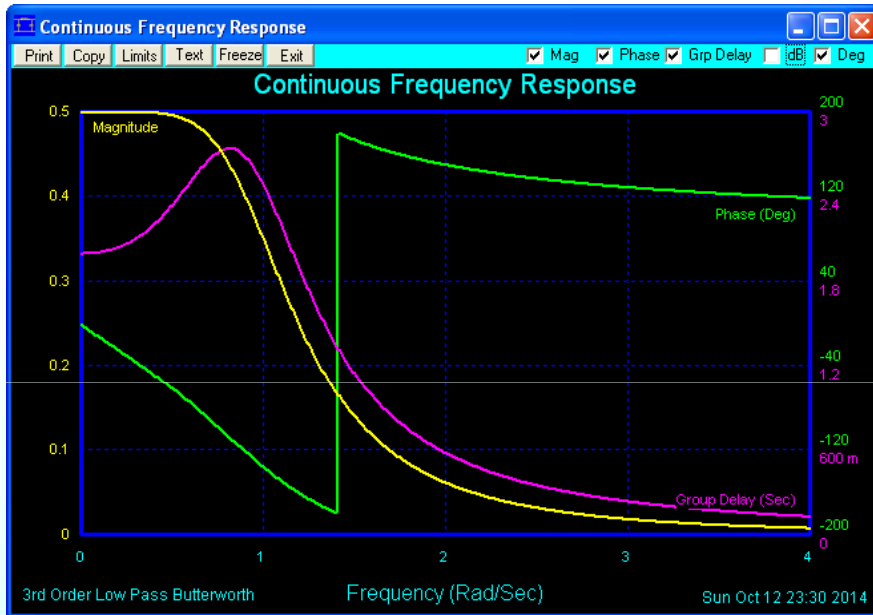
$$M(\omega) = \frac{1}{2\sqrt{\frac{\omega^6}{\Omega^6} + 1}}$$



Пример рачунарске синтезе 1

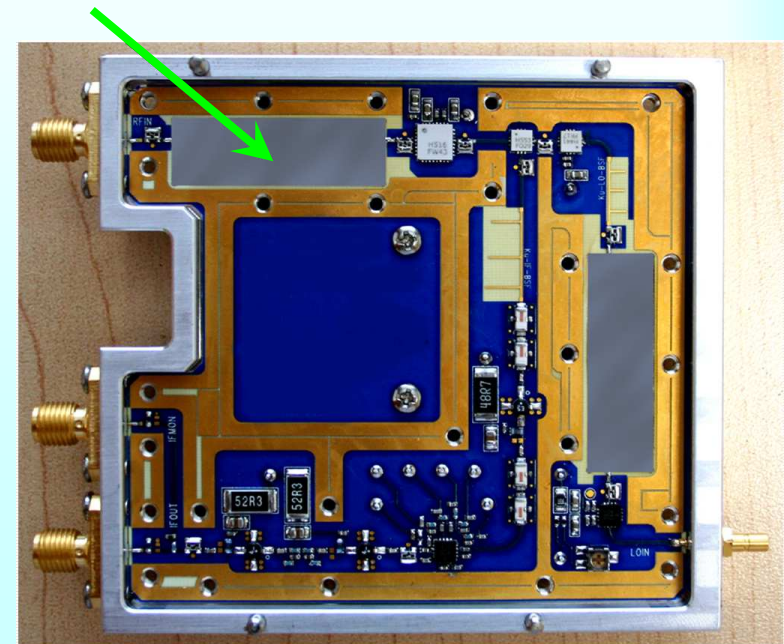


Пример рачунарске синтезе 2



RF Brick

- Да ли ће филтар бити у посебном, **власитом** кућишту?
- Да ли ће бити део подсистема на заједничкој штампаној плочи?
- Да ли ће бити уграђен у затворено кућиште са другим деловима?



SiP, WLAN, GSM

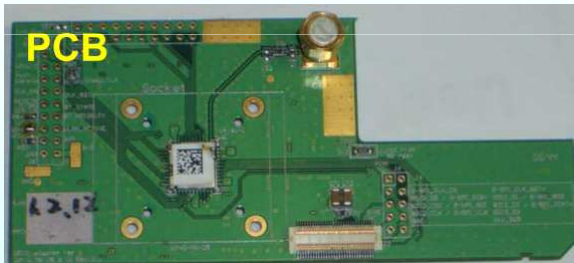


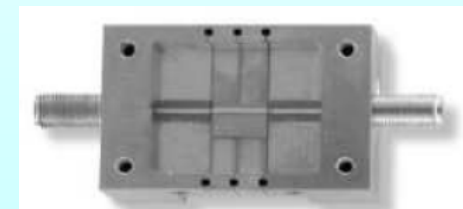
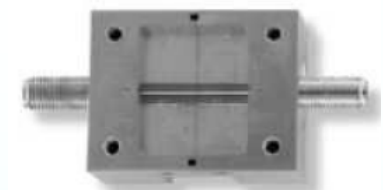
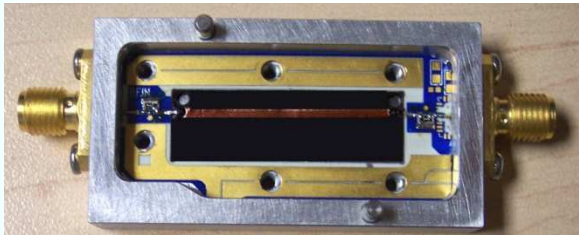
Table 1.4 Typical specification for a GSM handset receive filter

Passband	925–960 MHz	
Insertion loss	3.5 dB (max)	
Stopband	850–905 MHz	20 dB (min)
	905–915 MHz	12 dB (min)
Physical size	10 × 7 × 2 mm (typical)	

Table 1.1 Specification of a GSM base station filter

Passband	925–960 MHz
Insertion loss	0.8 dB (max)
Input and output return loss	20 dB (min)
Stopband	
Frequency/MHz	Attenuation/dB (min)
d.c.–880	50
880–915	80
970–980	20
980–12750	50
Temperature range	–10 °C to +70 °C
System impedance	50 Ω

The test fixture



Литература



- **M. M. Potrebić, D. V. Tošić ,
Projektovanje mikrotalasnih filtara,
Akademska misao, Beograd, 2019.**
- В. В. Петровић, Д. В. Тошић, А. Р. Ђорђевић,
Микроталасна пасивна кола,
Универзитет у Београду,
Електротехнички факултет, Београд,
2010. [online]
http://www.etf.rs/etf_files/udzbenici/MРК_2010.pdf
- J.-S. Hong, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, 2/e, John Wiley & Sons, Hoboken, 2011.
- I. C. Hunter, *Theory and Design of Microwave Filters*, The Institution of Engineering and Technology (IET), London, 2001. (Reprinted 2006)
- M. D. Lutovac, D. V. Tošić, B. L. Evans,
Filter Design for Signal Processing using MATLAB and Mathematica, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2001.
---, Reprint for P. R. China, Publishing House of Electronics Industry , PHEI, Beijing, China, 2002.
---, Translated in Chinese, Publishing House of Electronics Industry, PHEI, Beijing, P. R. China, 2004.

