

**Микроталасни филтри са
локализованим импулсним одзивом
у техници микротракастих водова**

Докторска теза

Кандидат:

мр Милка Потребих

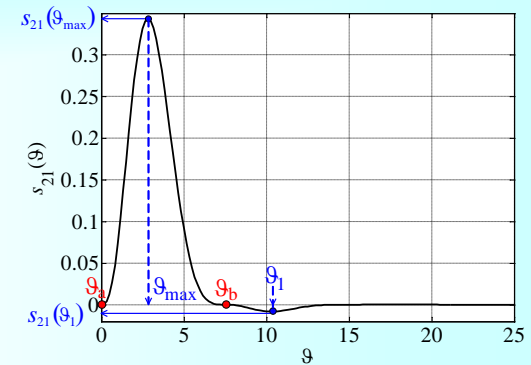
Ментор:

др Дејан Тошић, ванр. проф.

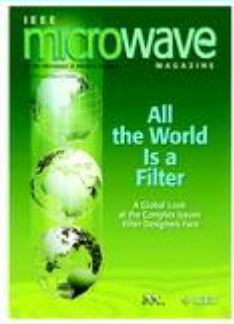
Београд, 2009.



Циљ



- Истражити реализације микроталасних филтара пропусника опсега са **Rhodes-**овом апроксимацијом
- Предложити оптималну реализацију у техници **микротракастих** водова
- Истовремено обезбедити **селективност** амплитудске карактеристике, импулсни одзив **локализован у времену**, и што **мање заузеће** на штампаној плочици



Актуелност микроталасних филтара



- Микроталасни филтри се користе у практично свим савременим радарским системима и комуникационим системима
- **“Focus on Filters”**, *IEEE Microwave Magazine*, vol. 8, no. 2, April 2007.
- **“All the World is a Filter”**, *IEEE Microwave Magazine*, vol. 8, no. 5, Oct. 2007.

Rhodes-ова апроксимација

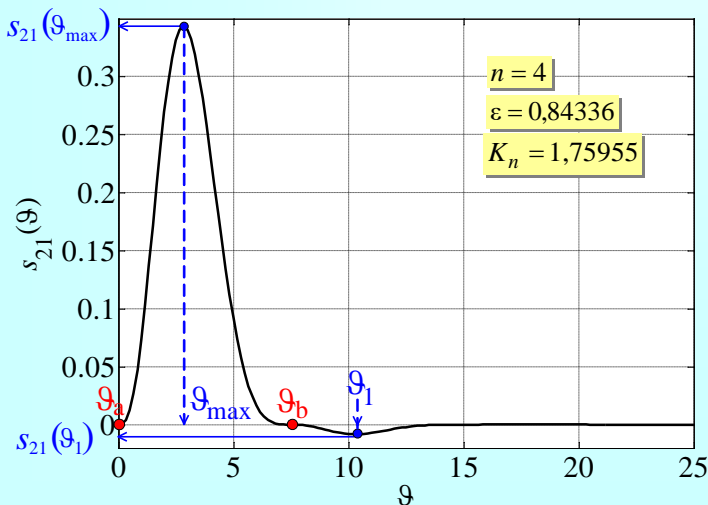
Rhodes је предложио апроксимацију за импулсни одзив, односно за одзив у временском домену

инверзна Лапласова
трансформација
 $S_{21}(s)$

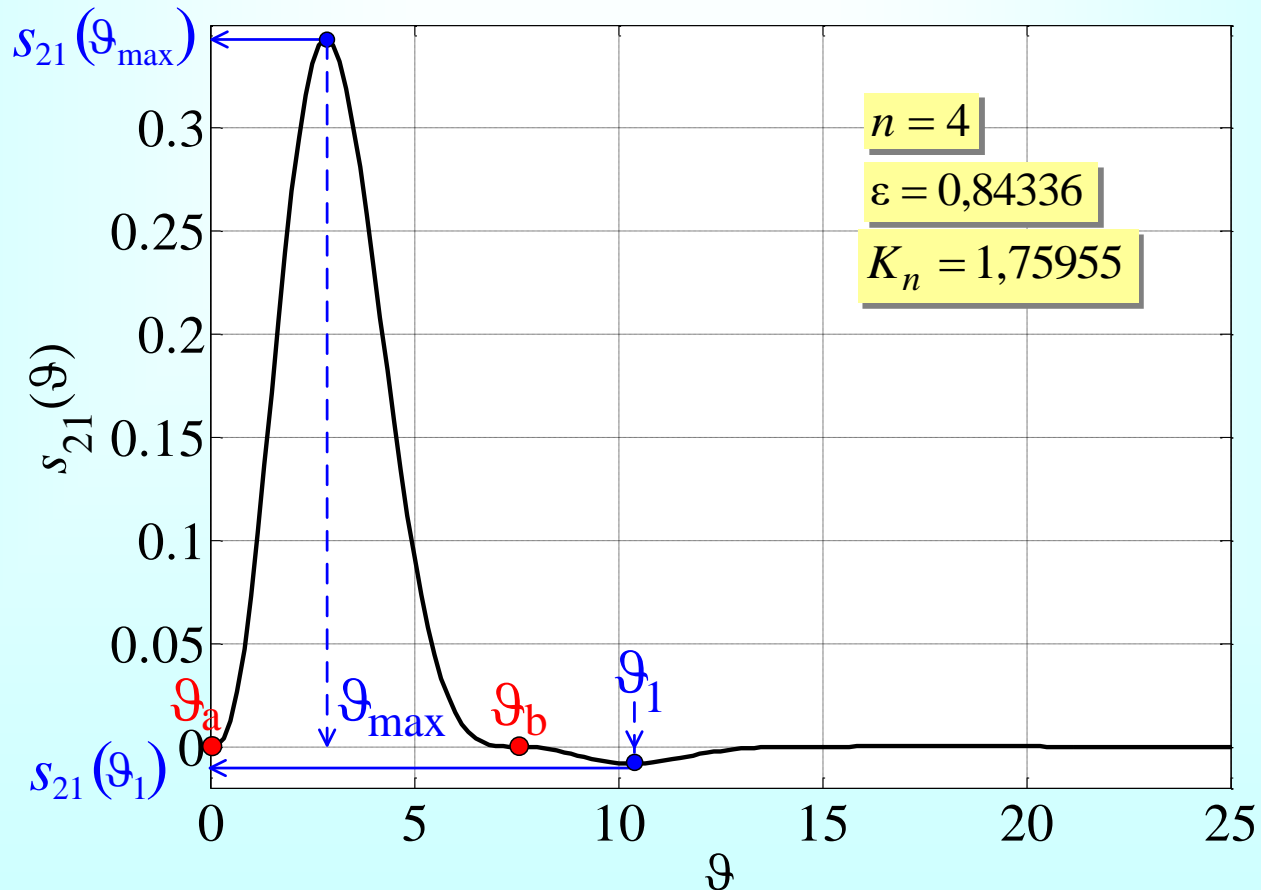
$$s_{21}(\vartheta) = K_n e^{-\vartheta/2} \sin^{n-1} \left(\frac{\varepsilon}{2} \vartheta \right)$$

ред апроксимације

реална константа време нормализовано на 1s



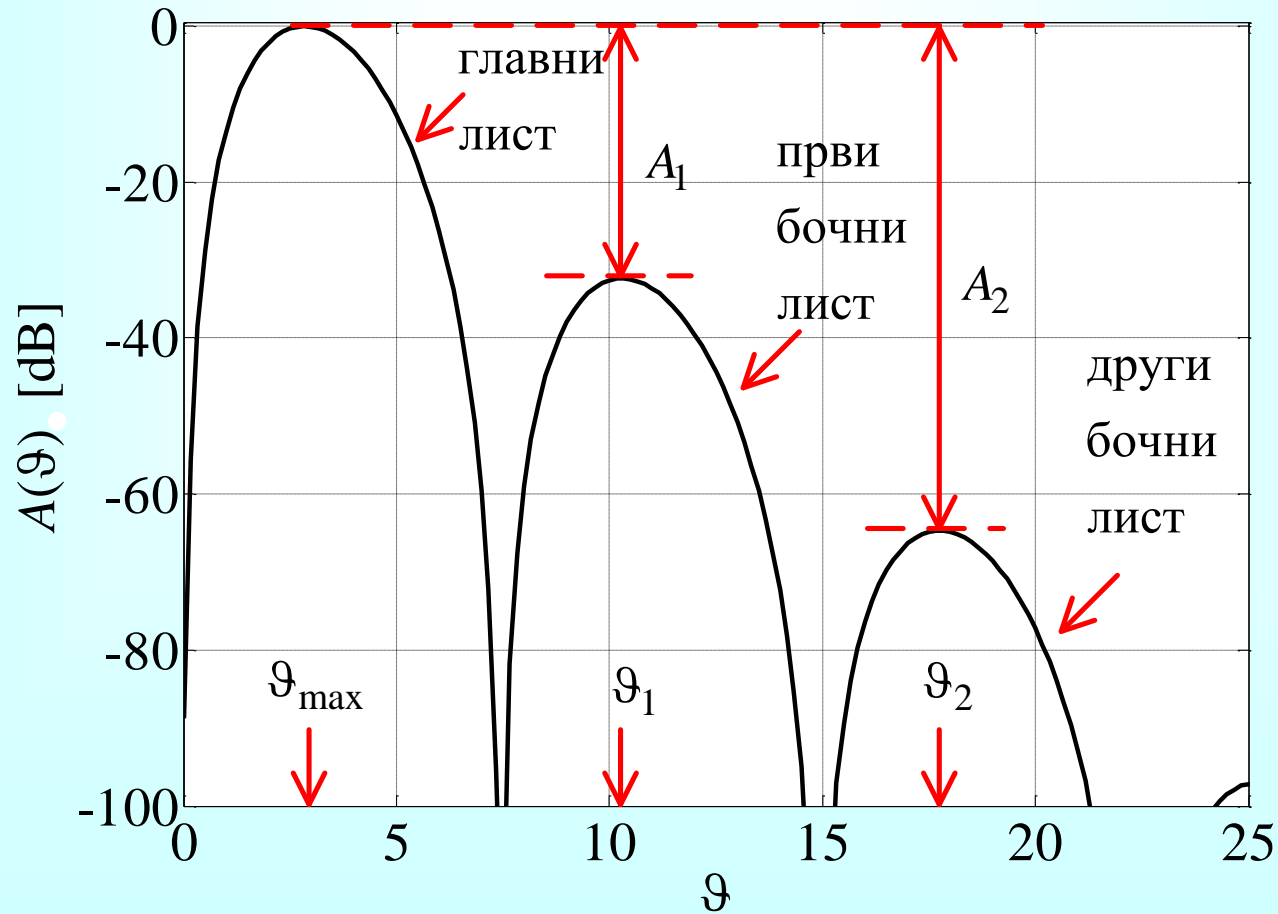
Импулсни одзив прототипа за полиномску Rhodes-ову апроксимацију (RhA)



$$\vartheta_{\max} = \frac{2}{\varepsilon} \arctg((n-1)\varepsilon)$$

$$\vartheta_m = \frac{2}{\varepsilon} (m\pi + \arctg((n-1)\varepsilon))$$

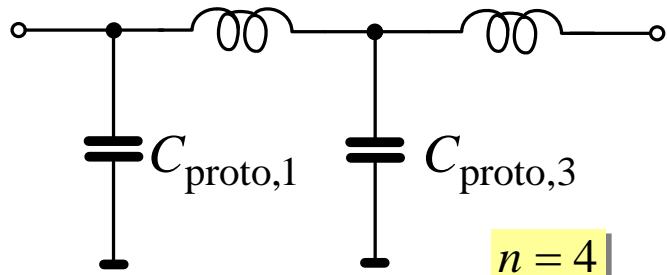
Релативно слабљење импулсног одзива



$$A(\vartheta) = 20 \log_{10} \left| \frac{s_{21}(\vartheta_{\max})}{s_{21}(\vartheta)} \right|$$

$$A_m = 20 \log_{10} \left| \frac{s_{21}(\vartheta_{\max})}{s_{21}(\vartheta_m)} \right| = \frac{8,686 m \pi}{\varepsilon} \text{ dB}$$

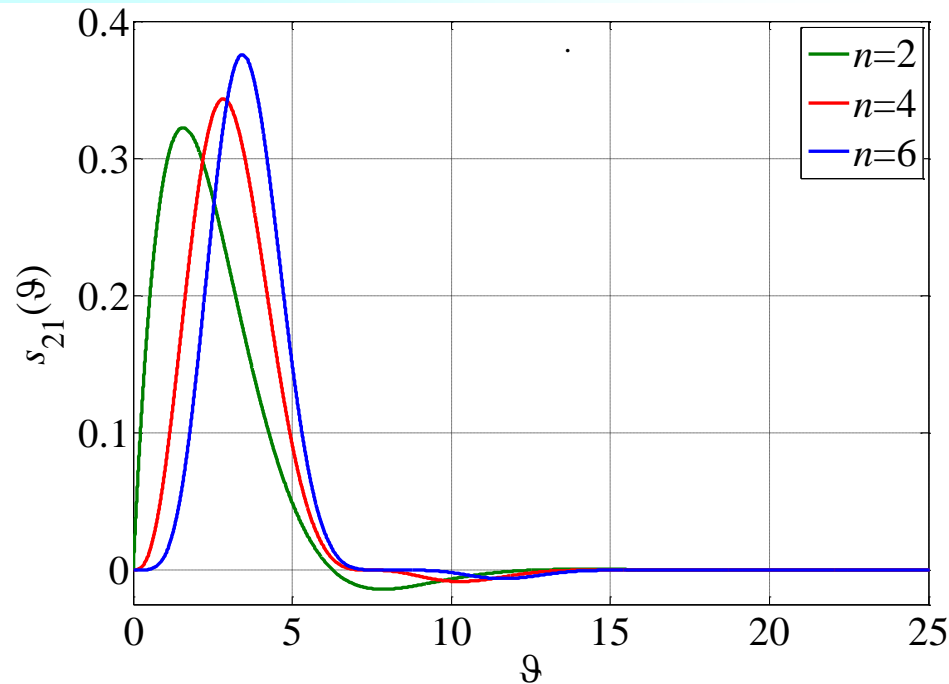
Прототип за RhA



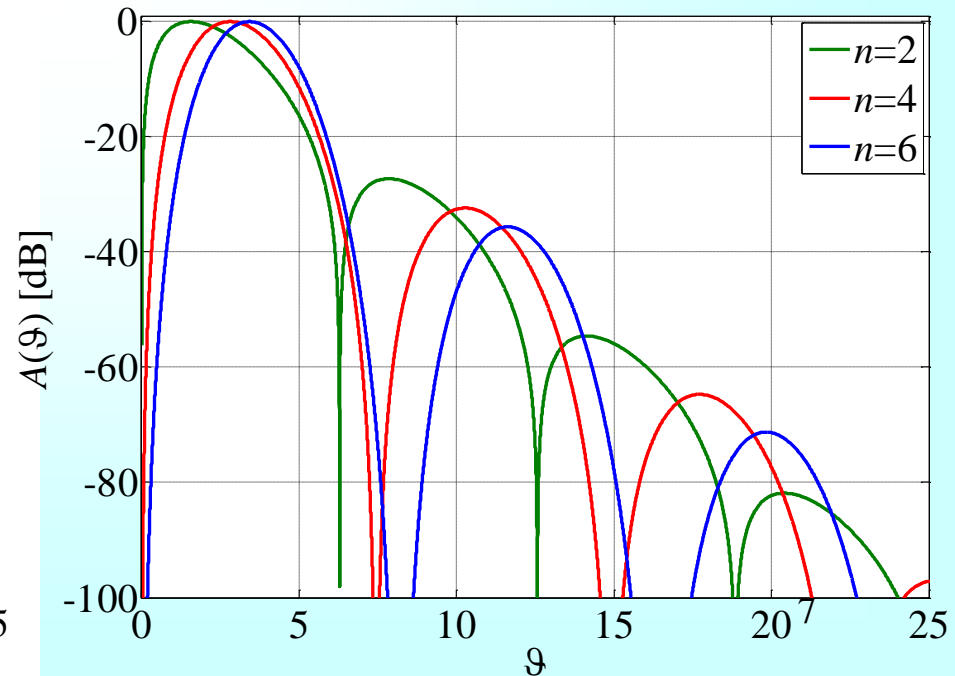
$n = 4$

n	2	4	6
A_1 [dB]	27,29	32,36	35,63
A_2 [dB]	54,58 ($2A_1 = 54,58$)	64,72 ($2A_1 = 64,72$)	71,26 ($2A_1 = 71,26$)
ϑ_{\max}	1,55	2,8	3,39
ϑ_1	7,84	10,29	11,67
ϑ_2	14,13	17,78	19,95
$(\vartheta_1 - \vartheta_{\max})$	6,29	7,49	8,28
$(\vartheta_2 - \vartheta_1)$	6,29	7,49	8,28

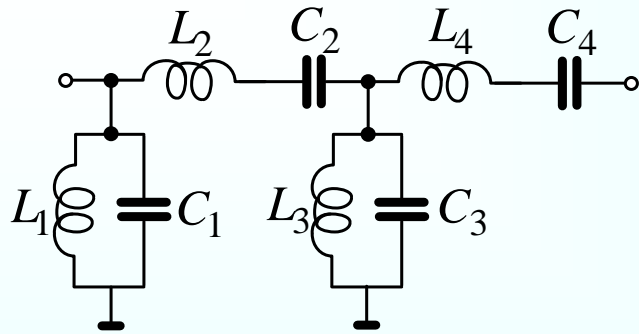
Импулсни одзив прототипа



Релативно слабљење импулсног одзива прототипа

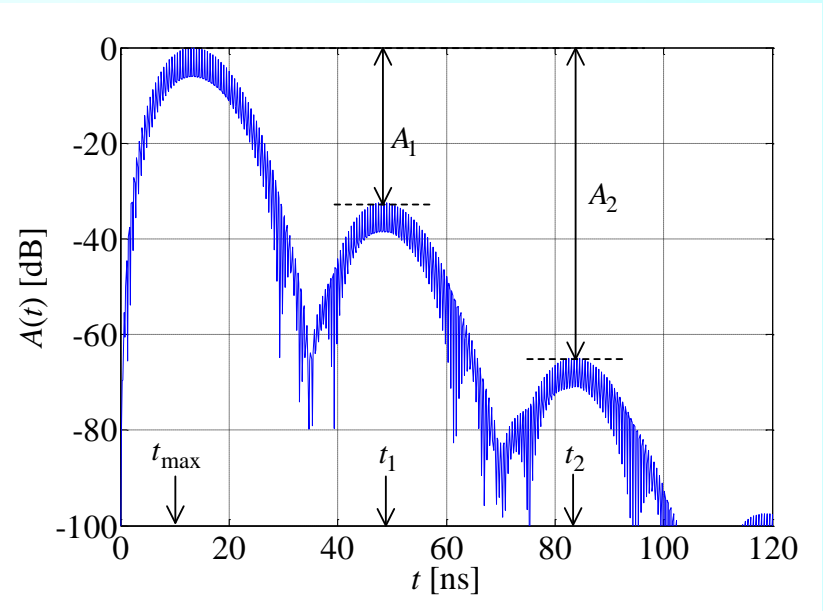
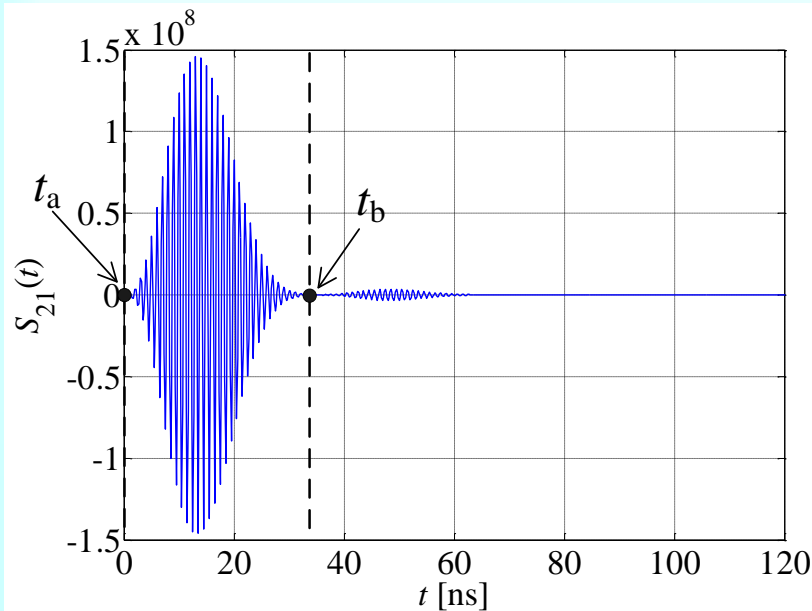
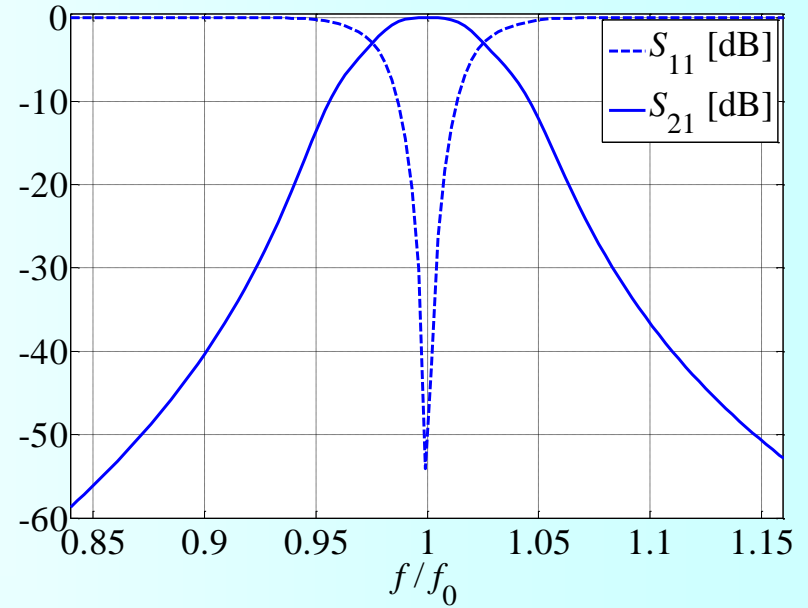


LC-филтар пропусник опсега (RhA)



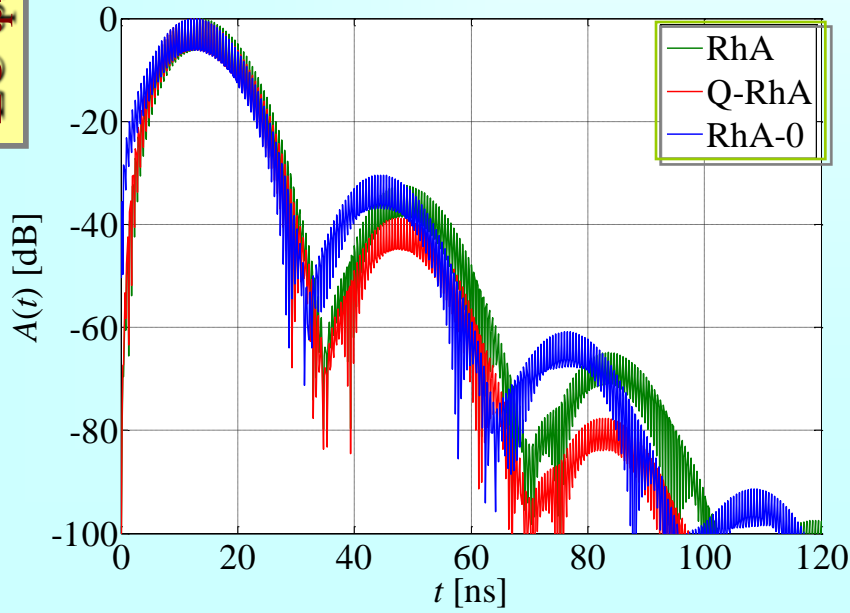
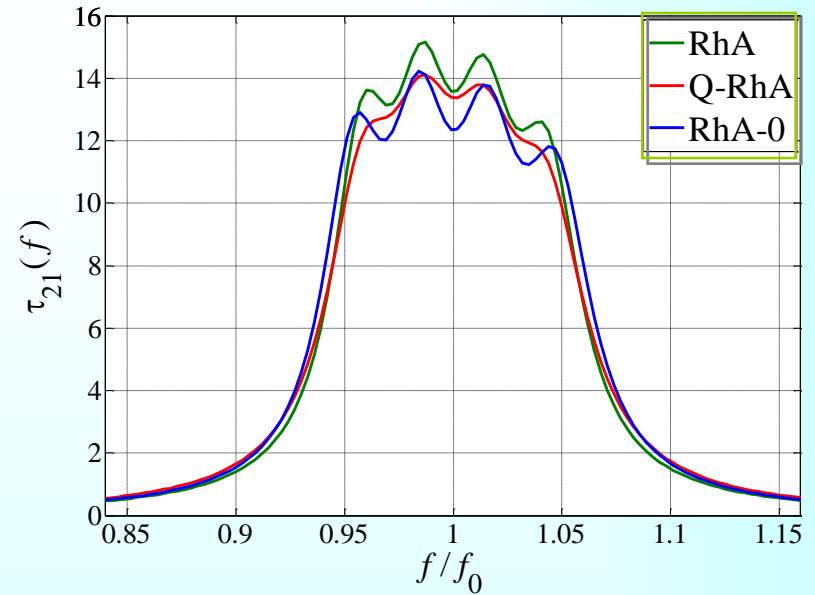
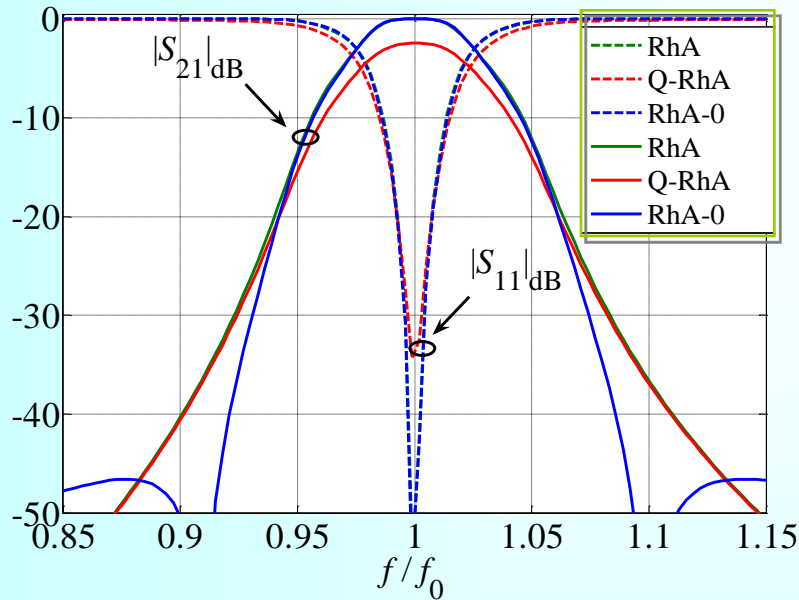
$$f_0 = 1 \text{ GHz}$$

$$B_{\Delta} = \Delta F_{3\text{dB}} / f_0 = 0,05$$



Униформни губици, коначне нуле

LC-филтари пропусници опсега



$f_0 = 1 \text{ GHz}$

$B_{\Delta} = \Delta F_{3dB} / f_0 = 0,05$

	RhA	Q-RhA	RhA-0
A_1 [dB]	32,42	38,79	30,39
A_2 [dB]	64,89 ($2A_1 = 64,84$)	77,65 ($2A_1 = 77,58$)	60,86 ($2A_1 = 60,78$)
t_{max} [ns]	13,5	12,5	12,5
t_1 [ns]	48,5	47,5	44,5
t_2 [ns]	83,5	82,5	76,5
$(t_1 - t_{max})$ [ns]	35	35	32
$(t_2 - t_1)$ [ns]	35	35	32

Филтри пропусници опсега са спрегнутим резонаторима

- Синтеза и реализација филтара са спрегнутим резонаторима са релативно уским пропусним опсегом [Dishal1951], [Dishal1965]
- Универзални поступак синтезе омогућује да се нађу све потребне геометријске димензије филтра без обзира на циљну технологију реализације помоћу
 - коефицијената спреге резонатора **Ширина пропусног опсега**
 - Q -фактора резонатора **Прилагођење у пропусном опсегу**
 - централне учестаности филтра

Спецификација филтра

- Ред филтра: 4
- Релативна ширина пропусног опсега: $B_{\Delta} = 0,08$
- Централна учестаност: $f_0 = 2\text{GHz}$
- Максимално дозвољено слабљење на централној учестаности: 1,5dB
- Највеће неприлагођење у пропусном опсегу: -14 dB
- Облик релативног слабљења импулсног одзива - потискивање бочних листова и еквидистантност растојања максимума листова дате **Rhodes**-овим прототипом
- Једнаке номиналне импедансе приступа: $Z_0 = 50\Omega$
- Супстрат: **Rogers RO4003C**
- Минимална површина заузећа штампане плочице
- Резолуција расположиве технологије: 50 μm

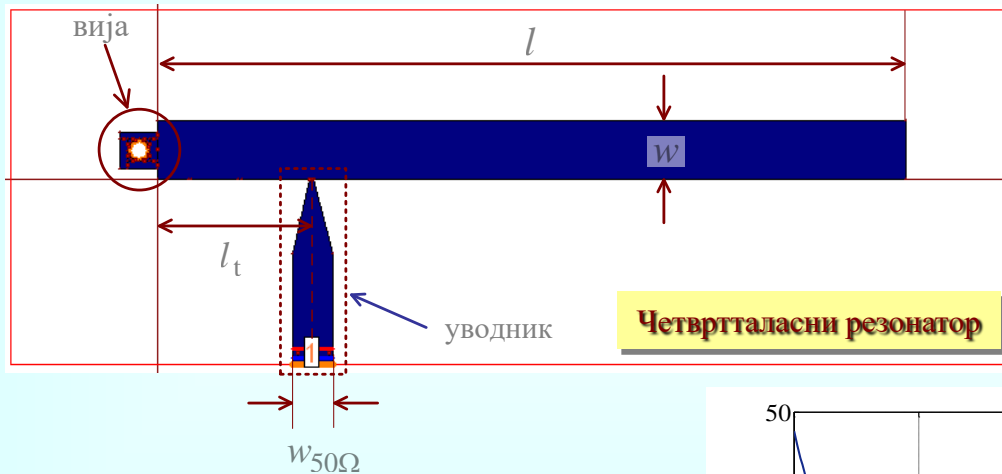
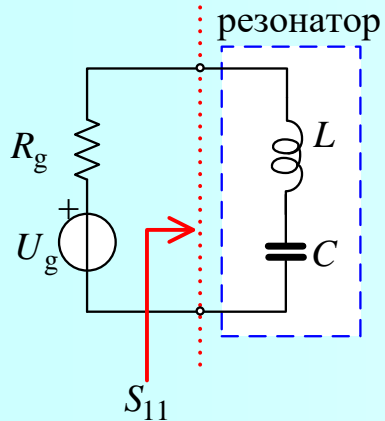
Алгоритам за реализацију филтара са локализованим импулсним одзивом (1)

- Утврдити параметре одабраног супстрата за прављење лабораторијског прототипа
- Одредити **минимални Q -фактор** неоптерећеног резонатора на основу максималног дозвољеног слабљења на централној учестаности
- Одредити симулацијом **криву** зависности Q -фактора неоптерећеног резонатора у функцији димензија резонатора на одабраном супстрату за централну учестаност филтра

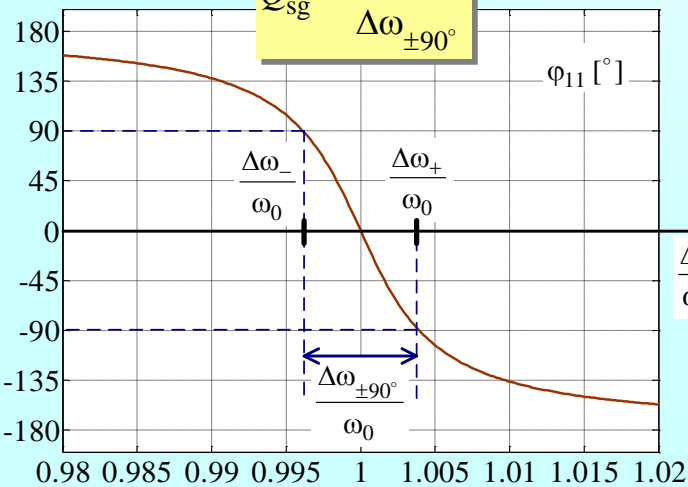
Одређивање Q -фактора оптерећеног/неоптерећеног резонатора

редни

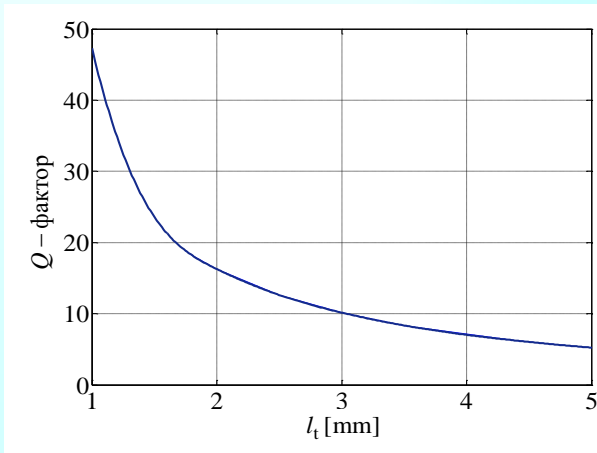
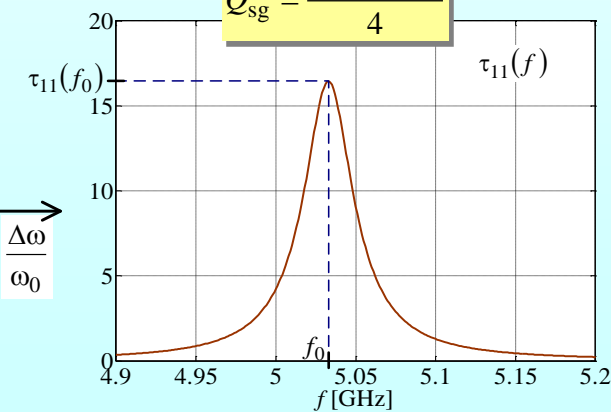
резонатор



$$Q_{sg} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_{\pm 90^\circ}}$$



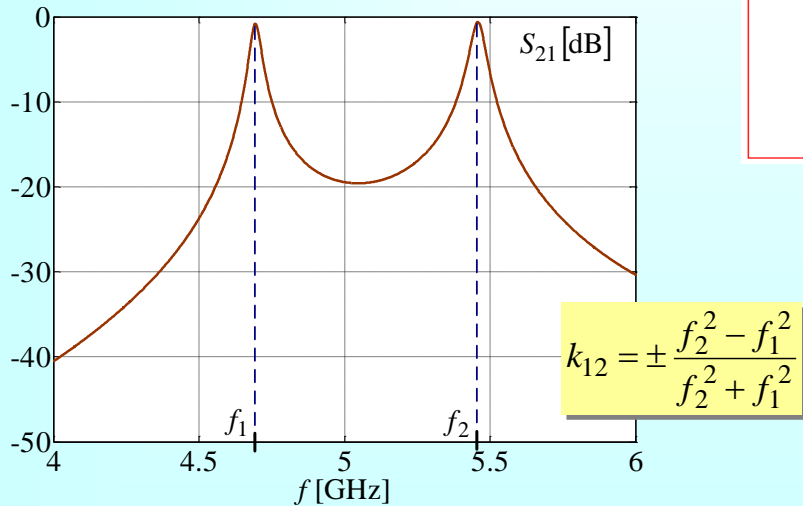
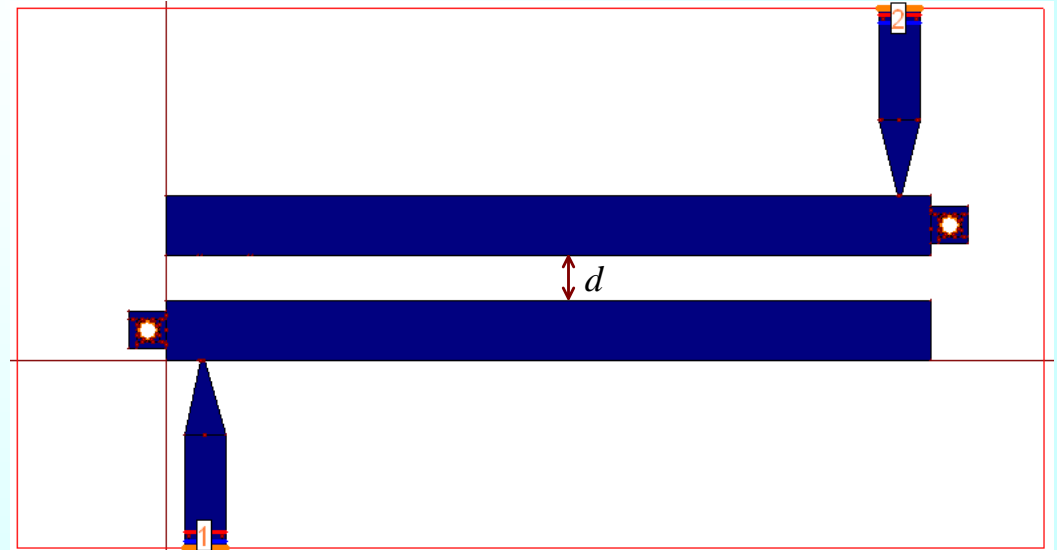
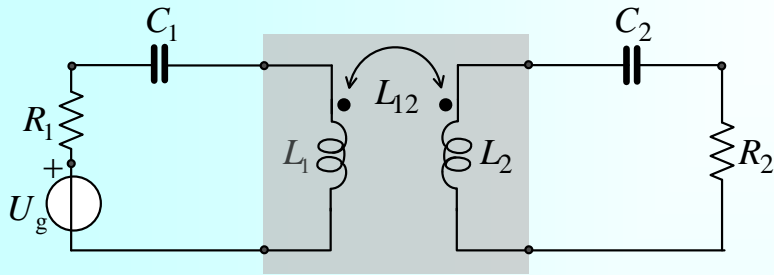
$$Q_{sg} = \frac{\omega_0 \tau_{11}(\omega_0)}{4}$$



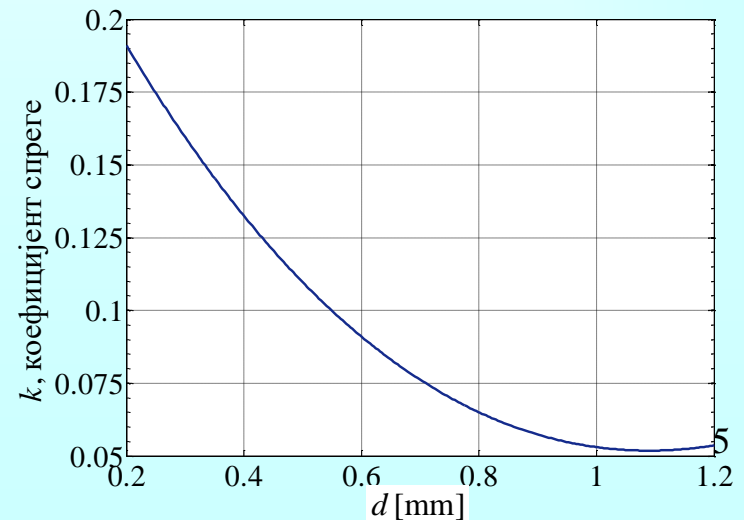
Алгоритам за реализацију филтара са ЛОКАЛИЗОВАНИМ ИМПУЛСНИМ ОДЗИВОМ (2)

- Израчунати коефицијенте спреге и Q -факторе **оптерећених** резонатора
- Израчунати S -параметре филтра из матрице спрега и Q -фактора оптерећених резонатора, испитати **осетљивост** одзива филтра (и у фреквенцијском и временском домену) на коефицијенте спреге и Q -факторе
- Одредити симулацијом **криву** зависности коефицијената спреге у функцији ширине процепа између два усамљена резонатора

Одређивање коефицијента спреге два резонатора



$$k_{12} = \pm \frac{1}{2} \left(\frac{f_{02}}{f_{01}} + \frac{f_{01}}{f_{02}} \right) \sqrt{\left(\frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 + f_1^2} \right)^2 - \left(\frac{f_{02}^2 - f_{01}^2}{f_{02}^2 + f_{01}^2} \right)^2}$$



Алгоритам за реализацију филтара са локализованим импулсним одзивом (3)

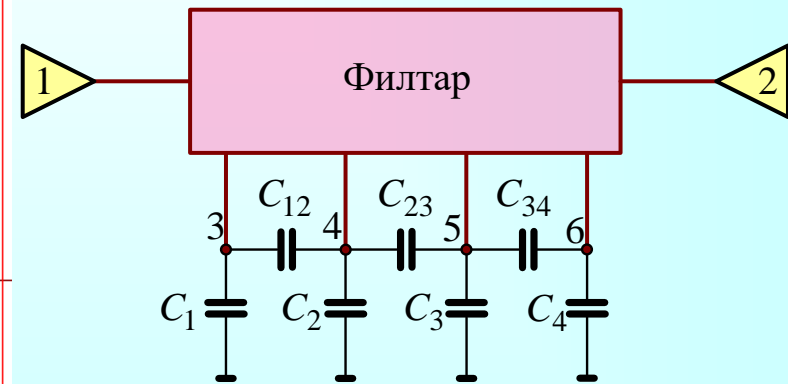
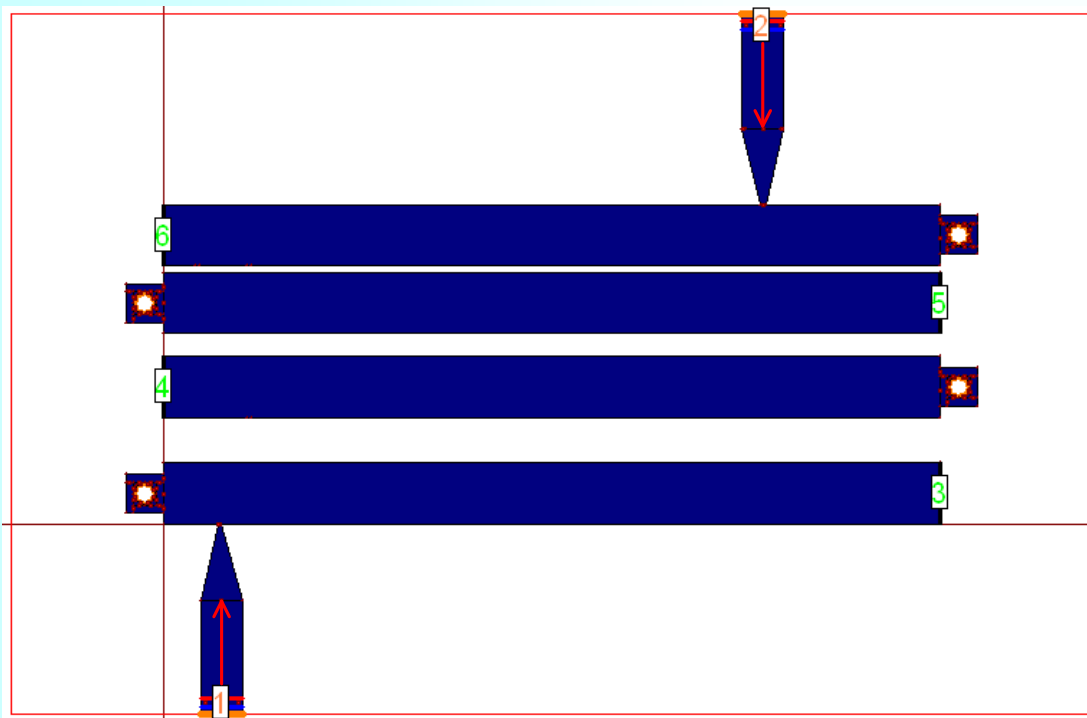
- Одредити симулацијом **криву** зависности Q -фактора оптерећеног резонатора у функцији релативног **положаја уводника** у односу на резонатор; крива се снима за централну учестаност филтра
- Оптимизовати геометријске димензије филтра; као критеријум оптимизације усвојити одзив LC -филтра са униформним **губицима** ($Q = 180$ на централној учестаности филтра)

Здружена оптимизација временског и фреквенцијског одзива

Алгоритам за реализацију филтара са локализованим импулсним одзивом (4)

- Образовати модел у симулатору за нумеричку анализу брзопроменљивих електромагнетских поља (3D ЕМ модел) коришћењем софтверских алата као што су WIPL-D Pro [WIPL-D] или IE3D [Zeland]. Испитати да ли је спецификација филтра задовољена
- Подесити геометријске димензије филтра „port-tuning“ оптимизација
- Ако спецификација није задовољена, **кориговати** коефицијенте спреге између суседних резонатора

„Port tuning“ оптимизација

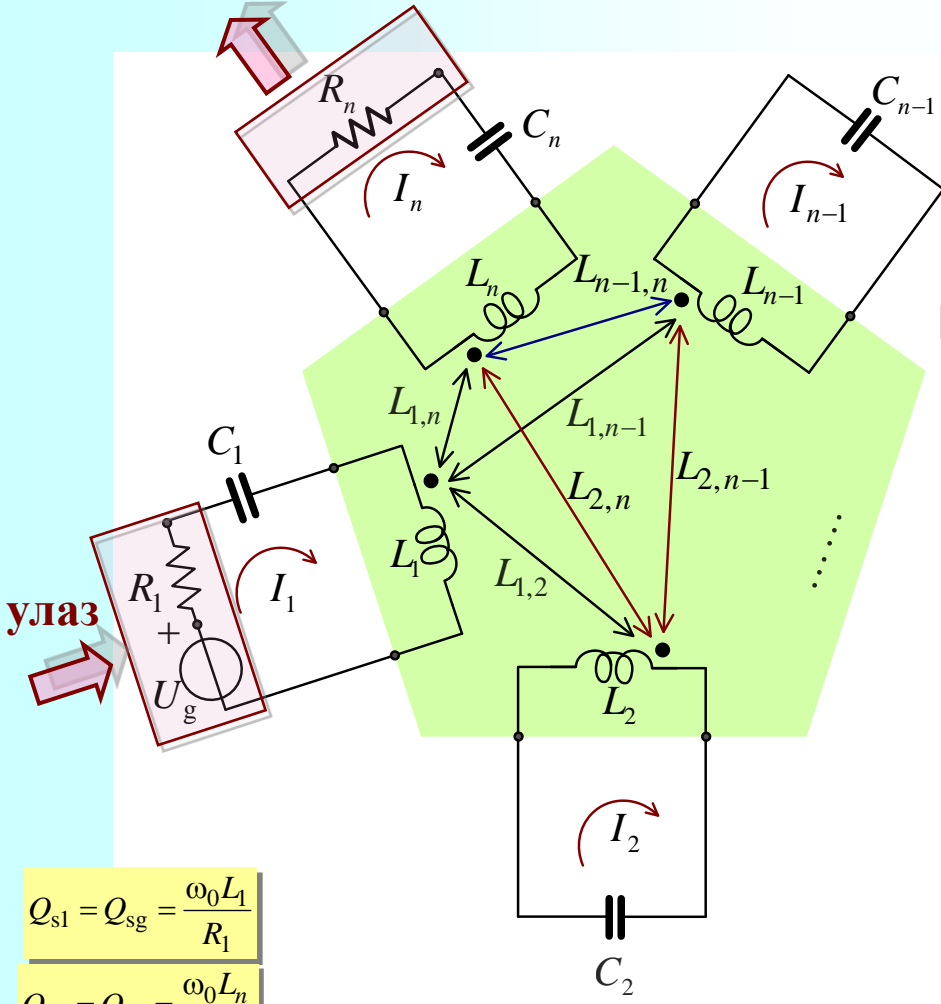


Алгоритам за реализацију филтара са локализованим импулсним одзивом (5)

- Прецизније подесити импулсни одзив незнатном променом ширине резонатора
- Прецизније обликовати импулсни одзив, односно бочне листове његовог релативног слабљења; подесити облик **уводника (tapered line)** и положај **металног поклопца** изнад структуре
- Направити **лабораторијски прототип**

Основни модел филтра са спрегнутим резонаторима

излаз



$$[\mathbf{Z}] = \begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} & -j\omega L_{1,2} & \dots & -j\omega L_{1,n-1} & -j\omega L_{1,n} \\ -j\omega L_{2,1} & j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} & \dots & -j\omega L_{2,n-1} & -j\omega L_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -j\omega L_{n-1,1} & -j\omega L_{n-1,2} & \dots & j\omega L_{n-1} + \frac{1}{j\omega C_{n-1}} & -j\omega L_{n-1,n} \\ -j\omega L_{n,1} & -j\omega L_{n,2} & \dots & -j\omega L_{n,n-1} & R_n + j\omega L_n + \frac{1}{j\omega C_n} \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{Z}_{\text{norm}}] = \frac{1}{\omega_0 L B_\Delta} [\mathbf{Z}] \quad [\mathbf{Z}_{\text{norm}}]_{ij} = -j \frac{\omega}{\omega_0} \frac{L_{21}}{L} \frac{1}{B_\Delta} \approx -j \frac{L_{21}}{L} \frac{1}{B_\Delta}$$

$$[\mathbf{Z}_{\text{norm}}] \approx \begin{bmatrix} \frac{1}{q_{\text{sg}}} + p & -jm_{12} & \dots & -jm_{1n} \\ -jm_{21} & p & \dots & -jm_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -jm_{n1} & -jm_{n2} & \dots & \frac{1}{q_{\text{sp}}} + p \end{bmatrix}$$

$$p = j \frac{1}{B_\Delta} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)$$

$$q_{\text{sg}} = Q_{\text{sg}} B_\Delta$$

$$q_{\text{sp}} = Q_{\text{sp}} B_\Delta$$

$$m_{ij} = \frac{k_{ij}}{B_\Delta}$$

$$Q_{s1} = Q_{\text{sg}} = \frac{\omega_0 L_1}{R_1}$$

$$Q_{sn} = Q_{\text{sp}} = \frac{\omega_0 L_n}{R_n}$$

$$k_{ij} = \frac{L_{ij}}{\sqrt{L_i L_j}} = \frac{L_{ij}}{L}$$

$$L = L_1 = L_2 = \dots = L_n$$

$$C = C_1 = C_2 = \dots = C_n$$

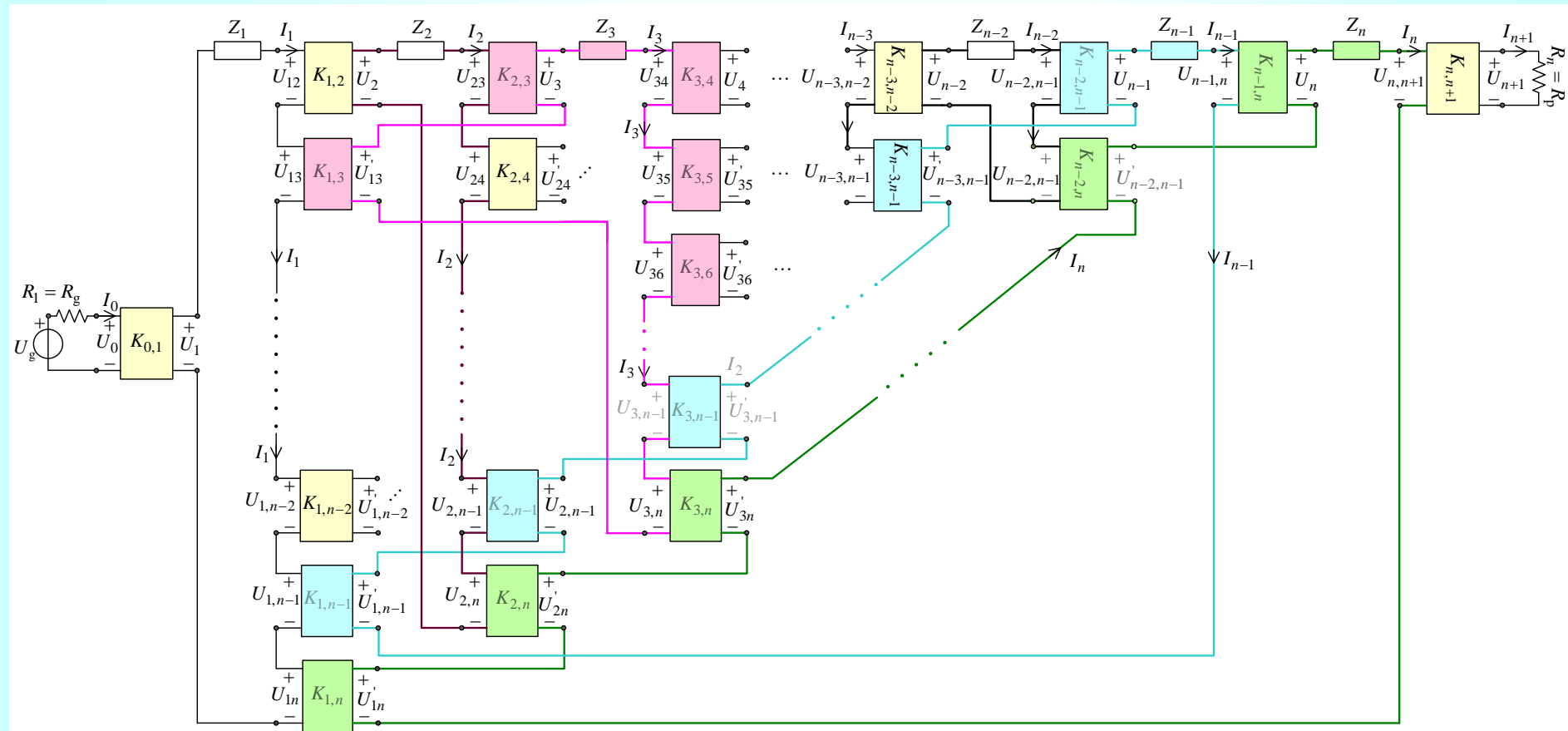
$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 1/\sqrt{LC}$$

$$S_{12} = S_{21} = \frac{2}{\sqrt{q_{\text{sg}} q_{\text{sp}}}} W_{n1}$$

$$S_{11} = S_{22} = 1 - \frac{2}{q_{\text{sg}}} W_{11}$$

$$[\mathbf{W}] = [\mathbf{Z}_{\text{norm}}]^{-1}$$

Општа шематска представа филтра са спрегнутим резонаторима помоћу импедансних инвертора и импеданси које нису у спреси



Матрица система

$$[\mathbf{Z}]_{n+2} = \begin{bmatrix} R_g & -jK_{0,1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -jK_{0,1} & Z_1 & -jK_{1,2} & -jK_{1,3} & \dots & -jK_{1,n-1} & -jK_{1,n} & 0 \\ 0 & -jK_{1,2} & Z_2 & -jK_{2,3} & \dots & -jK_{2,n-1} & -jK_{2,n} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & -jK_{n-1,1} & -jK_{n-1,2} & -jK_{n-1,3} & \dots & -jK_{n-1,n} & Z_n & -jK_{n,n+1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -jK_{n,n+1} & R_p \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{Z}]_n = \begin{bmatrix} \frac{K_{0,1}^2}{R_1} + Z_1 & -jK_{1,2} & \dots & -jK_{1,n-1} & -jK_{1,n} \\ -jK_{1,2} & Z_2 & \dots & -jK_{2,n-1} & -jK_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ -jK_{1,n-1} & -jK_{2,n-1} & \dots & Z_{n-1} & -jK_{n-1,n} \\ -jK_{1,n} & -jK_{2,n} & \dots & -jK_{n-1,n} & \frac{K_{n,n+1}^2}{R_n} + Z_n \end{bmatrix}$$

елиминишу променљиве

I_0

I_{n+1}

$$Z_i = j\omega L_i + \frac{1}{j\omega C_i}$$

филтар пропусник опсега

$$Z_i = j\omega L_i$$

филтар пропусник ниских
учестаности

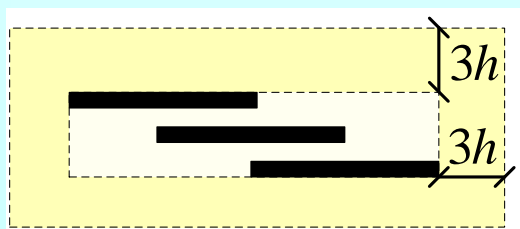
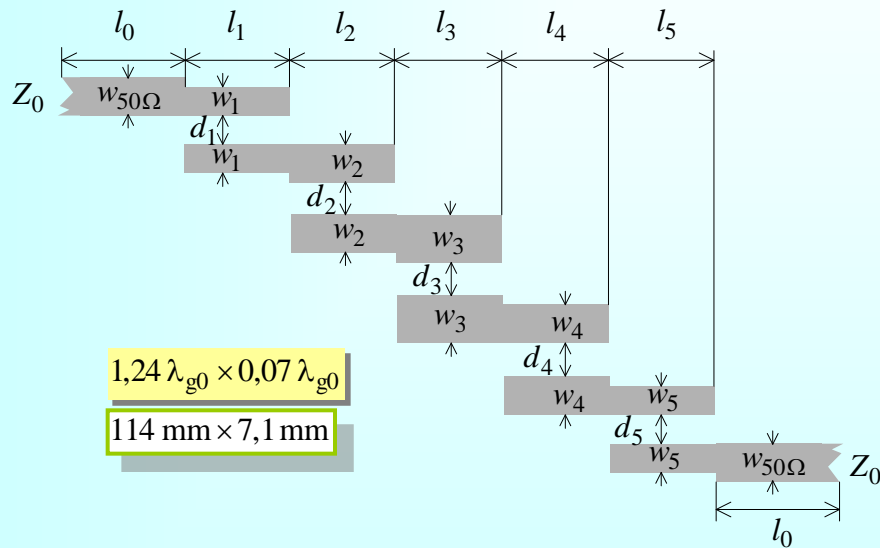
$$[\mathbf{Z}]_n \Rightarrow \omega_0 L B_\Delta \quad [\mathbf{Z}_{\text{norm}}]$$

$$[\mathbf{Z}]_n \Rightarrow L \Omega_{p, \text{proto}} \quad [\mathbf{Z}_{\text{proto}}]$$

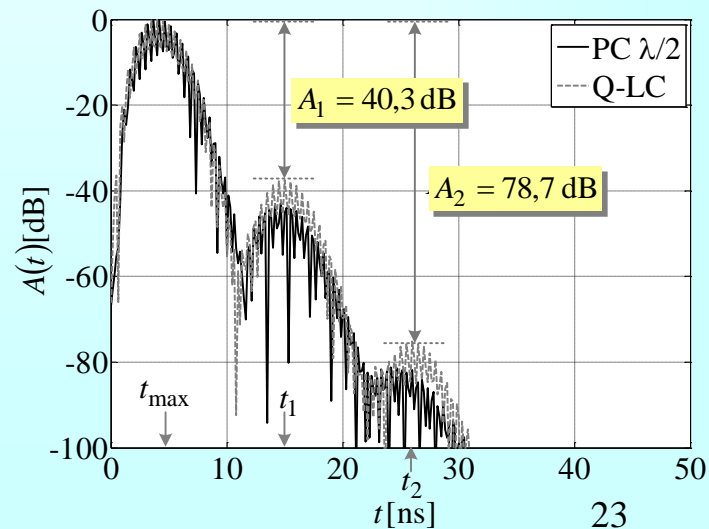
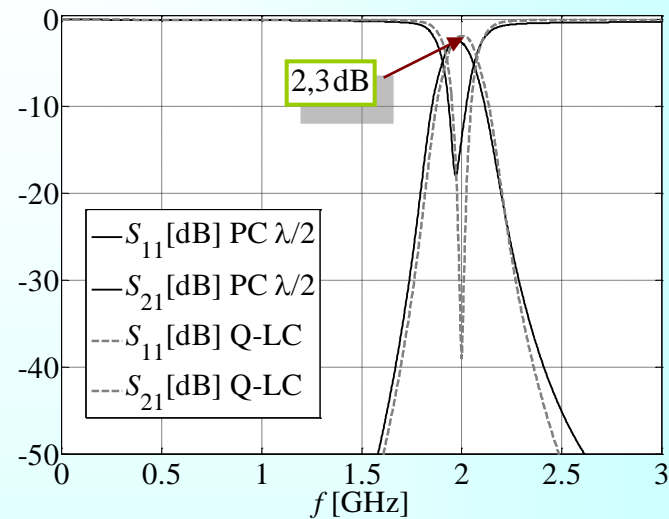
$$R_1 = R_n = Z_0 = 1 \Omega$$

$$L = L_1 = L_2 = \dots = L_n$$

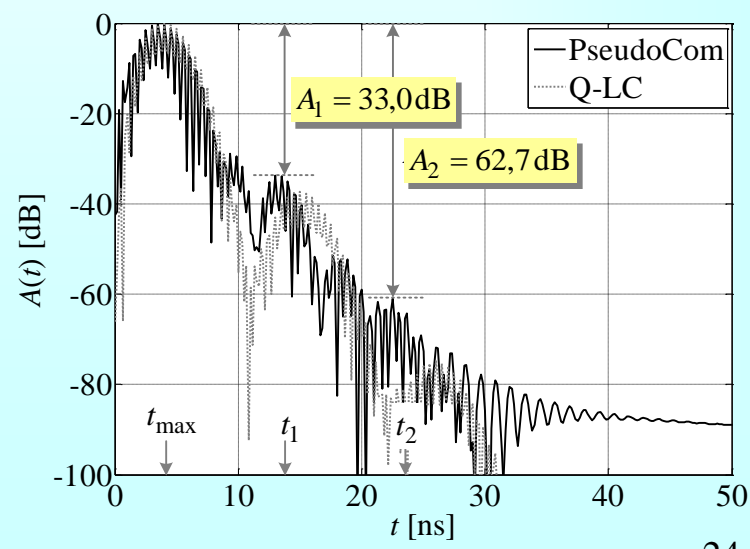
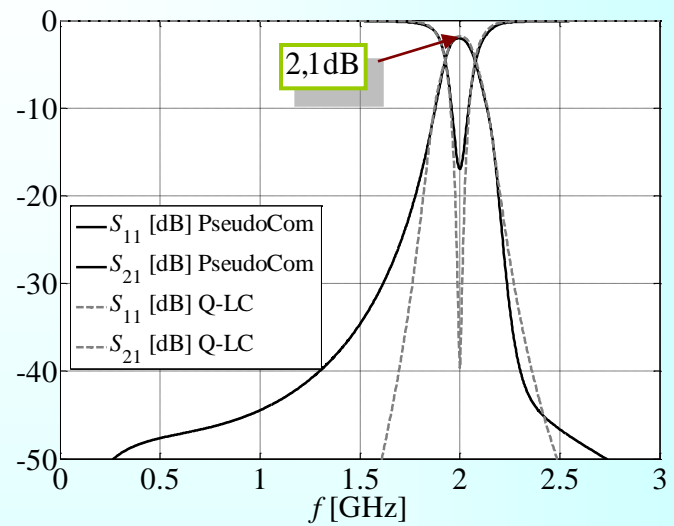
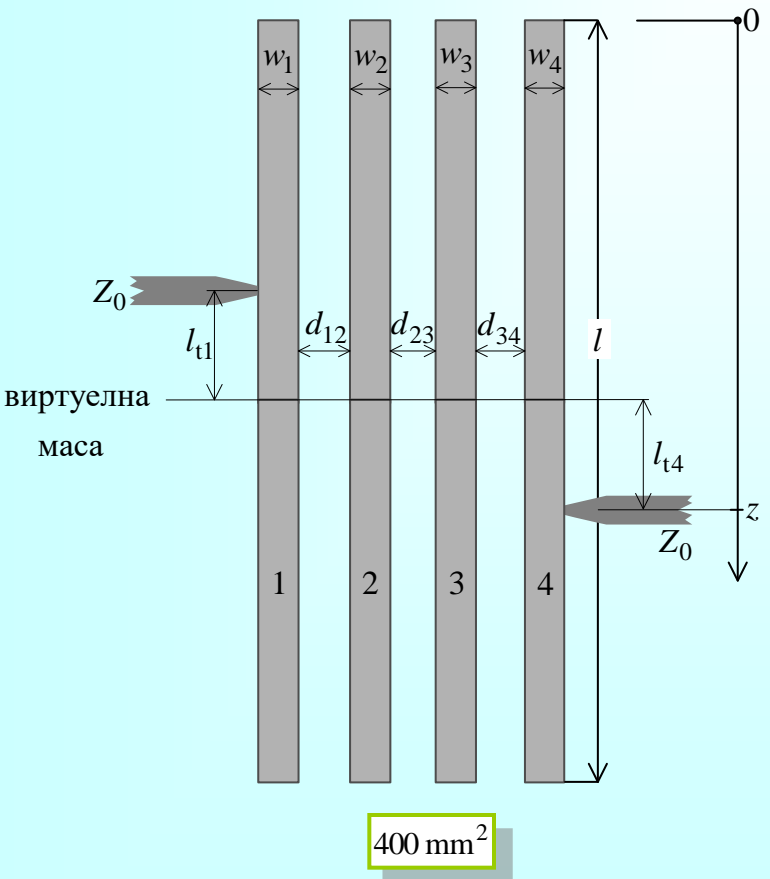
Филтар са паралелно спрегнутим полуталасним резонаторима (РС $\lambda/2$)



површине заузећа штампане

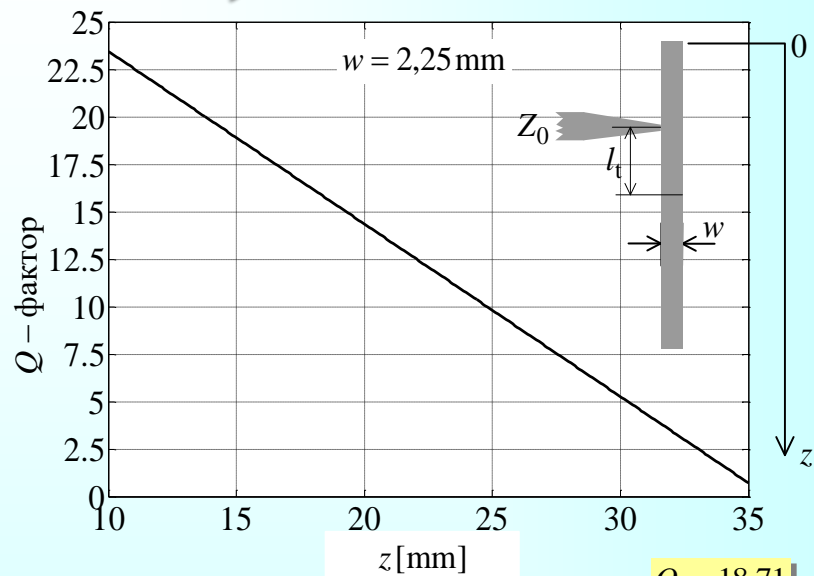
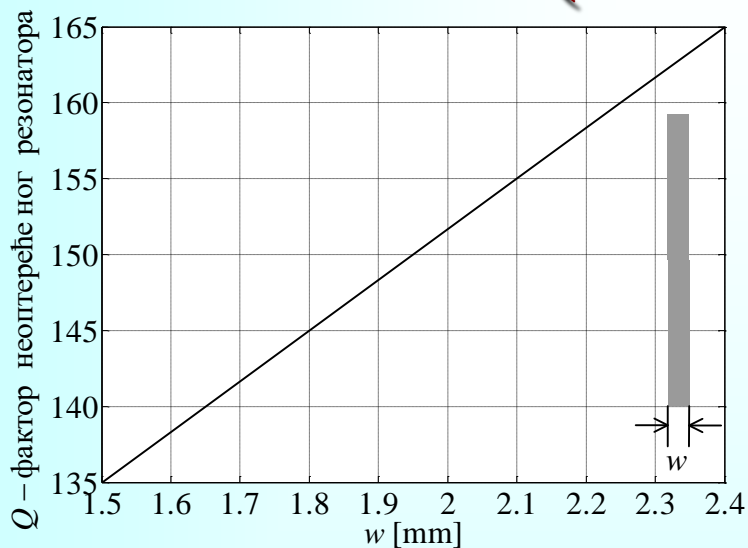


Модификовани чешљасти филтар (PseudoCom)



$t_{\max} = 3,5 \text{ ns}$ $t_1 = 13,5 \text{ ns}$ $t_2 = 23,5 \text{ ns}$

Модификовани чешљасти филтар (PseudoCom)



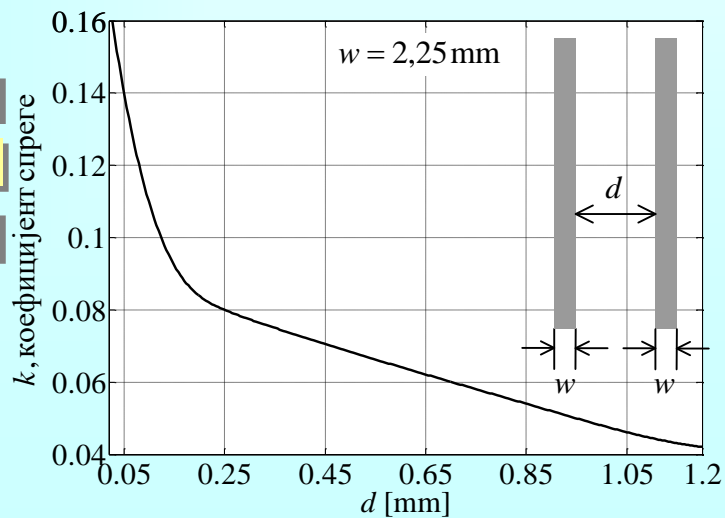
$Q_1 = 18,71$

$Q_4 = 6,11$

$k_{12} = 0,051$

$k_{23} = 0,079$

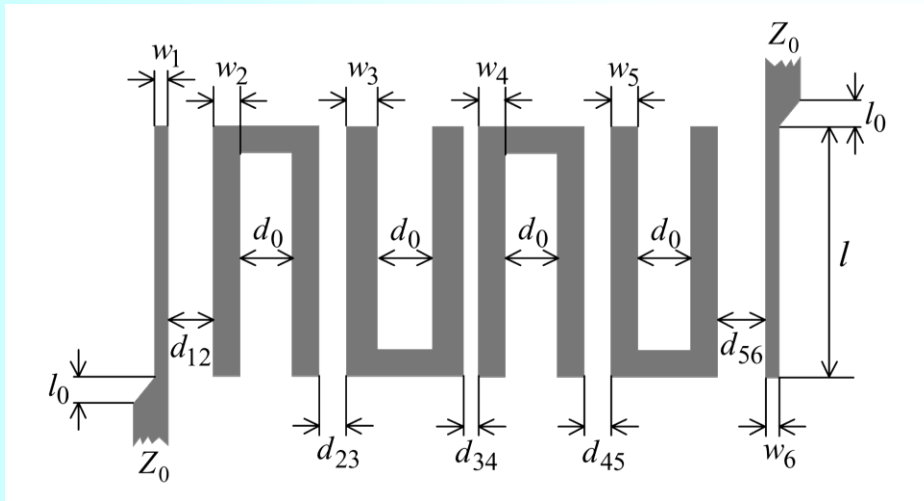
$k_{34} = 0,145$



i	w_i [mm]	d_i [mm]	l_i [mm]	z [mm]
1	2,35	0,9	41	15,3
2	2,05	0,25	41	
3	2,15	0,04	41	
4	1,7		41	29

Граница резолуције

Филтар са укосницама (Hairpin)

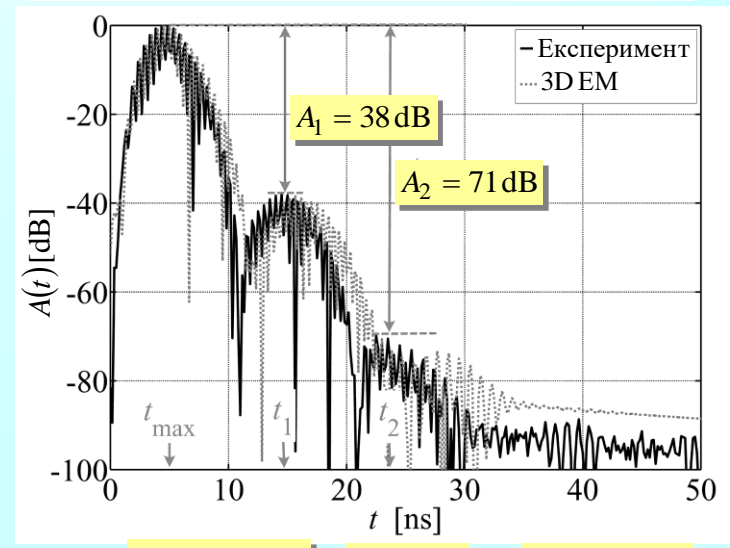
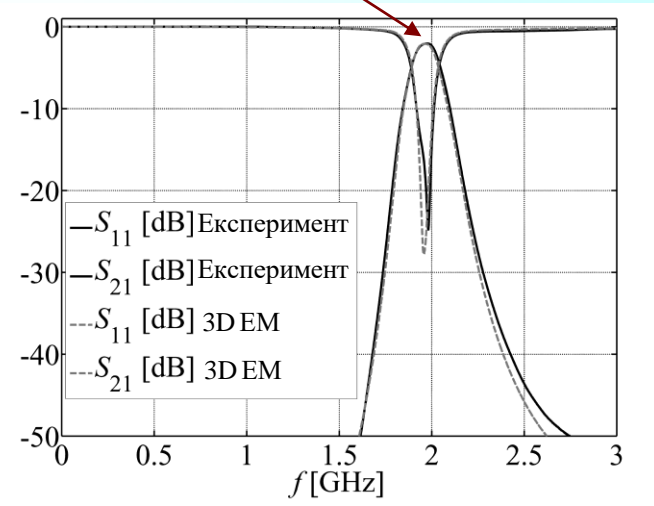


$0,17 \lambda_{g0} \times 0,25 \lambda_{g0}$

15,45 mm \times 22,85 mm



$f_0 = 1.98 \text{ GHz} \Rightarrow 2 \text{ dB}$



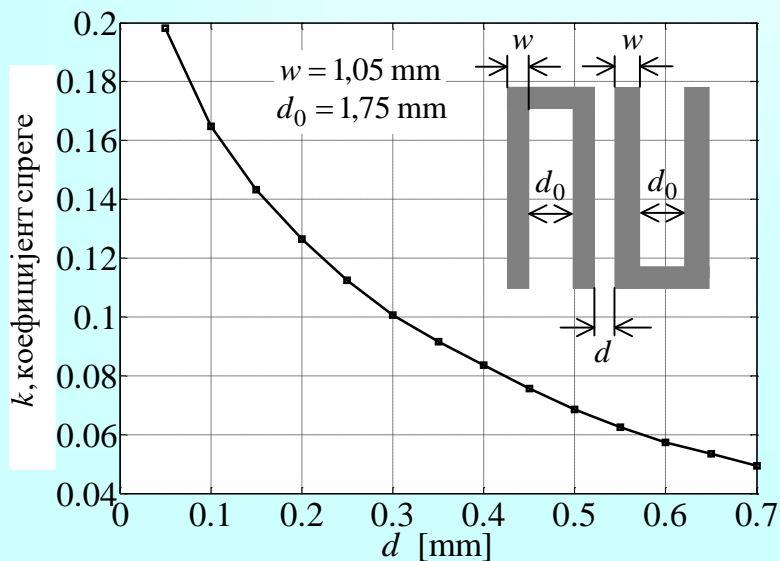
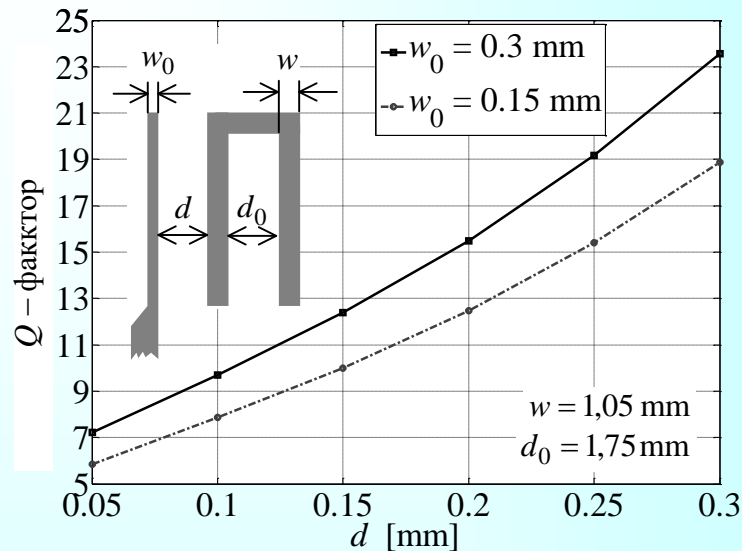
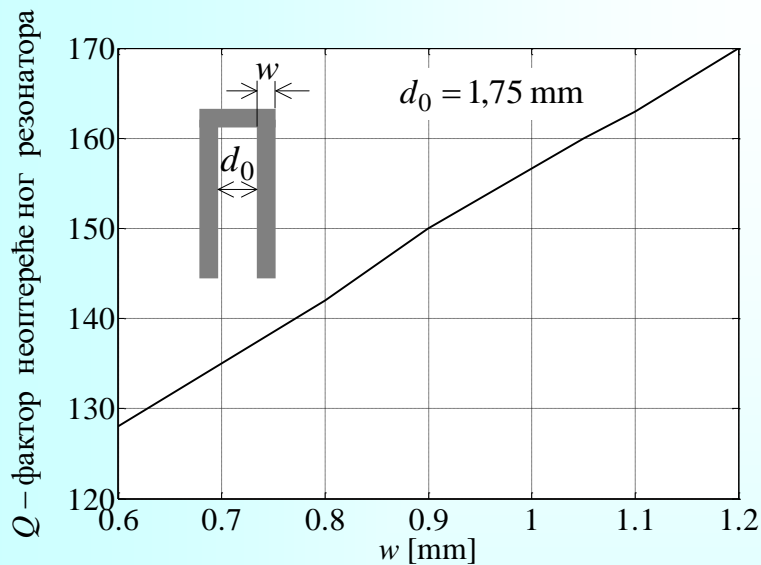
$t_{\max} = 4,33 \text{ ns}$

$t_1 = 15 \text{ ns}$

$t_2 = 23,50 \text{ ns}$

M. M. Potrebić and D. V. Tošić,
 “Selective bandpass filter with concentrated impulse response,”
 Microwave and Optical Technology Letters, Nov. 2008.

Филтар са укосницама (Hairpin)



i	w_i [mm]	$d_{i,i+1}$ [mm]
1	0,3	0,2
2	1,0	0,65
3	1,15	0,5
4	1,1	0,2
5	0,6	0,15
6	0,2	

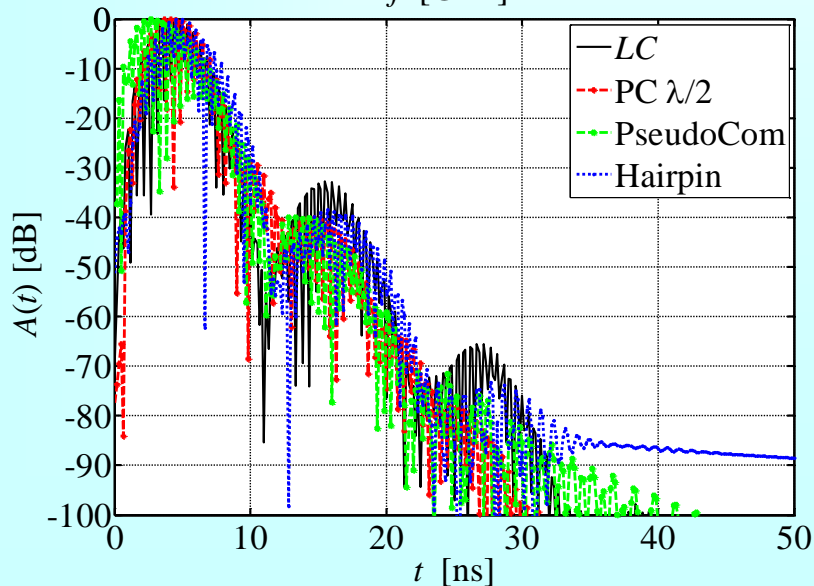
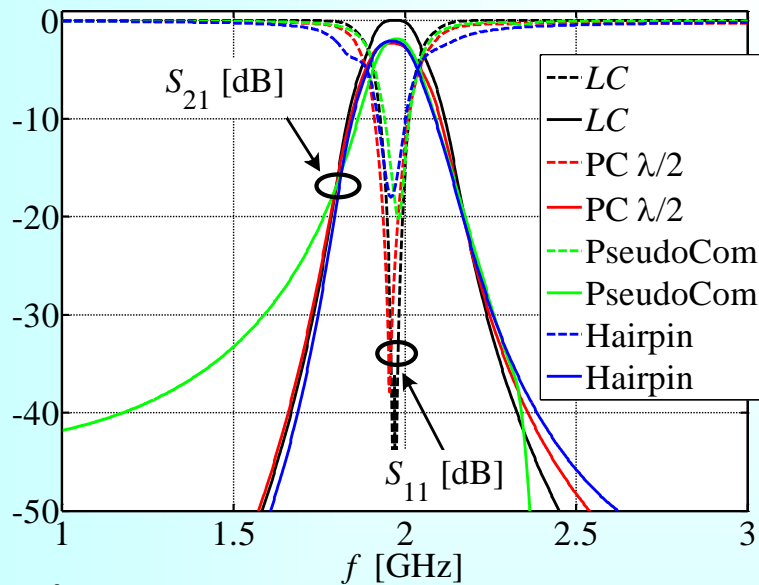
$l = 22,85 \text{ mm}$

$l_0 = 0,5 \text{ mm}$

$d_0 = 1,6 \text{ mm}$

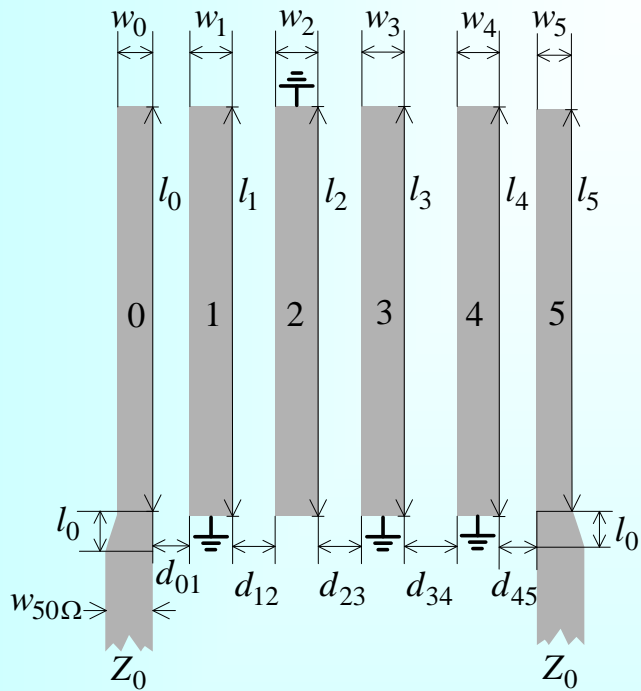
$w_{50\Omega} = 1,1 \text{ mm}$

Поређење карактеристика филтара PC $\lambda/2$, Hairpin, PseudoCom



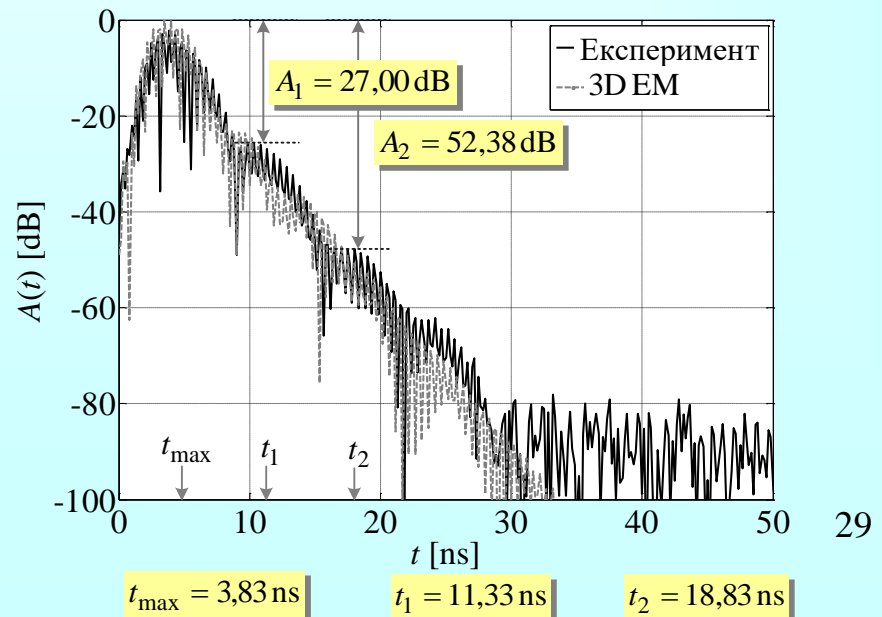
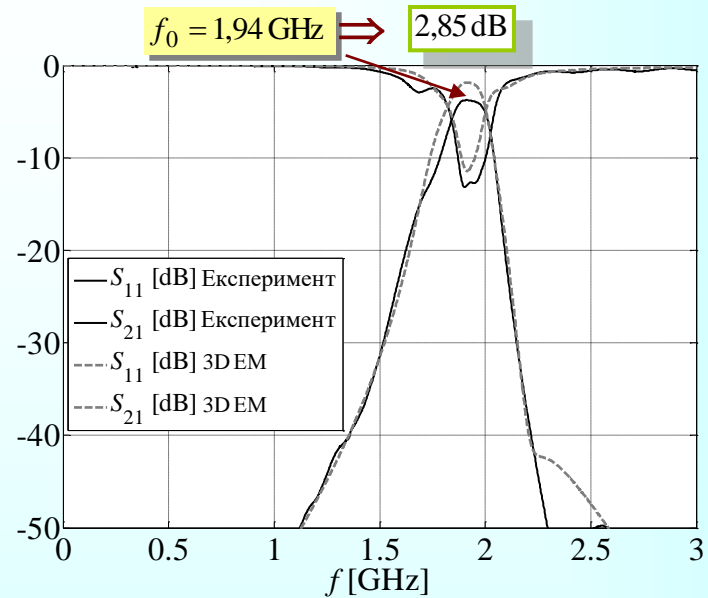
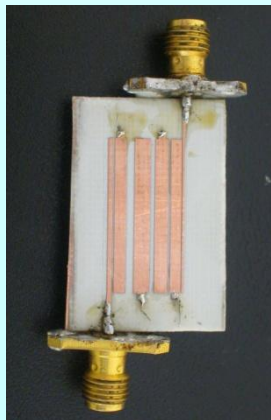
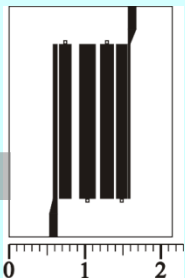
Реализација	LC	PC $\lambda/2$	PseudoCom	Hairpin
A_1 [dB]	32,5	40,3	40,1	38
A_2 [dB]	65	78,7	71,6	74
t_{\max} [ns]	4,33	4,67	4,33	4,5
t_1 [ns]	15,5	14,67	15	16,4
t_2 [ns]	26,67	24,67	24,5	28,3
$(t_1 - t_{\max})$ [ns]	11,17	10,00	10,67	11,9
$(t_2 - t_{\max})$ [ns]	11,17	10,00	9,50	11,9
P_1 [mm ²]	N/A	809,4	422	353
P_2 [mm ²]	N/A	993,3	591	477

Интердигитални филтар

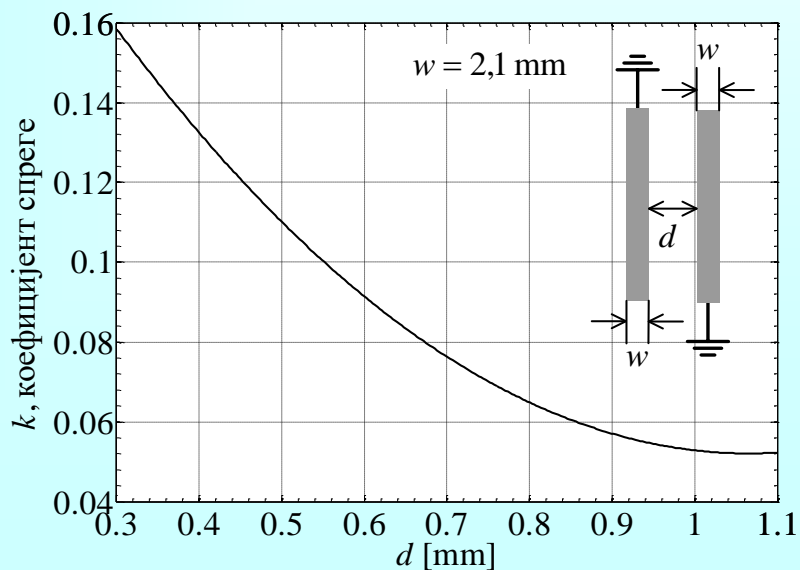
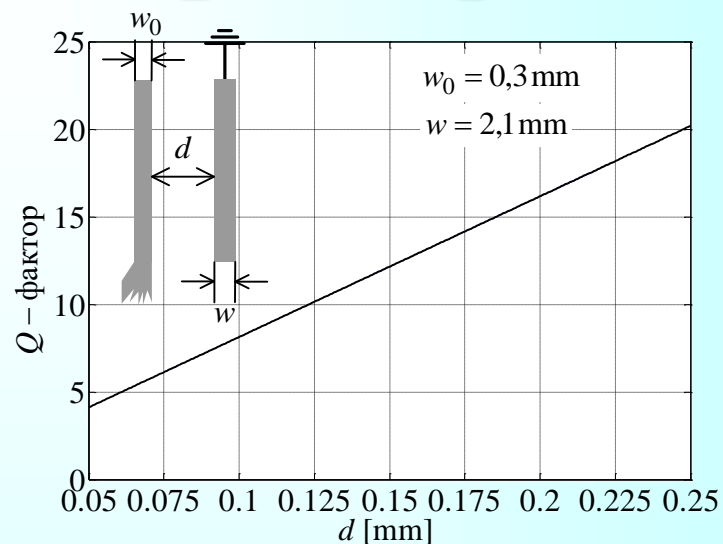
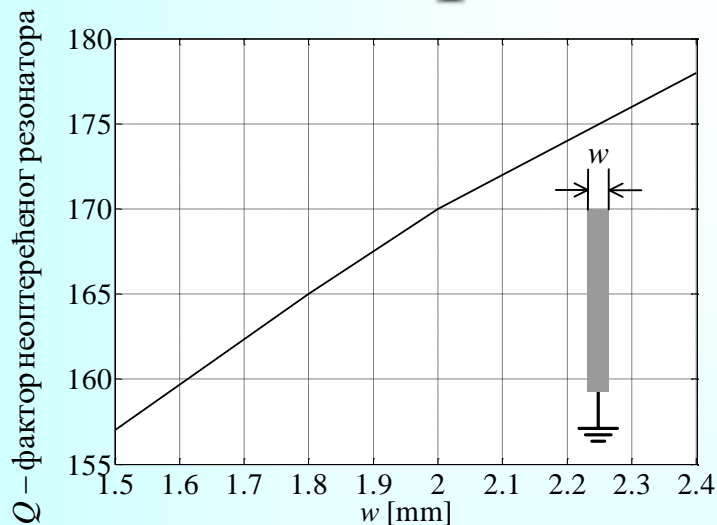


$0,1\lambda_{g0} \times 0,24\lambda_{g0}$

9 mm × 22,4 mm



Интердигитални филтар



Оптималне димензије		
w_i [mm]	$d_{i,i+1}$ [mm]	l_i [mm]
1,6	1,05	20,4
2,15	0,6	20,4
1,8	0,3	20,4
1,5		20,4

$$w_0 = 0,6 \text{ mm}$$

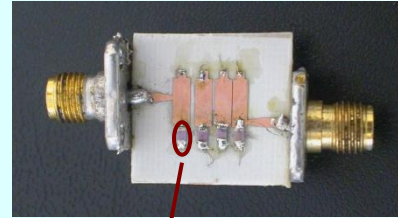
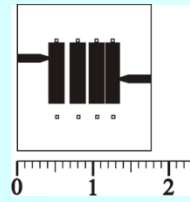
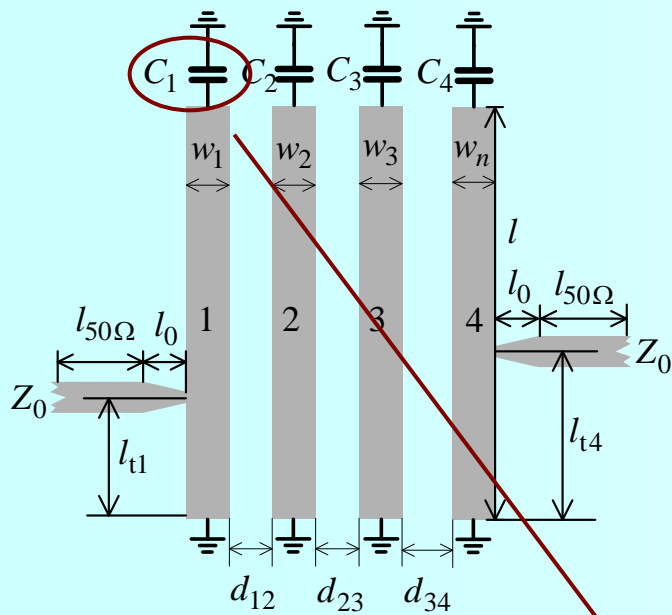
$$w_5 = 0,3 \text{ mm}$$

$$l_0 = l_5 = 20,4 \text{ mm}$$

$$d_{01} = 0,225 \text{ mm}$$

$$d_{45} = 0,075 \text{ mm}$$

Чешљасти филтар

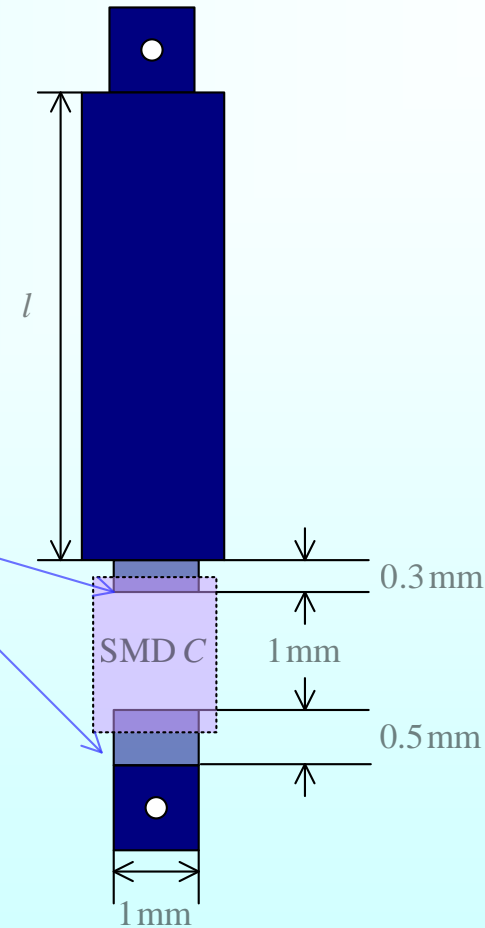
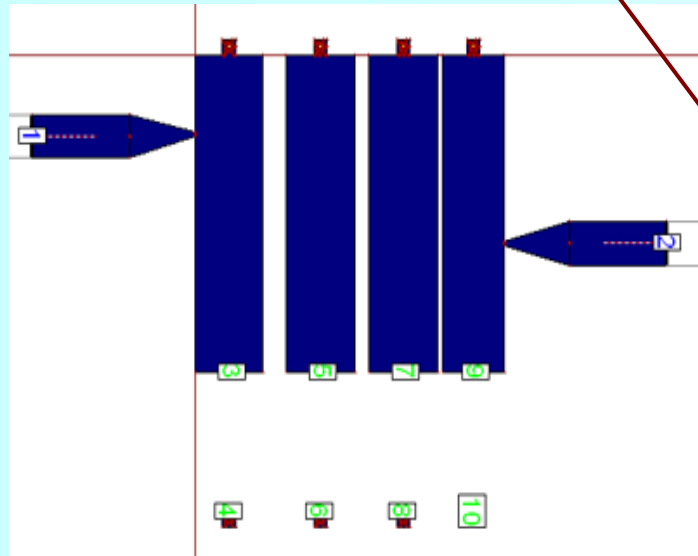


$0,1\lambda_{g0} \times 0,1\lambda_{g0}$

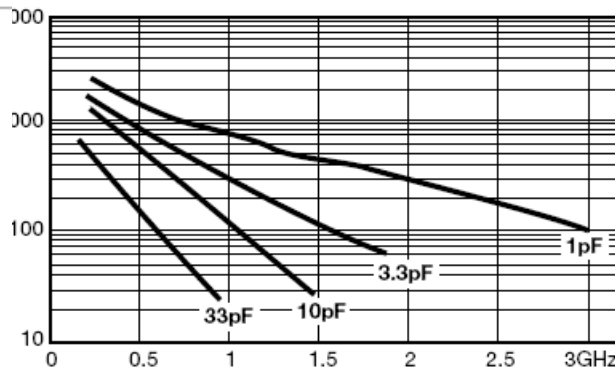
$8,95 \text{ mm} \times 9,5 \text{ mm}$



острвца за
монтирање
кондензатора



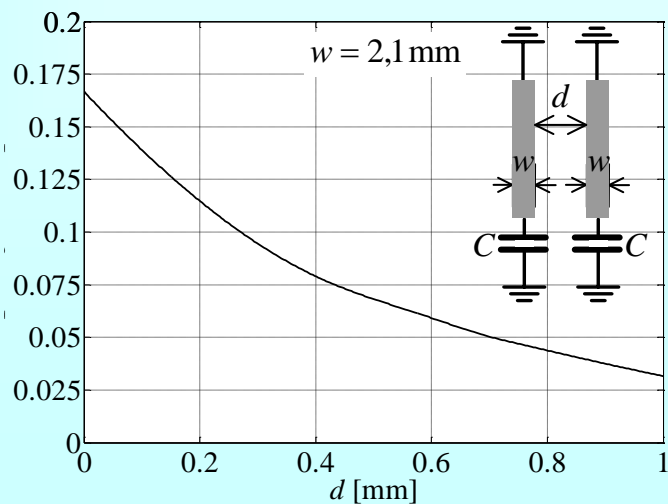
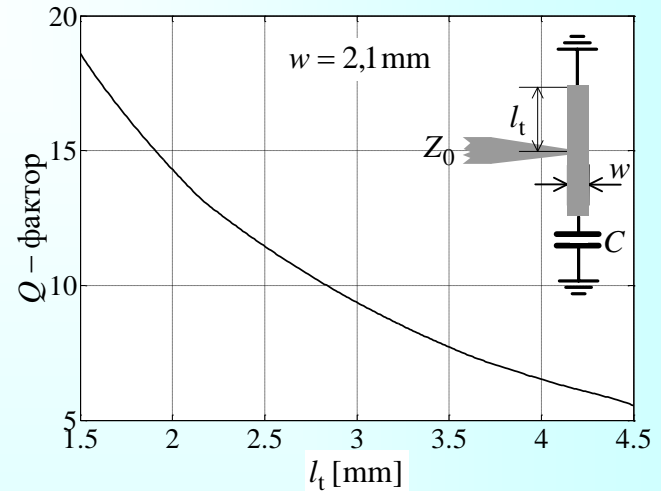
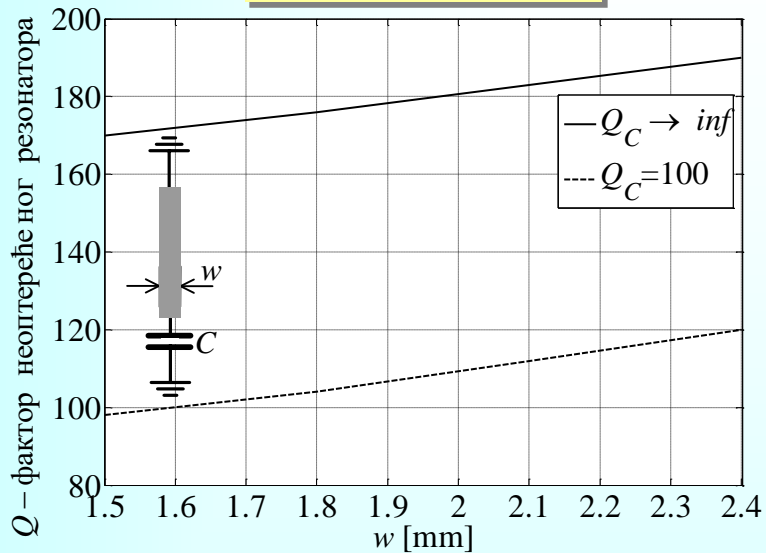
Typical Q vs. Frequency
Accu-F®/Accu-P® 0805



Measured on Boonton 34-A
(34-A limits measurements to 3GHz)

Чешљасти филтар (Comblines)

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 2,7 \mu\text{F}$$

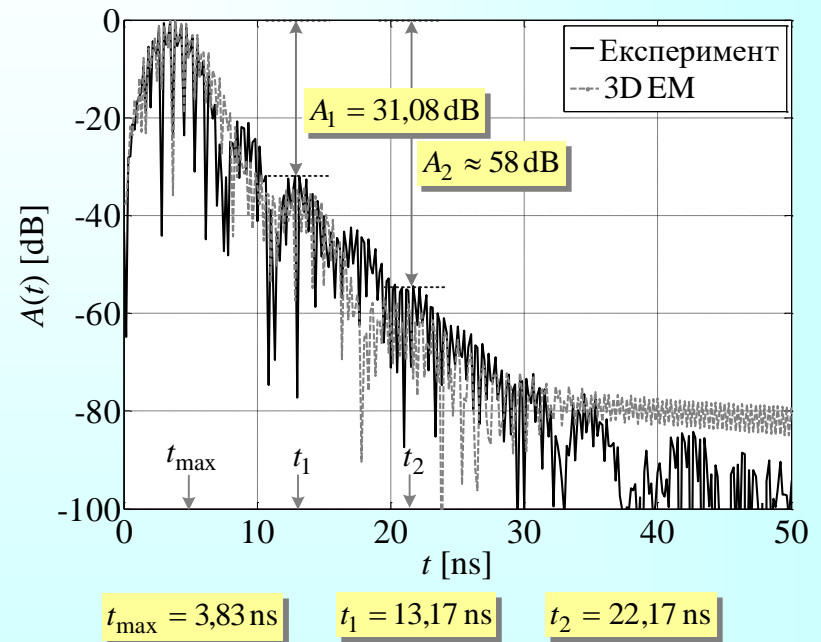
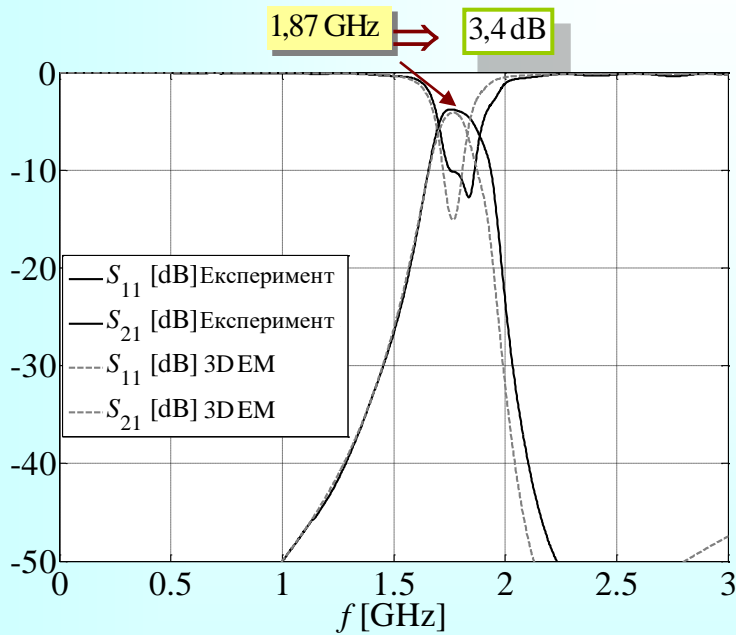


Оптималне димензије	
w_i [mm]	$d_{i,i+1}$ [mm]
2,1	0,55
2,1	0,25
2,1	0,05
1,8	

$$l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = 5,7 \text{ mm}$$

$$l_{t1} = 1,35 \text{ mm} \quad l_{t4} = 5,05 \text{ mm}$$

Чешљасти филтар (Comblines)

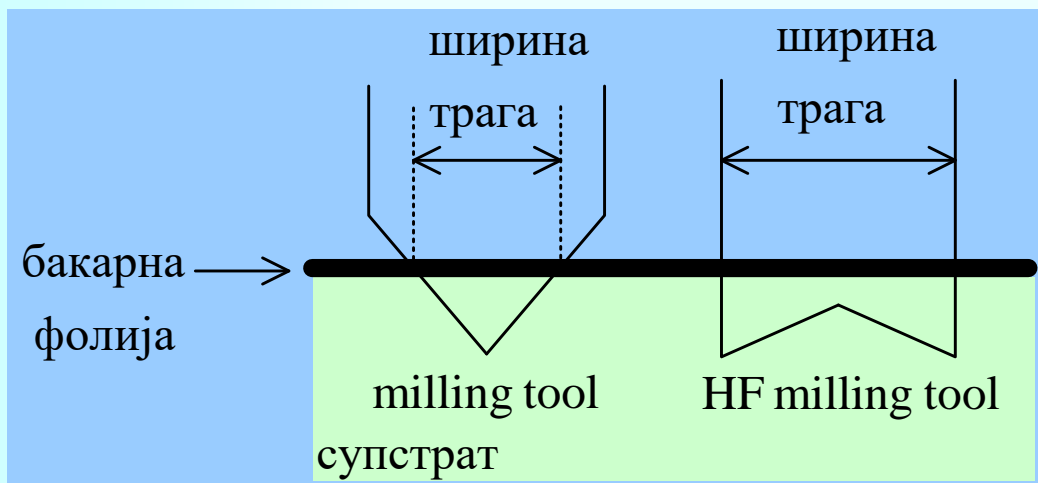


Поређење карактеристика филтара LC, Hairpin, Interdigital, Comblinе

Реализација	LC	Hairpin	Interdigital	Comblinе
f_0 [GHz]	2	1,98	1,94	1,87
B_Δ	0,08	0,082	0,085	0,089
$A_{21}(f_0)$ [dB]	0	2	2,85	3,4
A_1 [dB]	32,5	$A_2/A_1=$	$A_2/A_1=$	$A_2/A_1=$
A_2 [dB]	65	1.86	1.94	1.86
t_{\max} [ns]	4,33	4,33	3,83	3,83
t_1 [ns]	15,5	15	11,33	13,17
t_2 [ns]	26,67	23,5	18,83	22,17
$(t_1 - t_{\max})$ [ns]	11,17	10,67	7,5	9,34
$(t_2 - t_{\max})$ [ns]	11,17	8,5	7,5	9
P_1 [mm ²]	N/A	353,03	201,6	85,025
P_2 [mm ²]	N/A	476,93	304,8	149,4

Коришћена технологија и запажања при мерењу

- FP-21TP Precision - MITS Electronics
(резолуција машине $50\ \mu\text{m}$)



Коришћена технологија и запажања при мерењу

- Анализатора мрежа Agilent E5062A -
Agilent Technologies
(2-портна калибрација - калибрациони
кит 85052A)
- Провера параметара коришћеног
супстрата (RO4003C)

Закључак (1)

Предложен је нов метод за пројектовање планарних селективних микроталасних филтара

- малог заузећа штампане плочице
- уског пропусног опсега
- са локализованим импулсним одзивом у времену
- нов лабораторијски прототип филтра
- експериментална верификација мерењем на лабораторијским прототиповима анализираних реализација
- одређивање оптималне реализације за дату спецификацију и технолошка ограничења

Закључак (2)

Предложен је нов алгоритам синтезе филтра са спрегнутим резонаторима, помоћу импедансних инвертора и импеданси које нису у спреси, којом се може представити и филтар пропусник ниских учестаности и филтар пропусник опсега учестаности

Закључак (3)

- Подручја примене истраживачких резултата обухватају комуникационе и радарске системе
- Ограничења истраживања се огледају у претпоставци да је функција преноса **полиномска** и да је реализација филтра планарна

Додатно ограничење је расположива технологија за израду прототипа, односно **резолюција од 50 μm** , што ограничава минималну ширину процепа, и минималну ширину траке, односно реализације за више микроталасне учестаности

Даљи правци развоја

- Могућа даља истраживања би подразумевала анализу реализација општије класе селективних микроталасних филтара са **несуседним спрегама** резонатора, који би имали коначне нуле у преносној функцији, и очекивану већу селективност
- Истраживање реализација **тродимензионалних структура**, као и утицаја оклапања, такође чине правце могућих даљих истраживања