

Електротехнички факултет Универзитета у Београду

**Пројектовање микроталасног филтра са
спрегнутим резонаторима у облику
правоугаоника у микротракастој техници**

- Мастер рад -

Ментор:

др Дејан Тошић, ванр. проф.

Студент:

дипл. инж. Марина Илић

Број индекса 3261/2009

Београд, септембар 2011. године

Садржај

Списак коришћених ознака	i
Списак назива слика	iv
Списак назива табела	ix
1. Увод.....	1
2. Основни појмови теорије филтара	3
3. Реализација филтра пропусника опсега.....	6
3.1. Симулациони модел филтра пропусника опсега у вакууму	8
3.2. Симулациони модел филтра пропусника опсега на супстрату FR-4.....	16
4. Израда лабораторијског прототипа филтра пропусника опсега.....	20
5. Софтверска 3D ЕМ компонента асиметричног спрежњака.....	23
6. Експериментални резултати и поређење са резултатима симулација за филтар пропусник опсега	33
6.1. Резултати симулација за BPF у вакууму.....	34
6.2. Резултати мерења и симулација за BPF1 на супстрату FR-4	38
6.3. Резултати мерења и симулација за BPF2 на супстрату FR-4	44
7. Закључак.....	50
Литература.....	52

Списак коришћених ознака

3D	тродимензионални
a	дужина краће странице резонатора у облику правоугаоника; дужина асиметричног спрежњака [m]
A_{dB}	слабљење [dB]
A_{ϵ}	највеће слабљење у пропусном опсегу ако је $\omega = \omega_{\epsilon}$, за Чебишевљеву апроксимацију [dB]
A_p	максимално слабљење у пропусном опсегу [dB]
A_s	минимално слабљење у непропусном опсегу [dB]
Avg Factor	број мерења која се усредњавају у анализатору мрежа
b	дужина дуге странице резонатора у облику правоугаоника [m]
B	ширина пропусног опсега [Hz]
BPF	модел филтара пропусника опсега у вакууму
BPF1	први лабораторијског прототипа филтра пропусника опсега
BPF2	други лабораторијског прототипа филтра пропусника опсега
d_0	ширина процепа резонатора у облику правоугаоника [m]
EM	електромагнетски
f_c	централна учестаност пропусног опсега [Hz]
FR-4	супстрат витропласт
F_p	гранична фреквенција пропусног опсега [Hz]
F_s	гранична фреквенција непропусног опсега [Hz]
h	дебљина супстрата [m]
IFBW	ширина пропусног опсега међуфреквенцијског филтра анализатора мрежа [Hz]
j	имагинарна јединица
l_{50}	дужина уводника [m]
L_A	унето слабљење између два приступа [dB]
L_R	неприлагођење неког приступа [dB]
M2CLIN	асиметричан одсечак пара спрегнутих микротракастих водова, елемент у софтверу Microwave Office

MBAND90X	правоугаони савијутак микротракастог вода, елемент у софтверу Microwave Office
MGAP2	процеп у траци микротракастог вода, елемент у софтверу Microwave Office
MLIN	одсечак микротракастог вода, елемент у софтверу Microwave Office
MoM	Method of Moments
MTEE	T-спој микротракастог вода, елемент у софтверу Microwave Office
P	снага извора (предајника) у анализатору мрежа [dBm]
PCB	Printed Circuit Board
RF	Radio frequency
Rho	количник специфичне отпорности метала и специфичне отпорности злата
s	ширина процепа између резонатора [m]
S	матрица параметара расејања
S_{11}	коэффициент рефлексije на првом приступу
S_{12}	коэффициент трансмисије од другог ка првом приступу
S_{21}	коэффициент трансмисије од првог ка другом приступу
S_{22}	коэффициент рефлексije на другом приступу
$S_{21}(j\omega)$	фреквенцијски одзив
$ S_{21}(j\omega) $	амплитудски одзив
$\arg(S_{21}(j\omega))$	фазни одзив
$S_{21dB}(\omega)$	амплитудски одзив [dB]
$S_{21}(s) _{s=\sigma+j\omega}$	преносна функција филтра у домену Лапласове трансформације
SMA	SubMiniature version A, тип конектора
t	дебљина метализације [m]
$\text{tg } \delta$	губици у супстрату [без димензије]
$T_n(x)$	Чебишевљево полином степена n
w	ширина проводника резонатора [m]
w_{50}	ширина уводника која одговара номиналној импеданси приступа од 50 Ω [m]
x	положај уводника [m]
σ	специфична проводност бакра [MS/m]

ε	сачинитељ таласности (ripple factor)
ε_r	релативна диелектрична константа [без димензије]
ω	кружна учестаност [rad/s]
ω_c	гранична кружна учестаност пропусног опсега [rad/s]

Списак назива слика

- Слика 2.1.** Габарит филтра пропусника опсега.
- Слика 2.2.** Чебишевљева апроксимација.
- Слика 3.1.** Скица филтра пропусника опсега.
- Слика 3.1.1.** Симулациони модел ВРФ у вакууму у софтверу Microwave Office.
- Слика 3.1.2.** Тродимензионални електромагнетски модел ВРФ у вакууму у софтверу WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 3.1.3.** Подешавање Maximum Edge Width. У пољу је уписано име симбола (edge) који је дефинисан у табели симбола.
- Слика 3.1.4.** Подела проводника на потпроводнике.
- Слика 3.1.5.** Подешавање сегментације у софтверу LINPAR.
- Слика 3.1.6.** Изглед сегментације попречног пресека проводника у софтверу LINPAR.
- Слика 3.1.7.** Побуда ВРФ у софтверу WIPL-D 3D EM Solver, са и без ознака, а) и б) респективно.
- Слика 3.1.8.** Задавање сложеног споја преко опције Junctions у софтверу WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 3.1.9.** Шематска представа асиметричног спрежњака у микроталасном колу у софтверу WIPL-D Microwave Pro.
- Слика 3.1.10.** Симулациони модел ВРФ у вакууму у софтверу WIPL-D Microwave Pro.
- Слика 3.2.1.** Симулациони модел ВРФ1 на FR-4 супстрату у софтверу Microwave Office.
- Слика 3.2.2.** Симулациони модел ВРФ2 на FR-4 супстрату у софтверу Microwave Office.
- Слика 3.2.3.** Тродимензионални електромагнетски модел ВРФ1 на супстрату FR-4 у софтверу WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 3.2.4.** Тродимензионални електромагнетски модел ВРФ2 на супстрату FR-4 у софтверу WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 3.2.5.** Симулациони модел ВРФ1 на FR-4 супстрату у софтверу WIPL-D Microwave Pro.
- Слика 3.2.6.** Симулациони модел ВРФ2 на FR-4 супстрату у софтверу WIPL-D Microwave Pro.
- Слика 4.1.** Изгледи проводника на штампаној плочици (layout) за ВРФ1 и ВРФ2 у софтверу Microwave Office, под а) и б) респективно.
- Слика 4.2.** РСВ layout за ВРФ1 и ВРФ2 у софтверу Protel 99 SE, под а) и б), респективно.

- Слика 4.3.** Изглед женског SMA Z LEM конектора са 4 шрафа.
- Слика 4.4.** Лабораторијски прототипови BPF1 и BPF2, са конекторима а) и б), без конектора в) и г), респективно.
- Слика 5.1.** 3D EM модел спрежњака у софтверу WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 5.2.** Приступ спрежњака са слике 5.1.
- Слика 5.3.** Подешавање опције De-embedding.
- Слика 5.4.** Параметар S_{11} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro.
- Слика 5.5.** Параметар S_{12} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro.
- Слика 5.6.** Параметар S_{21} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro.
- Слика 5.7.** Параметар S_{22} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro.
- Слика 5.8.** Параметар S_{11} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_1,5 mm, BPF1_2,5 mm, BPF1_3,5 mm, BPF1_4,5 mm – симулације WIPL-D Microwave Pro умањених дужина спрежњака за дате вредности.
- Слика 5.9.** Параметар S_{12} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_1,5 mm, BPF1_2,5 mm, BPF1_3,5 mm, BPF1_4,5 mm – симулације WIPL-D Microwave Pro умањених дужина спрежњака за дате вредности.
- Слика 5.10.** Параметар S_{21} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_1,5 mm, BPF1_2,5 mm, BPF1_3,5 mm, BPF1_4,5 mm – симулације WIPL-D Microwave Pro умањених дужина спрежњака за дате вредности.
- Слика 5.11.** Параметар S_{22} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_1,5 mm, BPF1_2,5 mm, BPF1_3,5 mm, BPF1_4,5 mm – симулације WIPL-D Microwave Pro умањених дужина спрежњака за дате вредности.
- Слика 5.12.** Параметар S_{11} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW_mod – симулација WIPL-D Microwave Pro после корекције.
- Слика 5.13.** Параметар S_{12} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW_mod – симулација WIPL-D Microwave Pro после корекције.
- Слика 5.14.** Параметар S_{21} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW_mod – симулација WIPL-D Microwave Pro после корекције.

- Слика 5.15.** Параметар S_{11} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW_mod – симулација WIPL-D Microwave Pro после корекције.
- Слика 5.16.** Параметар S_{12} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW_mod – симулација WIPL-D Microwave Pro после корекције.
- Слика 5.17.** Параметар S_{21} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW_mod – симулација WIPL-D Microwave Pro после корекције.
- Слика 5.18.** Параметар S_{22} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW_mod – симулација WIPL-D Microwave Pro после корекције.
- Слика 6.1.1.** Параметар S_{11} у пуном опсегу учестаности за BPF. BPF_mwo – симулација Microwave Office, BPF_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.1.2.** Параметар S_{11} у пропусном опсегу учестаности за BPF. BPF_mwo – симулација Microwave Office, BPF_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.1.3.** Параметар S_{21} у пуном опсегу учестаности за BPF. BPF_mwo – симулација Microwave Office, BPF_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.1.4.** Параметар S_{21} у пропусном опсегу учестаности за BPF. BPF_mwo – симулација Microwave Office, BPF_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.1.5.** Параметар S_{22} у пуном опсегу учестаности за BPF. BPF_mwo – симулација Microwave Office, BPF_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.1.6.** Параметар S_{22} у пропусном опсегу учестаности за BPF. BPF_mwo – симулација Microwave Office, BPF_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.1.7.** Параметар S_{12} у пуном опсегу учестаности за BPF. BPF_mwo – симулација Microwave Office, BPF_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.1.8.** Параметар S_{12} у пропусном опсегу учестаности за BPF. BPF_mwo – симулација Microwave Office, BPF_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.2.1.** Параметри S_{11} и S_{21} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exp – мерења 2. авг 2011.
- Слика 6.2.2.** Параметри S_{11} и S_{21} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exp – мерења 2. авг 2011.

- Слика 6.2.3.** Параметри S_{22} и S_{12} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exr – мерења 2. авг 2011.
- Слика 6.2.4.** Параметри S_{22} и S_{12} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exr – мерења 2. авг 2011.
- Слика 6.2.5.** Параметар S_{11} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exr – мерења 2. авг 2011. BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF1_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.2.6.** Параметар S_{11} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exr – мерења 2. авг 2011. BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF1_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.2.7.** Параметар S_{11} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exr – мерења 2. авг 2011. BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF1_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.2.8.** Параметар S_{21} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exr – мерења 2. авг 2011. BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF1_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.2.9.** Параметар S_{22} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exr – мерења 2. авг 2011. BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF1_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.2.10.** Параметар S_{22} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exr – мерења 2. авг 2011. BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF1_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.2.11.** Параметар S_{12} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exr – мерења 2. авг 2011. BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF1_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.2.12.** Параметар S_{12} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exr – мерења 2. авг 2011. BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF1_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.3.1.** Параметри S_{11} и S_{21} у пуном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_exr – мерења 2. авг 2011.
- Слика 6.3.2.** Параметри S_{11} и S_{21} у пропусном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_exr – мерења 2. авг 2011.
- Слика 6.3.3.** Параметри S_{22} и S_{12} у пуном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_exr – мерења 2. авг 2011.
- Слика 6.3.4.** Параметри S_{22} и S_{12} у пропусном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_exr – мерења 2. авг 2011.

- Слика 6.3.5.** Параметар S_{11} у пуном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_ехр – мерења 2. авг 2011. BPF2_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF2_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.3.6.** Параметар S_{11} у пропусном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_ехр – мерења 2. авг 2011. BPF2_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF2_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.3.7.** Параметар S_{21} у пуном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_ехр – мерења 2. авг 2011. BPF2_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF2_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.3.8.** Параметар S_{21} у пропусном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_ехр – мерења 2. авг 2011. BPF2_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF2_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.3.9.** Параметар S_{22} у пуном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_ехр – мерења 2. авг 2011. BPF2_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF2_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.3.10.** Параметар S_{22} у пропусном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_ехр – мерења 2. авг 2011. BPF2_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF2_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.3.11.** Параметар S_{12} у пуном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_ехр – мерења 2. авг 2011. BPF2_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF2_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.
- Слика 6.3.12.** Параметар S_{12} у пропусном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_ехр – мерења 2. авг 2011. BPF2_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF2_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.

Списак назива табела

Табела 3.1.1. Елементи микроталасног кола у софтверу Microwave Office.

Табела 3.1.2. Елементи микроталасног кола у софтверу WIPL-D Microwave Pro.

1. Увод

Микроталасни филтар је направа која ради у опсегу учестаности електромагнетских таласа од 300 MHz до 300 GHz. Задатак микроталасног филтра подразумева издвајање жељеног опсега учестаности, тј. филтрирање сигнала.

Филтри имају важну улогу у многим RF/микроталасним подсистемима. Користе се да би раздвојили или спојили сигнале различитих фреквенцијских опсега. Фреквенцијски спектар електромагнетских таласа је ограничен и мора бити додељен према примени. Филтри служе да би издвојили или ограничили RF/микроталасне сигнале унутар граница додељеног опсега. Реализације савремених система бежичних комуникација, представљају све строжије захтеве које треба да задовоље микроталасни филтри. Строги критеријуми које треба да задовоље микроталасни филтри односе се на високе перформансе, мале габарите, ниску цену, малу тежину и сл. У зависности од захтева и спецификација, RF/микроталасни филтри се најчешће пројектују као кола са концентрисаним елементима, у техници водова или у техници таласовода.

Микроталасни филтри су присутни у практично свим иоле сложенијим уређајима и њихово пројектовање је специјализована област RF и микроталасне технике. Примењују се у уређајима комуникационих система, радарских система, сателитских система, мерне опреме, система аутоматског управљања, медицинске опреме, рачунарске инфраструктуре, бежичног Интернета, GPS, WLAN, WiMAX и Bluetooth система [1].

Предмет овог рада представља пројектовање микроталасног филтра пропусника опсега са спрегнутим резонаторима у облику правоугаоника, у техници микротракастих водова. Циљ рада је прорачун димензија филтра, прављење симулационог модела, израда лабораторијског прототипа, мерење остварених фреквенцијских карактеристика и поређење симулационих и експерименталних резултата.

Рад се састоји из седам поглавља.

Прво поглавље је увод.

У другом поглављу се сажето наводи преглед основних појмова из теорије филтара и спецификација филтра за његову реализацију.

У трећем поглављу описује се пројектовање и реализација филтра пропусника опсега. Прво се излаже пројектовање филтра када је диелектрик вакуум, а затим се представља пројектовање филтра на супстрату FR-4. За симулацију филтра моделованог као микроталасно коло коришћена су два софтверска алата: Microwave Office [5] и WIPL-D Microwave Pro [6]. Као софтвер за тродимензионалну (3D) електромагнетску (EM) симулацију, коришћен је WIPL-D 3D EM Solver [7].

У четвртном поглављу представља се лабораторијски прототип филтра и наводе се појединости његове реализацији.

Пето поглавље описује прављење софтверске 3D EM компоненте за симулацију асиметричног одсечка пара спрегнутих микротракастих водова за софтвер WIPL-D Microwave Pro. Ова софтверска компонента се користи као елемент микроталасног кола којим се симулира филтар.

Експериментални резултати, измерене фреквенцијске карактеристике филтара, приказани су у шестом поглављу. У овом поглављу се пореде експериментални и симулациони резултати филтара.

Седмо поглавље је закључак. После овог поглавља је литература.

2. Основни појмови теорије филтара

Филтри су мреже са два или више приступа, селективне по учестаности. То су обично пасивне реципрочне мреже са два приступа. Њихов задатак је да пропусте сигнале одређених учестаности, а сигнале других учестаности да ослабе. Микроталасни филтри се најчешће описују параметрима расејања (S -параметри) [1]. У случају филтра са два приступа, параметри расејања се записују матрично:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (2.1.)$$

Параметар расејања $S_{21}(s)$ је преносна функција микроталасног филтра, у домену Лапласове трансформације. То је функција комплексне учестаности $s = \sigma + j\omega$. Уколико је филтар реципрочна мрежа, следи $S_{21}(s) = S_{12}(s)$.

Преносна функција филтра са концентрисаним елементима је рационална функција по s са реалним коефицијентима. Ако преносна функција нема нуле назива се полиномска. Такве функције су, нпр., Чебишевљева (*Chebyshev*) и Батервортова (*Butterworth*). Ред преносне функције је степен имениоца и одређује ред филтра.

Фреквенцијски одзив $S_{21}(j\omega)$ представља преносну функцију на оси учестаности, за $s = j\omega$. Обично се представља преко амплитудског одзива $S_{21}(\omega) = |S_{21}(j\omega)|$ и фазног одзива $\arg(S_{21}(j\omega))$. Амплитудска карактеристика је график амплитудског одзива и обично се приказује у децибелима (dB). Представља се у облику $S_{21dB}(\omega) = 20 \log_{10} |S_{21}(j\omega)|$, а фреквенцијска оса може бити линеарна или логаритамска [1].

Коефицијент рефлексије мреже на приступу n када су сви остали приступи прилагођени представљен је параметром S_{nn} . Параметар S_{mn} представља коефицијент трансмисије од приступа n (други индекс) ка приступу m (први индекс) [2]. На основу тога можемо дефинисати унето слабљење (insertion loss) између два приступа означено са L_A и неприлагођење (return loss) неког приступа означено са L_R [3]. Обично се захтева да L_A буде што мање, а L_R што веће. Ова два параметара се дефинишу на следећи начин:

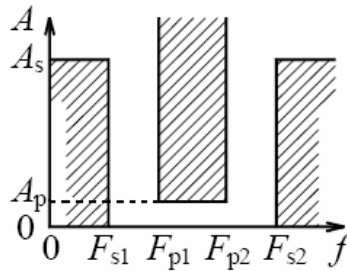
$$L_A(\omega) = -20 \log_{10} |S_{mn}(j\omega)|, \quad m, n = 1, 2 \quad (m \neq n) \quad (2.2)$$

$$L_R(\omega) = -20 \log_{10} |S_{nn}(j\omega)|, \quad n = 1, 2 \quad (2.3)$$

Скуп услова које филтар треба да задовољи је спецификација. Основну спецификацију чини спецификација амплитудског одзива. Задаје се област у којој треба да буде амплитудска карактеристика. Границе ове области чине габарит [7].

У овом раду посматраћемо филтар пропусника опсега. Габарит филтра пропусника опсега одређен је граничним фреквенцијама F_{p1} и F_{p2} , док максимално слабљење у пропусном опсегу треба да је A_p . Непропусни опсег одређују граничне фреквенције F_{s1} и F_{s2} и у њему

је најмање дозвољено слабљење A_s (слика 2.1). Спецификација може да задаје централну учестаност, ширину пропусног опсега или релативну ширину пропусног опсега.



Слика 2.1. Габарит филтра пропусника опсега.

На основу задате спецификације, бира се одговарајућа апроксимација која је аналитички израз фреквенцијског одзива. Апроксимација треба да задовољи услове спецификације и да се при томе може остварити у пракси.

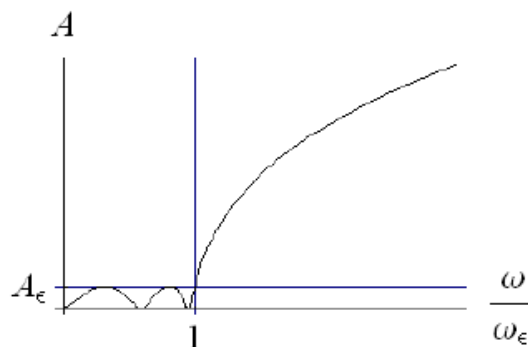
Код пројектовања микроталасних филтара уобичајено је да се апроксимација прво тражи као функција која се може остварити мрежама са идеалним кондензаторима и калемовима, тј. *LC*-филтром [1].

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

Од апроксимација које имају преносну функцију без нула, највећу селективност има Чебишевљева апроксимација која је монотона у непропусном опсегу (слика 2.2). Апроксимација је описана следећим изразом:

$$A_{\text{dB}} = 10 \log_{10} (1 + \epsilon^2 T_n^2(\omega / \omega_\epsilon)) \quad (2.4)$$

где ω_ϵ представља граничну кружну учестаност пропусног опсега, ϵ је сачинитељ таласности (ripple factor) који одређује највеће слабљење у пропусном опсегу $A_\epsilon = A_{\text{dB}}(\omega_\epsilon) = 10 \log_{10} (1 + \epsilon^2)$ које се назива и таласност, n је ред апроксимације, а $T_n(x)$ је Чебишевљев полином степена n . Одговарајућа трансфер функција је реда n , има n полова и нема нула. Стрмина је око $10n$ децибела по октави [1].



Слика 2.2. Чебишевљева апроксимација.

У овом раду полази се од следеће спецификације:

- Филтар пропусник опсега учестаности у техници микротракастих водова;
- Реализација у облику спрегнутих правоугаоних резонатора са процепом;
- Проводници филтра су бакарни;
- Централна учестаност пропусног опсега $f_c = 1 \text{ GHz}$;
- Ширина пропусног опсега $B = 200 \text{ MHz}$;
- Унето слабљење у пропусном опсегу $L_A < 2 \text{ dB}$;
- Неприлагођење приступа у пропусном опсегу $L_R > 15 \text{ dB}$;
- Номинална импеданса приступа $Z_0 = 50 \Omega$;
- Преносна функција без коначних нула, трећег реда;
- Карактеристике супстрата:
 - диелектрик FR-4 – витропласт;
 - релативна диелектрична константа $\epsilon_r = 4,4$;
 - губици у супстрату $\text{tg } \delta = 0,025$;
 - дебљина супстрата $h = 1,55 \text{ mm}$;
 - дебљина метализације $t = 18 \mu\text{m}$;
 - специфична проводност бакра $\sigma = 56 \text{ MS/m}$;
- Конектори типа женски SMA Z LEM;
- Минималан процеп и минимална ширина траке $0,35 \text{ mm}$ (резолуција штампе произвођача лабораторијског прототипа [11]).

3. Реализација филтра пропусника опсега

У овом раду реализација филтра пропусника опсега се темељи непосредно на шеми са спрегнутим резонаторима. Резонатори се остварују као правоугаоници са процепом, поређани у низ тако да су практично спрегнута суседна два резонатора. Прво је испитивано понашање филтра у вакууму да би се одредили опсези димензија филтра, методом поновљених анализа, као и да би време симулације филтра трајало што краће.

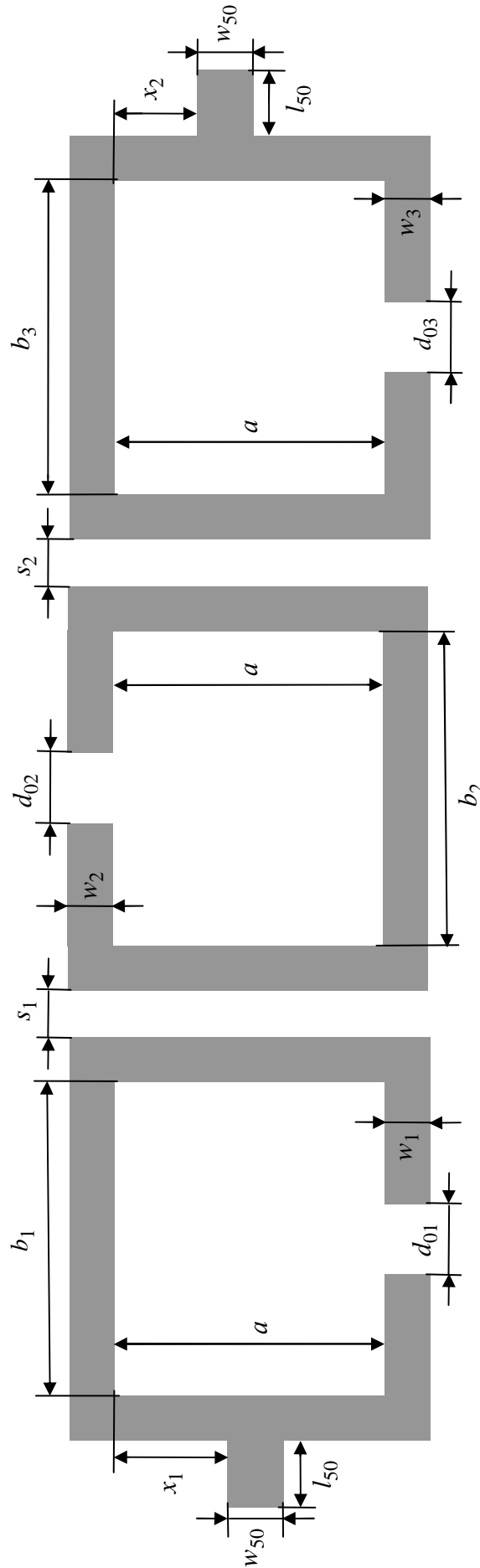
Модел филтра пропусника опсега, у даљем тексту скраћено BPF, састоји се од три полуталасна резонатора са процепом (слика 3.1). Резонатори су у облику правоугаоника чије се суседне странице мало разликују тако да правоугаоници представљају квазикадрате. Резонатори су сачињени од проводних трака (врући проводници), савршено проводне равани и диелектрика.

На улазу и излазу филтра налазе се два вода који служе као уводници. Остала три унутрашња вода су резонатори са процепом. Сви резонатори су отворени на оба краја, тако да ова реализација нема кратких спојева и не захтева вије. Дужина резонатора се пројектује на основу жељене резонантне фреквенције и једнака је половини таласне дужине која одговара тој фреквенцији. Ради финог подешавања фреквенцијске карактеристике филтра резонатори не морају имати исте резонантне фреквенције.

Распоред резонатора на слици 3.1 је такав да практично постоје само спреге између суседних резонатора, који су спрегнути на дужини од приближно једне осмине таласне дужине. Ред прототипа овог филтра практично је једнак броју резонатора. Карактеристична импеданса вода којим се остварује уводник филтра једнака је номиналној импеданси приступа $Z_0 = 50 \Omega$. Спрега уводника и резонатора је кондукциона, односно уводник је галвански спојен са резонатором.

Параметри модела филтра приказани су на слици 3.1. Сваки од њих се може појединачно подешавати (тјунувати), или оптимизовати нумерички тако да фреквенцијске карактеристике филтра задовоље спецификацију.

У наставку текста приказани су симулациони модели BPF у вакууму и на супстрату FR-4. Филтар је симулиран у следећим софтверским алатима: Microwave Office [5], WIPL-D 3D EM Solver [7] и WIPL-D Microwave Pro [6].



Слика 3.1. Скица филтра пропусника опсега.

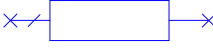
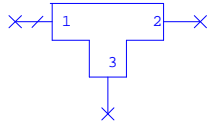
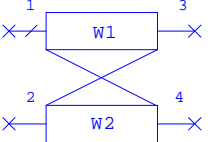
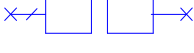
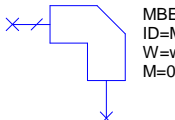
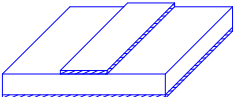
3.1. Симулациони модел филтра пропусника опсега у вакууму

Почетни симулациони модел филтра је направљен као микроталасно коло да би симулација што краће трајала. Структура са слике 3.1 може се представити преко следећих елемената микроталасног кола: одсечак микротракастог вода, Т-спој микротракастог вода, асиметричан одсечак пара спрегнутих микротракастих водова, процеп у траци микротракастог вода и правоугаони савијутак микротракастог вода.

Сви наведени елементи могу се наћи у софтверу Microwave Office. WIPL-D Microwave Pro у основној инсталацији долази са моделом симетричног одсечка пара спрегнутих микротракастих водова, па се не може непосредно користити за моделовање филтра са слике 3.1. Међутим, WIPL-D Microwave Pro пружа широке могућности кориснику да дефинише прецизне 3D ЕМ моделе разноврсних микроталасних компоненти, као што је асиметричан одсечак пара спрегнутих микротракастих водова. О овоме ће бити речи у петом поглављу.

Изглед микроталасног кола у софтверу Microwave Office приказан је на слици 3.1.1. Елементи коришћени у микроталасном колу су наведени у табели 3.1.1. Сви параметри елемената су задати симболима који се дефинишу као објекти (Equation) у софтверу Microwave Office. Овакав начин задавања је неопходан за ручно подешавање (помоћу тјунера) и оптимизацију.

Табела 3.1.1. Елементи микроталасног кола у софтверу Microwave Office.

Назив елемента	Ознака елемента	Изглед елемента
Одсечак микротракастог вода	MLIN	 MLIN ID=TL2 W=w mm L=L mm
Т-спој микротракастог вода	MTEE	 MTEE ID=TL1 W1=w1 mm W2=w2 mm W3=w3 mm
Асиметричан одсечак пара спрегнутих микротракастих водова	M2CLIN	 M2CLIN ID=TL3 W1=w1 mm W2=w2 mm S=s mm L=L mm Acc=1
Процеп у траци микротракастог вода	MGAP2	 MGAP2 ID=TL4 W=w mm S=d mm
Правоугаони савијутак микротракастог вода	MBEND90X	 MBEND90X ID=MS1 W=w mm M=0
Супстрат	MSUB Rho = 3	 MSUB Er=Er H=h mm T=t mm Rho=3 Tand=tg_delta ErNom=Er Name=SUB1

Формално, са гледишта симулације, вакуум је супстрат описан следећим параметрима:

- Релативна диелектрична константа $\epsilon_r = 1$;
- Губици у супстрату $\text{tg } \delta = 0$;
- Дебљина супстрата $h = 1,55 \text{ mm}$;

Проводници су описани следећим параметрима:

- Дебљина метализације $t = 18 \text{ }\mu\text{m}$;
- Специфична проводност бакарних проводника, за симулацију, $\sigma = 14 \text{ MS/m}$, (усвојена је мања вредност да би се узели у обзир губици услед храпавости проводника).

Усвојено је да је централна фреквенција BPF са вакуумом као диелектриком 1 GHz . При тој учестаности је таласна дужина око 300 mm . Дужине резонатора у облику правоугаоника (приближно квадрата) износе половину таласне дужине која одговара централној учестаности филтра. Дужина странице таквог правоугаоника је приближно 37.5 mm и ту дужину узимамо као полазну вредност параметара a, b_1, b_2, b_3 .

Поновљеним анализама, са незнатним променама параметара, емпиријски су одређени опсежи вредности дужина и процепа симулационог модела:

- Положај уводника $0 < x_1 < 10 \text{ mm}, 0 < x_2 < 10 \text{ mm}$;
- Процеп у резонатору $d_0 = d_{01} = d_{02} = d_{03} = 1 \text{ mm}$;
- Процеп између резонатора $0,35 \text{ mm} < s_1 < 5 \text{ mm}, 0,35 \text{ mm} < s_2 < 5 \text{ mm}$;
- Ширина проводника резонатора $0,8 \text{ mm} < w_1 < 3 \text{ mm}, 0,8 \text{ mm} < w_2 < 3 \text{ mm}, 0,8 \text{ mm} < w_3 < 3 \text{ mm}$;
- Ширина уводника $w_{50} = 7,59 \text{ mm}$ за вакуум;
- Дужина уводника $l_{50} = 5 \text{ mm}$ због лемљења конектора.

Најједноставније је да се за процену почетних вредности параметара филтра, параметри ручно подешавају (опција Tune у Microwave Office), да бисмо што боље задовољили спецификацију. У следећем кораку, нумеричком оптимизацијом, на основу претходно одређених вредности параметара филтра, одређују се дужине и процепа тако да фреквенцијске карактеристике у потпуности задовоље спецификацију.

Када се оптимизацијом микроталасног кола одреде димензије филтра, образује се 3D EM модел у софтверу WIPL-D 3D EM Solver.

Моделовање у WIPL-D 3D EM Solver подразумева да се 3D EM модел филтра представи помоћу проводних четвороугаоних плоча, жица, генератора и спојева. Овај софтвер се ослања на нумеричко решавање система интегралних једначина методом момената (MoM). Одређивање струја у плочама је почетно решење система интегралних једначина. Да бисмо апроксимирали струјне коефицијенте матрице, полазимо од познате базисне функције дефинисане на одређеном геометријском елементу (сегменту, површини или запремини).

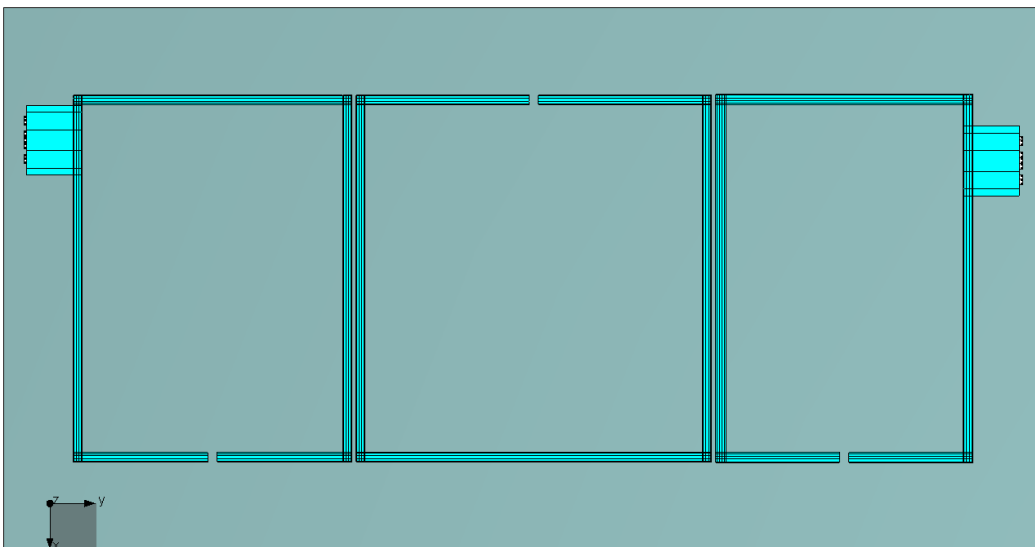
Цела структура је издељена на сегменте који могу бити униформно, неуниформно или адаптивно распоређени, у зависности од позиције сегмента. Уколико је над сваким сегментом дефинисана једна базисна функција, каже се да је апроксимација остварена помоћу базисних функција нултог реда. Ако се над сваким сегментом дефинише више базисних функција, каже се да је апроксимација остварена базисним функцијама вишег реда [4]. За наведени модел BPF оптимално је подесити да ред тачности интеграције и ред апроксимације струја буде 2. На основу матрице струја се даље прорачунавају остали параметри (електрично и магнетно поље, зрачење...).

На слици 3.1.2 је приказан тродимензионални електромагнетски модел BPF у WIPL-D 3D EM Solver. Једначине које одговарају моделу садрже око 900 непознатих струјних коефицијената. При моделовању морају се узети у обзир ефекти близине и ивични ефекти. Посебно треба обратити пажњу на моделовање савијутака и Т-спојева.

У циљу смањена времена трајања 3D EM симулације, 3D EM модел се може упростити занемаривањем дебљине метализације, усвајањем $t = 0$. Такође, симулација се може вршити у више опсега учестаности са различитим корацима по фреквенцији. У овом случају је вршена у три опсега. Корак учестаности бирамо према брзини промене карактеристике. Најмањи корак учестаности узимамо у пропусном опсегу филтра, а мало веће кораке у непропусном опсегу филтра. Опсеги у којима је анализиран филтар су:

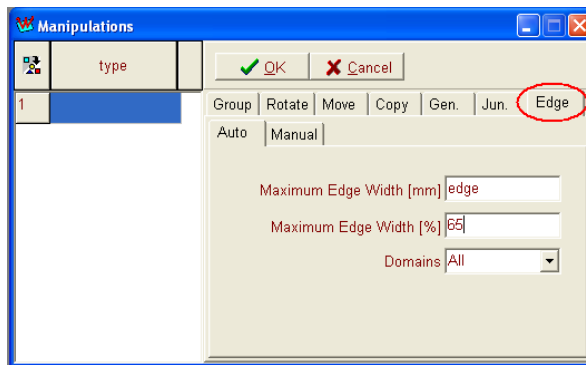
- доњи опсег учестаности 1 MHz – 500 MHz (корак учестаности 10 MHz),
- основни опсег учестаности 500 MHz – 1500 MHz (корак учестаности 5 MHz),
- горњи опсег учестаности 1500 MHz – 3000 MHz (корак учестаности 20 MHz).

Резултати ове три симулације су спојени у један фајл, који је даље коришћен за анализу.



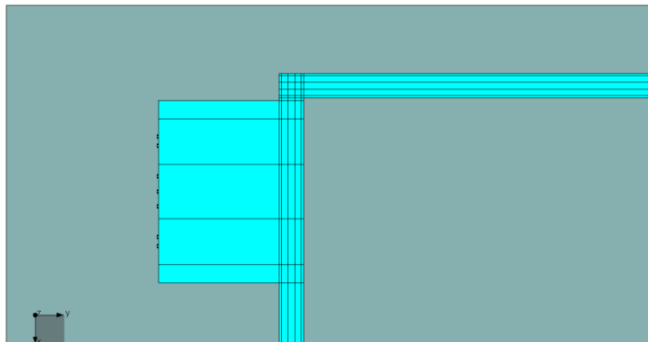
Слика 3.1.2. Тродимензионални електромагнетски модел BPF у вакууму у софтверу WIPL-D 3D EM Solver.

WIPL-D 3D EM Solver може аутоматски да дели зону дуж ивице која раздваја проводник од диелектрика, ако се изабере Manipulations опција Edge (слика 3.1.3). Може се подесити ширина зоне у јединицама или процентима и доделити границе домена који посматрамо. Ово подешавање је неопходно ако се моделују планарне структуре. Најчешће се узима $edge = h/2$, где h представља дебљину супстрата.



Слика 3.1.3. Подешавање Maximum Edge Width. У пољу је уписано име симбола (*edge*) који је дефинисан у табели симбола.

Ова опција узима у обзир ефекте који настају на прелазу две средине, чиме се повећава тачност анализе. Међутим, могућ је и други приступ за добијање тачнијих резултата. Уместо подешавања са слике 3.1.3, извршена је подела (сегментација) сваког проводника на пет трака (потпроводника), користећи алгоритам из софтвера LINPAR [8]. На тај начин је обезбеђена неуниформна расподела струје у проводнику, па су потпроводници различитих ширина (слика 3.1.4).

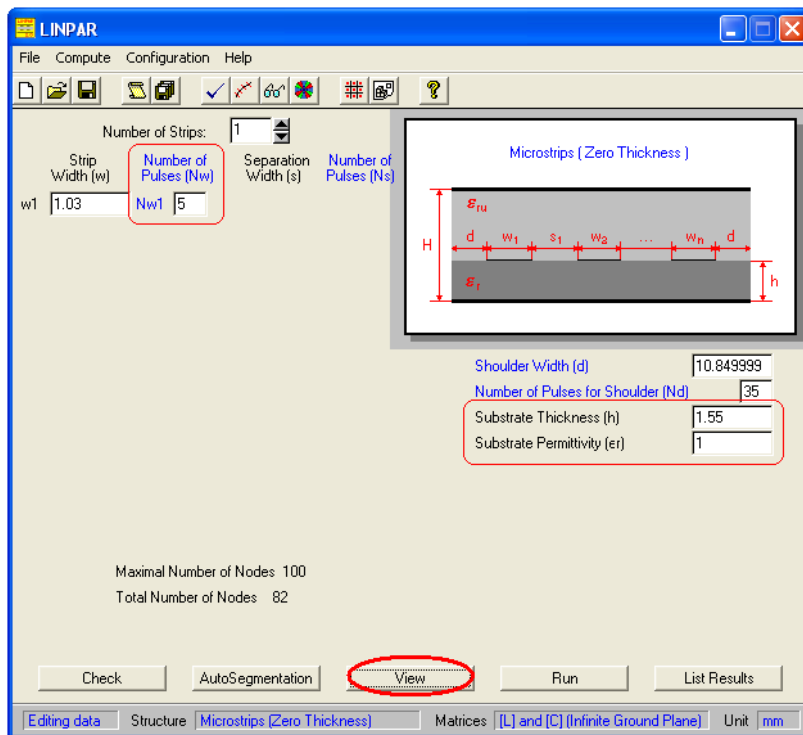


Слика 3.1.4. Подела проводника на потпроводнике.

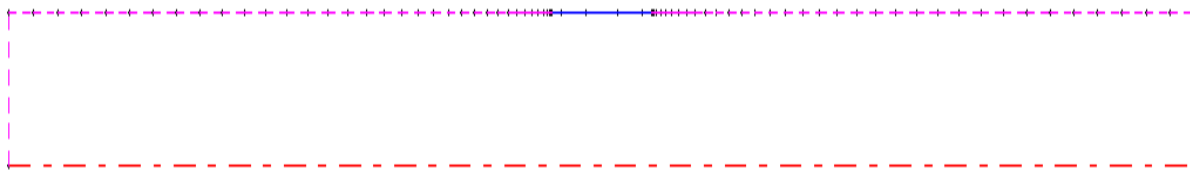
LINPAR је софтвер који служи за нумеричку анализу квазистатичких примарних и секундарних параметара вишепроводних водова. На слици 3.1.5 приказана је процедура сегментације. Изабраћемо из менија New опцију Microstrips (Zero Thickness). За одређену ширину проводника, у овом случају изабрано је 1,03 mm, доделићемо број трака 5 (Number of Pulses). Подесићемо дебљину супстрата, релативну диелектричну константу и кликнути View. Изглед сегментованог проводника приказан је на слици 3.1.6.

Ако је ширина проводника w , сегментацијом добијеном на основу алгоритма у софтверу LINPAR добијају се следеће ширине потпроводника: $w/10$, $2.5w/10$, $3w/10$, $2.5w/10$, $w/10$ респективно, с десна на лево (симетрична је сегментација у односу на центар траке). На тај начин одредимо све ширине потпроводника у моделу.

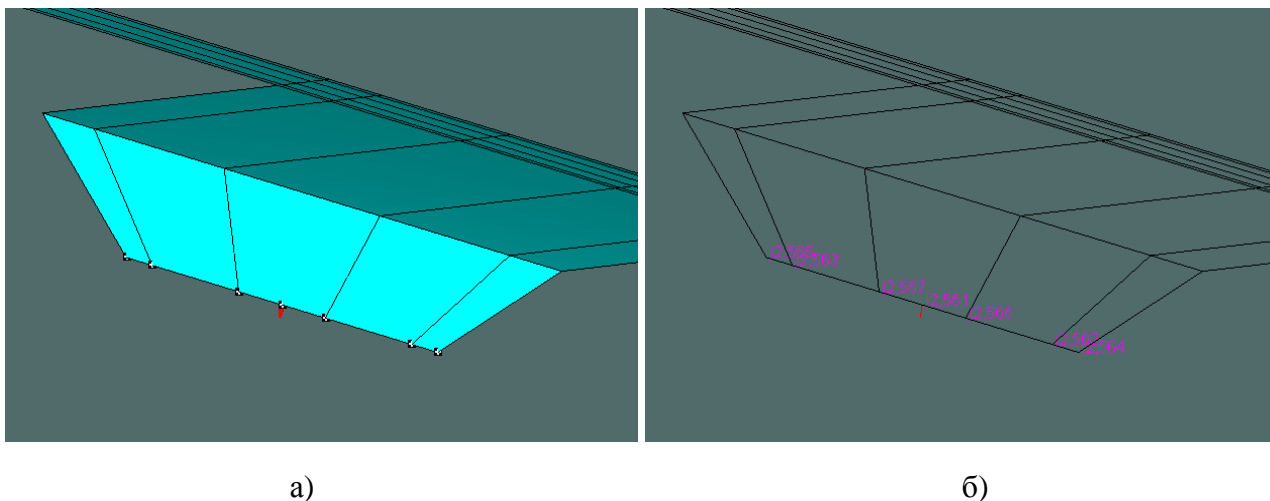
Приступи и побуда у WIPL-D 3D EM Solver су моделовани помоћу више плоча у облику трапеца и једне жице са делта генератором. Све трапезне плоче треба да буде спојене са жицом, да би се задовољила једначина континуитета за такав спој (беле тачкице на слици 3.1.7). Зато што смо траку поделили на потпроводнике потребно је у WIPL-D 3D EM Solver преко опције Junctions подесити спојеве (слика 3.1.8). Ако се не употреби опција Junctions на описан начин побуда ће да образује струју која постоји само у средњем трапезу и средњем проводнику.



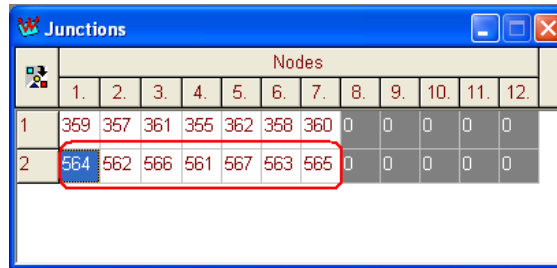
Слика 3.1.5. Подешавање сегментације у софтверу LINPAR.



Слика 3.1.6. Изглед сегментације попречног пресека проводника у софтверу LINPAR.



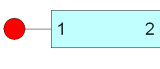
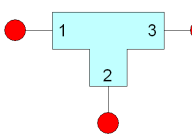
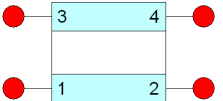
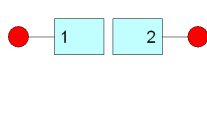
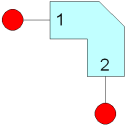

Слика 3.1.7. Побуда BPF у софтверу WIPL-D 3D EM Solver, са и без ознака, а) и б) респективно.



Слика 3.1.8. Задавање сложеног споја преко опције Junctions у софтверу WIPL-D 3D EM Solver.

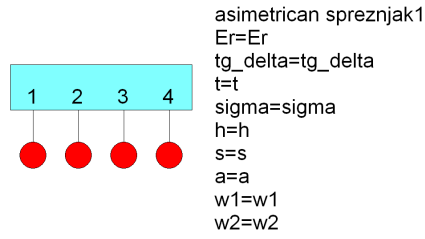
Моделовање BPF у софтверу WIPL-D Microwave Pro подразумева прављење микроталасног кола, веома слично моделовању у софтверу Microwave Office. Микроталасно коло садржи елементе који се извлаче из библиотеке и убацују у електричну шему (слика 3.1.10). У коришћеној верзији основне инсталације WIPL-D Microwave Pro постоје следећи елементи приказани у табели 3.1.2. Сви параметри елемената су задати симболима.

Табела 3.1.2. Елементи микроталасног кола у софтверу WIPL-D Microwave Pro.

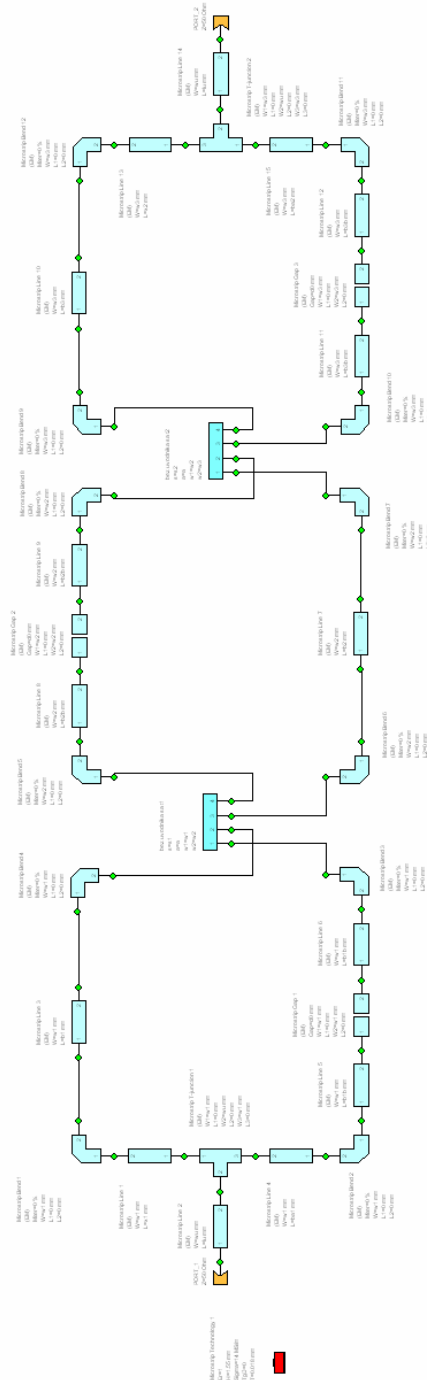
Назив елемента	Ознака елемента	Изглед елемента
Одсечак микротракастог вода	Microstrip line	 Microstrip Line 1 (EM) W=w mm L=L mm
T-спој микротракастог вода	Microstrip T-junctions	 Microstrip T-junction 1 (EM) W1=w1 mm L1=L1 mm W2=w2 mm L2=L2 mm W3=0.2673 mm L3=2.4329 mm
Симетричан одсечак пара спрегнутих микротракастих водова	Microstrip Coupled Lines	 Microstrip Coupled Lines 1 (EM) S=s mm W=w mm L=L mm
Процеп у траци микротракастог вода	Microstrip Gap	 Microstrip Gap 1 (EM) Gap=d mm W1=w1 mm L1=L1 mm W2=w2 mm L2=L2 mm
Правоугаони савијутац микротракастог вода	Microstrip Bend $0 < M < 100\%$	 Microstrip Bend 1 (EM) Miter=M % W=w mm L1=L1 mm L2=L2 mm
Супстрат	Microstrip Technology	Microstrip Technology 1 Er=Er H=h mm Sigma=sigma MS/m TgD=tg_delta T=t mm 

За моделовање филтра са слике 3.1 потребан је асиметричан одсечак пара спрегнутих микротракастих водова који се не налази у основној инсталацији WIPL-D Microwave Pro. Међутим, WIPL-D Microwave Pro омогућава увођење 3D EM компоненте, моделоване у софтверу WIPL-D 3D EM Solver. Овакав модел спрежњака WIPL-D Microwave Pro представља као четворопортну мрежу, чији су сви параметри задати симболима (слика

3.1.9). Појединости прављења софтверске компоненте се налази у петом поглављу. На слици 3.1.10 приказан је модел ВРФ у софтверу WIPL-D Microwave Pro.



Слика 3.1.9. Шематска представа асиметричног спрежњака у микроталасном колу у софтверу WIPL-D Microwave Pro.



Слика 3.1.10. Симулациони модел ВРФ у вакууму у софтверу WIPL-D Microwave Pro.

3.2. Симулациони модел филтра пропусника опсега на супстрату FR-4

Симулациони модел филтра пропусника опсега реализован на супстрату FR-4 састоји од три полуталасна спрегнута резонатора у облику правоугаоника. Користе се већ постојећи модели филтра које је потребно кориговати и прилагодити их супстрату на коме ће се реализовати. Биће разматране две варијанте модела филтра пропусника опсега, у наставку рада означене као BPF1 и BPF2. Разлика у варијантама филтра је у димензијама филтра. Изгледи модела BPF1 и BPF2 приказани су на сликама 3.2.1 и 3.2.2.

Увођењем диелектрика чија је диелектрична константа различита од нуле, $\epsilon_r \neq 0$, фреквенцијске карактеристике филтра се померају ка нижим учестаностима. Због тога је полазни модел BPF у вакууму имао фреквенцијске карактеристике са централном фреквенцијом на 1 GHz. Централна фреквенција модела реализованог на супстрату FR-4 је 800 MHz, према условима спецификације.

Карактеристике супстрата FR-4:

- Релативна диелектрична константа $\epsilon_r = 4,4$;
- Губици у супстрату $\text{tg } \delta = 0,025$;
- Дебљина супстрата $h = 1,55 \text{ mm}$;

Проводници су описани следећим параметрима:

- Дебљина метализације $t = 18 \mu\text{m}$;
- Специфична проводност бакарних проводника, за симулацију, $\sigma = 14 \text{ MS/m}$, (усвојена је мања вредност да би се узели у обзир губици услед храпавости проводника)

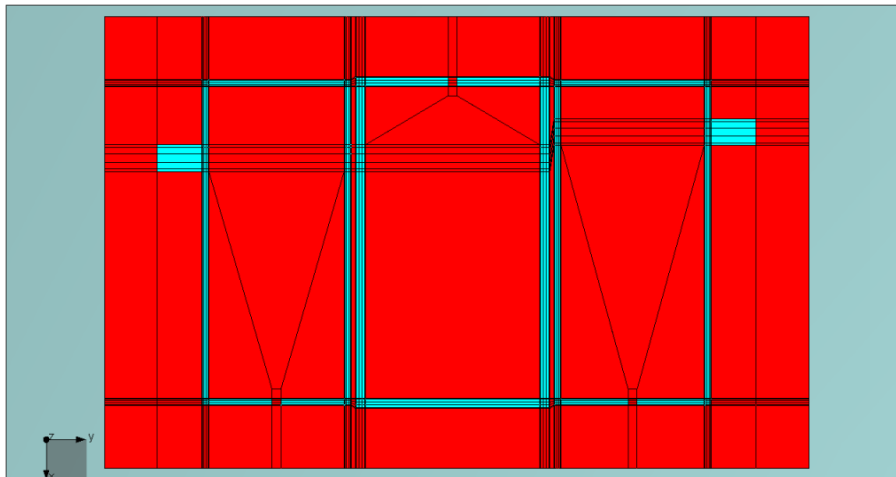
Први корак подразумева промену карактеристика супстрата и прилагођавање ширине уводника на номиналну импедансу $Z_0 = 50 \Omega$. Ширина уводника за FR-4 супстрат износи $w_{50} = 2.95 \text{ mm}$. Следећи корак подразумева промену дужина резонатора тако да се фреквенцијске криве подесе на централну фреквенцију 800 MHz. Остали параметри се могу ручно подешавање (помоћу тјунера) или нумерички оптимизовати, да би фреквенцијске карактеристике филтра у потпуности задовољиле спецификацију.

Моделовање филтра у софтверу WIPL-D 3D EM Solver је сложеније. У овој процедури морамо додати плочице (четвороуглове) који ће представљати супстрат. Потребно је променити домене у којима су постојеће плочица дефинисане. Такође треба подесити карактеристике супстрата, ширине уводника и остале параметре филтара према прорачунима модела BPF у софтверу Microwave Office. На сликама 3.2.3 и 3.2.4 приказан је изглед BPF1 и BPF2 у софтверу WIPL-D 3D EM Solver, респективно.

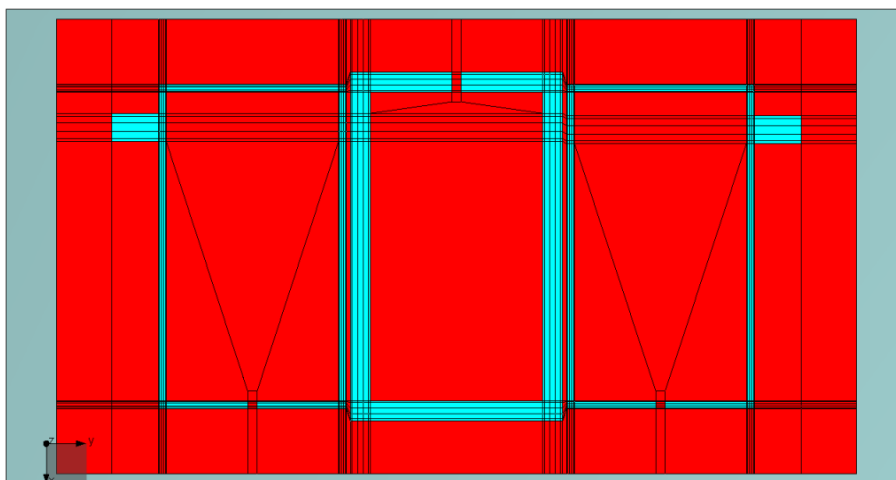
Једначине које одговарају моделу филтра у софтверу WIPL-D 3D EM Solver садрже око 3500 непознатих струјних коефицијената, што је доста комплексније у односу на исти модел BPF у вакууму. Ради смањења времена трајања симулације, модел је симулиран у три опсега, занемаривши дебљину метализације $t=0$. Усвојени су различити кораци учестаности. Опсеги у којима су симулирани филтри:

- доњи опсег учестаности 1 MHz – 400 MHz (корак учестаности 10 MHz),
- основни опсег учестаности 400 MHz – 1200 MHz (корак учестаности 5 MHz),
- горњи опсег учестаности 1200 MHz – 3000 MHz (корак учестаности 20 MHz).

Резултати ове три симулације су спојени у један фајл, који је даље коришћен за анализу.

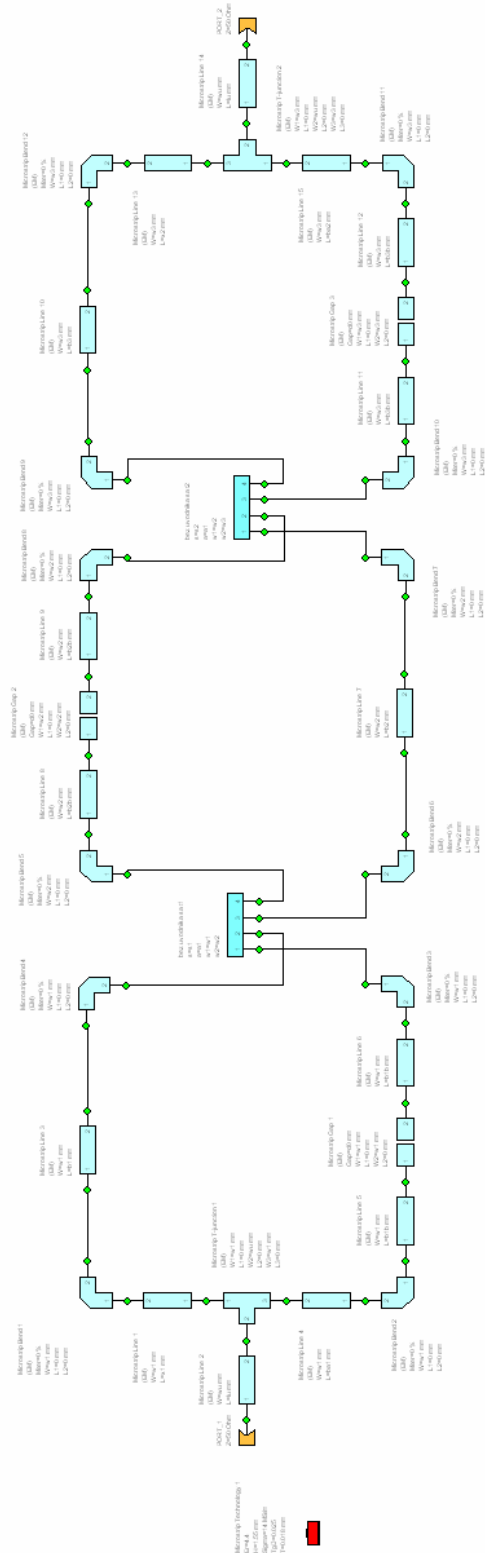


Слика 3.2.3. Тродимензионални електромагнетски модел BPF1 на супстрату FR-4 у софтверу WIPL-D 3D EM Solver.

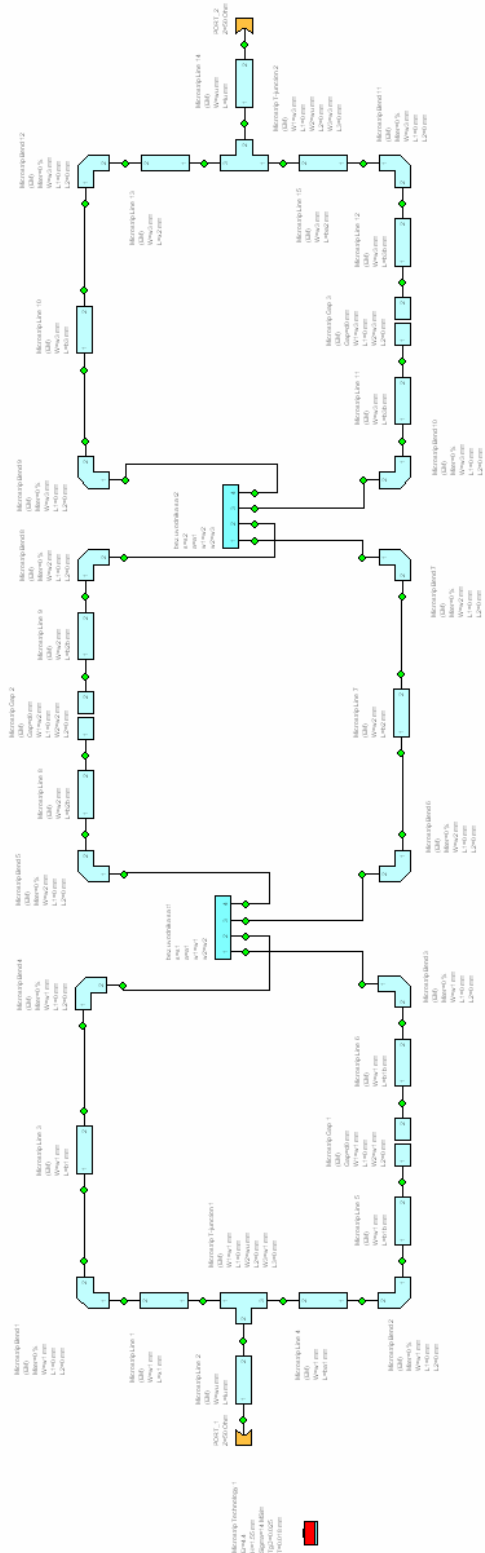


Слика 3.2.4. Тродимензионални електромагнетски модел BPF2 на супстрату FR-4 у софтверу WIPL-D 3D EM Solver.

Едитовањем симулационог модела са слике 3.1.10 може се направити микроталасно коло које је приказано на сликама 3.2.5 и 3.2.6 у софтверу WIPL-D Microwave Pro. И овде је такође потребно модификовати димензије појединих елемената и подесити карактеристике супстрата филтара.



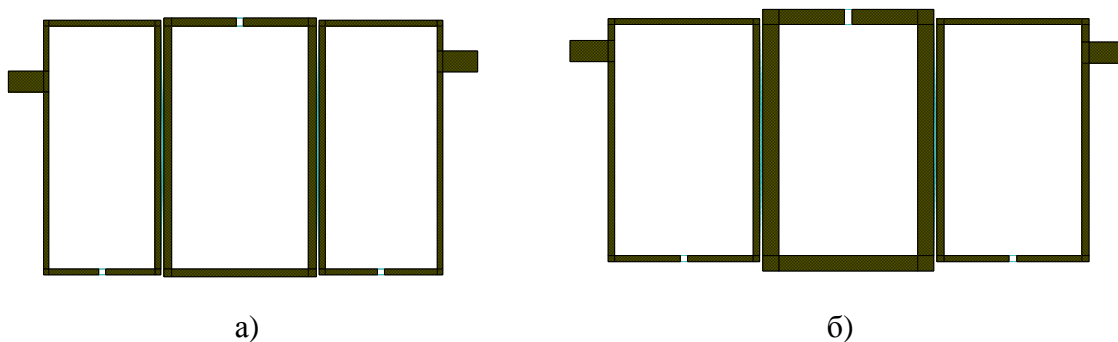
Слика 3.2.5. Симулациони модел ВРФ1 на FR-4 супстрату у софтверу WIPL-D Microwave Pro.



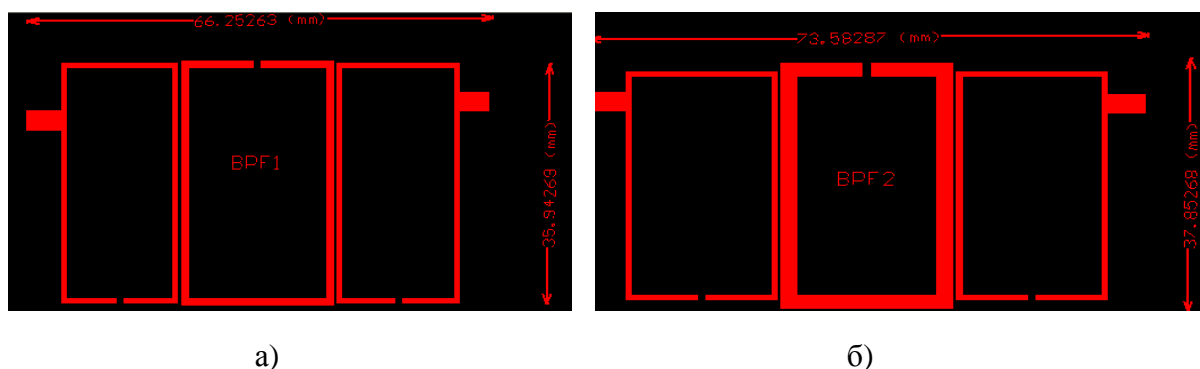
Слика 3.2.6. Симулациони модел ВРФ2 на FR-4 супстрату у софтверу WIPL-D Microwave Pro.

4. Израда лабораторијског прототипа филтра пропусника опсега

У процесу подешавања и оптимизације модела филтра пропусника опсега пронађена су два решења BPF1 и BPF2. На основу њих су израђени лабораторијски прототипови филтара на супстрату FR-4. На слици 4.1 приказани су изгледи проводника на штампаној плочици (layout) за BPF1 и BPF2. У софтверу Protel 99 SE [9] се прави нацрти штампаних плоча (PCB layout) који се прослеђује произвођачу за израду лабораторијских прототипова (слика 4.2).



Слика 4.1. Изгледи проводника на штампаној плочици (layout) за BPF1 и BPF2 у софтверу Microwave Office, под а) и б) респективно.



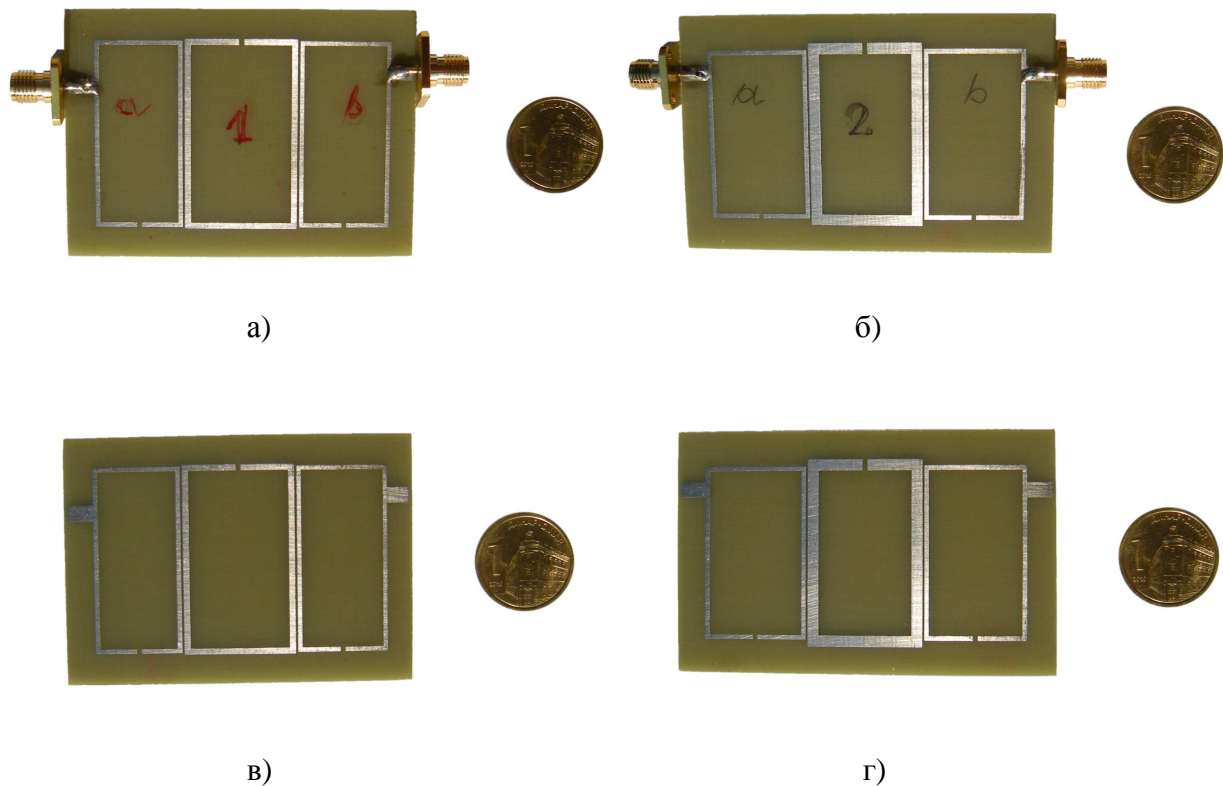
Слика 4.2. PCB layout за BPF1 и BPF2 у софтверу Protel 99 SE, под а) и б), респективно.

Лабораторијски прототипови BPF1 и BPF2 израђени су у фирми Konelek d.o.o. [11]. Фирма Konelek се бави производњом, трговином и услугама, а као главна делатност је производња штампаних плоча. Супстрат који је коришћен за израду плочица, FR-4 – витропласт, производи фирма ŽIBRET LAMINATI d.o.o. [12]. Конекторе лабораторијских прототипова набавили смо у фирми KELCO d.o.o. [13]. Тип конектора је женски SMA Z LEM са четири шрафа (слика 4.3).



Слика 4.3. Изглед женског SMA Z LEM конектора са 4 шрафа.

На слици 4.4 приказан је изглед лабораторijsких прототипова BPF1 и BPF2, са и без конектора. Резултати мерења филтара поређени су са резултатима симулација и приказани у шестом поглављу.



Слика 4.4. Лабораторijsки прототипови BPF1 и BPF2, са конекторима а) и б), без конектора в) и г), респективно.

Мерења лабораторijsких прототипа рађена су на анализатору мрежа Agilent E5062A. Подешавања која су извршена при мерењу су следећа:

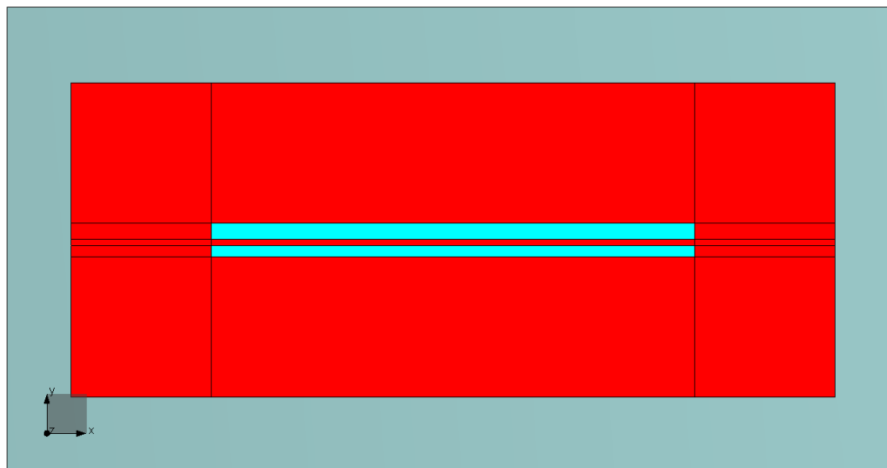
- снага извора (предајника) $P = 0 \text{ dBm}$,
- ширина пропусног опсега међуфреквенцијског филтра $\text{IFBW} = 1 \text{ kHz}$,
- број мерења која се усредњавају $\text{Avg Factor} = 16$,
- калибрација:
 - рађена је 2 PORT калибрација,
 - у пуном опсегу фреквенција од 300 kHz до 3 GHz,
 - у 1601 тачки,
 - стање и калибрација су у датотеци `merenja_110802\CSV\STATE04.STA`,
 - измерени S -параметри су сачувани у формату Smith Real/Imag, за номиналну импедансу $Z_0 = 50 \Omega$ у датотеци `merenje_110802\CSV*.CSV`, где * представља назив измереног резултата.

ВАЖНА НАПОМЕНА: Анализатор мрежа измерене параметре складишти у посебан фајл. Тај фајл има три колоне од којих је прва увек фреквенција. Друга колона је реални део S -параметара, а трећа имагинарни део S -параметара, зато што је изабран формат Smith Real/Imag. За анализу мерних податак подешено је да се сви параметри расејања запису у један фајл. То се може одрадити, нпр., у софтверу Microsoft Office Excel [10]. Да би се виделе све цифре резултата мерења, потребно је подесити одговарајући формат у Excel. Ако се то не уради, у Excel ће се појавити редови који привидно имају исту учестаност.

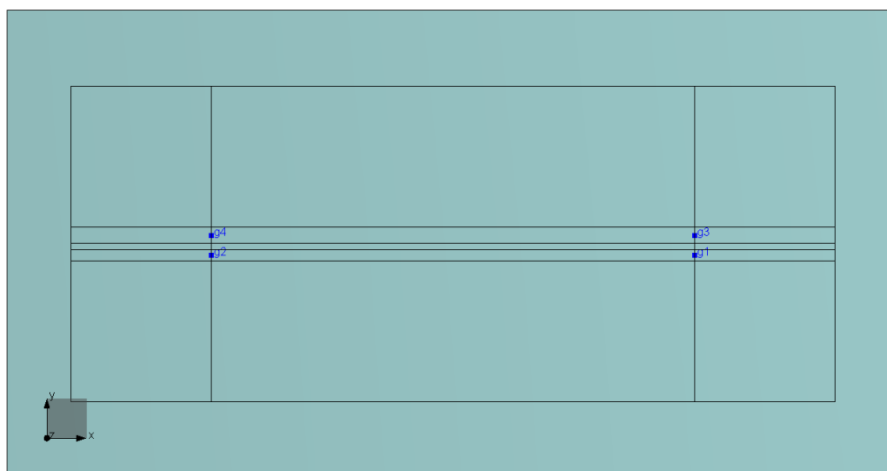
5. Софтверска 3D EM компонента асиметричног спрежњака

Као што је напоменуто у претходним поглављима, овде ћемо детаљно размотрити моделовање асиметричног одсечка пара спрегнутих микротракастих водова. У основној инсталација софтвера WIPL-D Microwave Pro не постоји наведени елемент спрежњака. Међутим, спрежњак се може увести у WIPL-D Microwave Pro као 3D EM компонента моделована у WIPL-D 3D EM Solver.

Спрежњак се састоји од два паралелно спрегнута вода чије су траке (врући проводници) различитих ширина [2]. То је четворопортна мрежа, која узима у обзир параметре супстрата, и дебљину проводника (слика 5.1). Диелектрик може бити вакуум или произвољан супстрат као FR-4. Параметри спрежњака су димензије водова, процеп у резонаторима и карактеристике супстрата. Исти модел спрежњака се користи за филтар пропусник опсега реализован у вакууму и на супстрату FR-4.



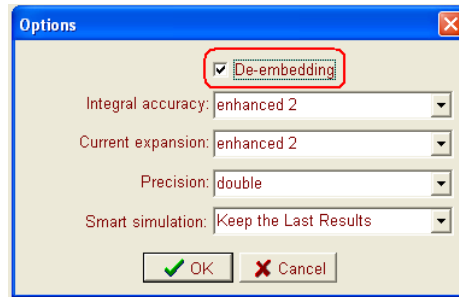
Слика 5.1. 3D EM модел спрежњака у софтверу WIPL-D 3D EM Solver.



Слика 5.2. Приступи спрежњака са слике 5.1.

Битна ствар која треба нагласити је да се сви параметри спрежњака задају симболима, којима се касније додељују бројчане вредности. Потребно је подесити параметар *edge* са слике 3.1.3. На тај начин се узимају у обзир ефекти на прелазу две средине, између диелектрика и проводника. Овде је довољно поставити $edge = h/2$, где је h висина супстрата.

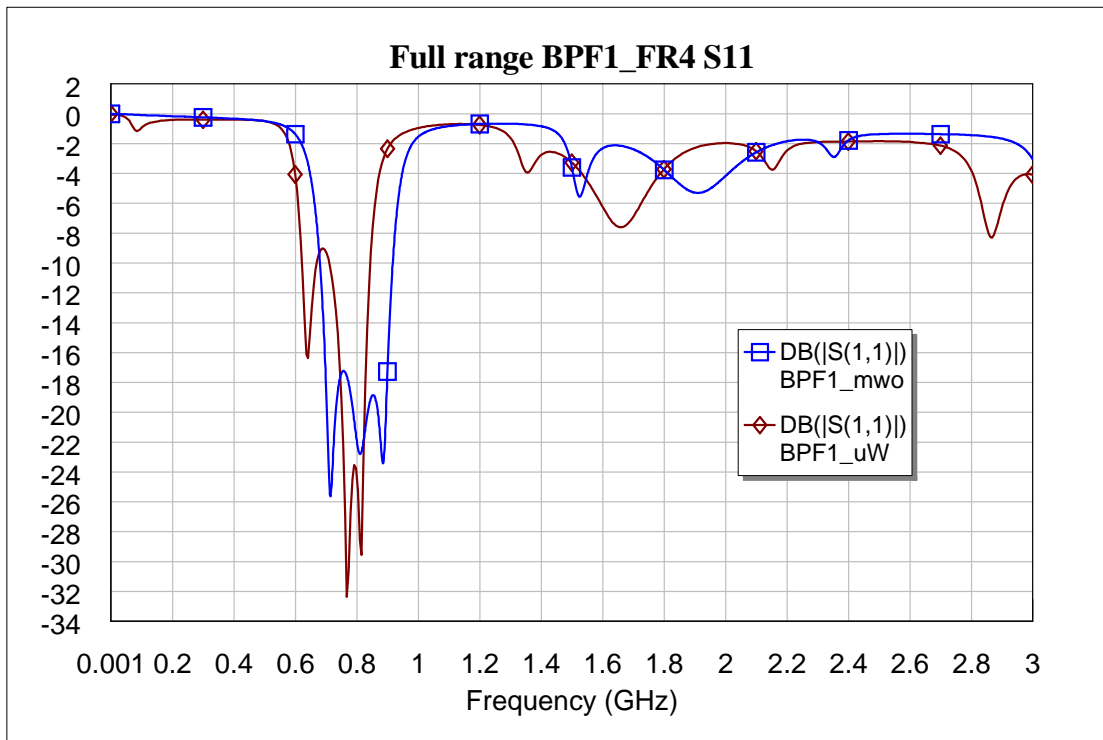
Приликом увожења спрежњака у WIPL-D Microwave Pro, да би се добили што тачнији резултати, треба подесити опцију De-embedding. То се подешава тако што се у менију изабере Edit опција Options (слика 5.3). На тај начин карактеристике дате компоненте утичу на све компоненте у електричном колу.



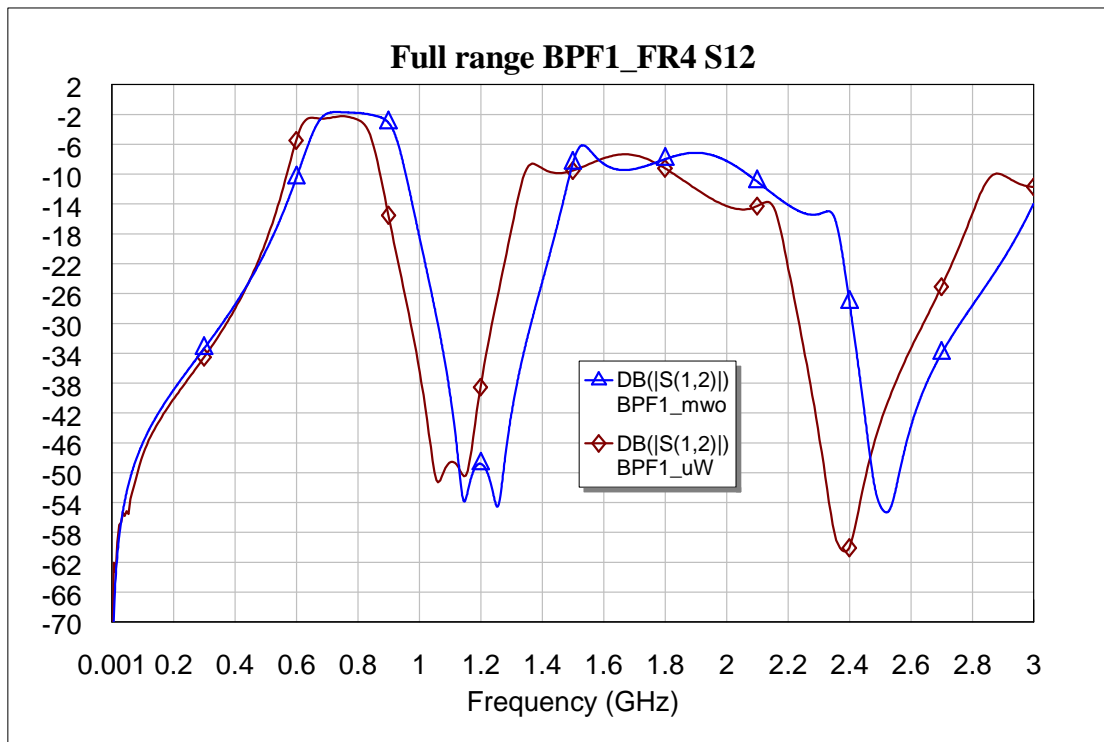
Слика 5.3. Подешавање опције De-embedding.

Претходно описана софтверска компонента је коришћена као компонента микроталасног кола на сликама 3.1.10, 3.2.5 и 3.2.6. Затим су упоређени резултати симулације микроталасног кола у Microwave Office и WIPL-D Microwave Pro.

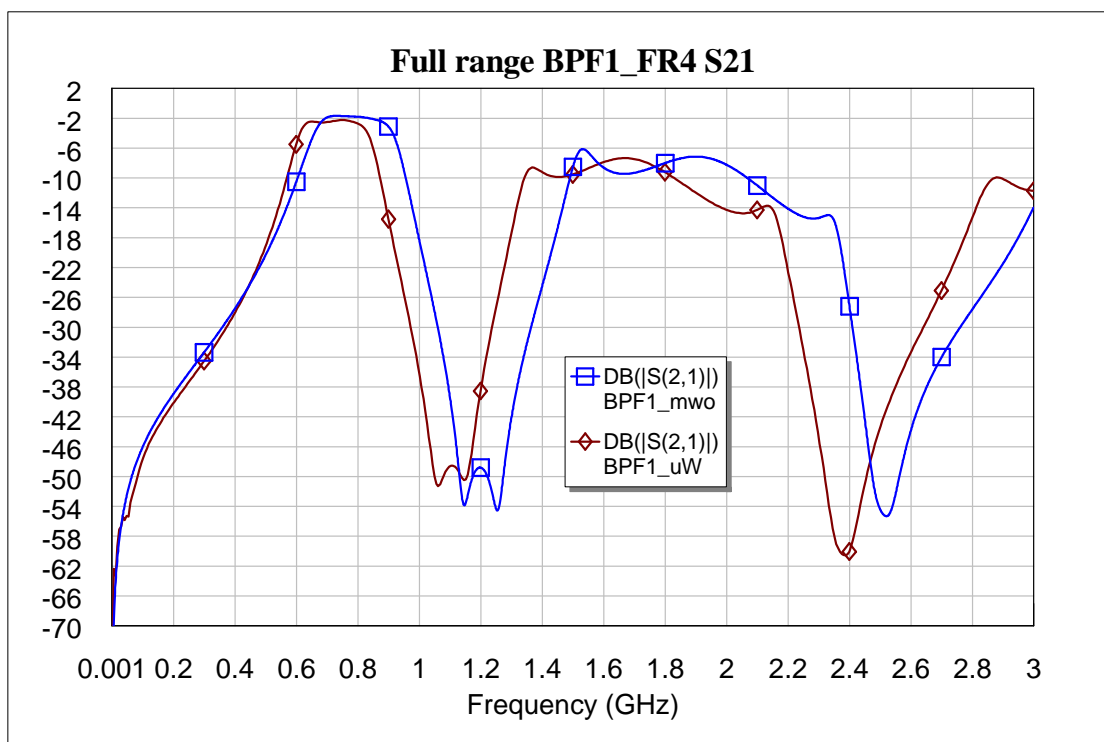
Прве симулације су урађене на основу димензија филтра добијене у Microwave Office. Упоређени су резултати симулација на сликама 5.4 – 5.7.



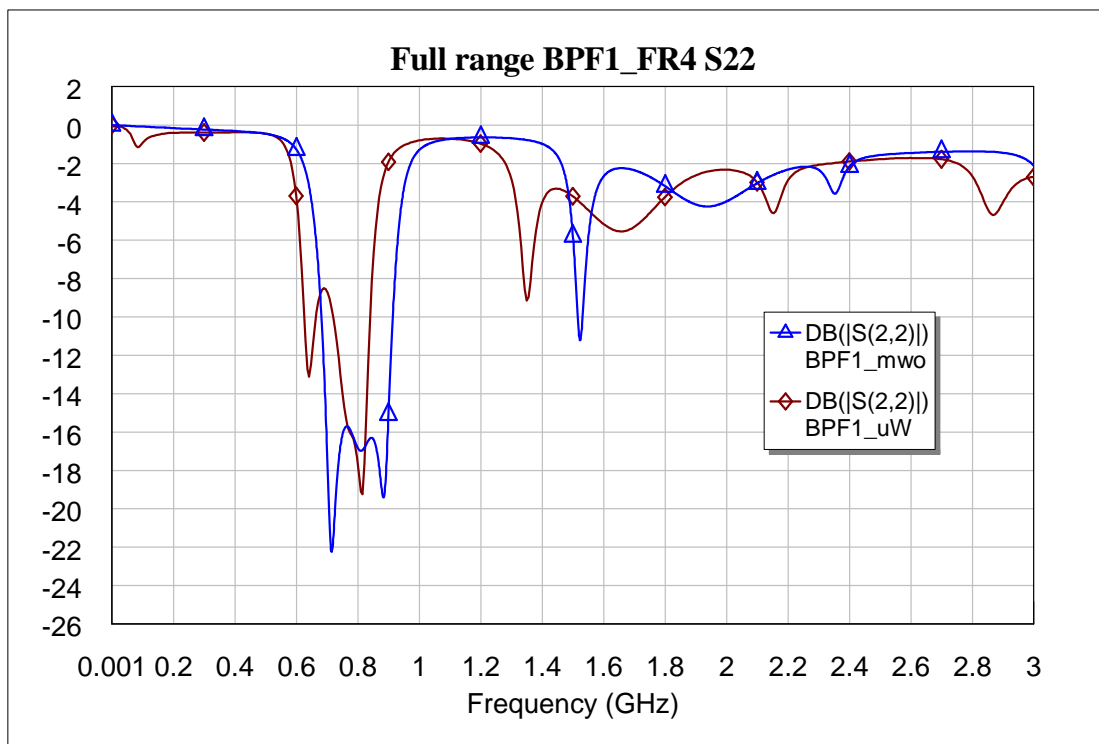
Слика 5.4. Параметар S_{11} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro.



Слика 5.5. Параметар S_{12} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro.



Слика 5.6. Параметар S_{21} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro.



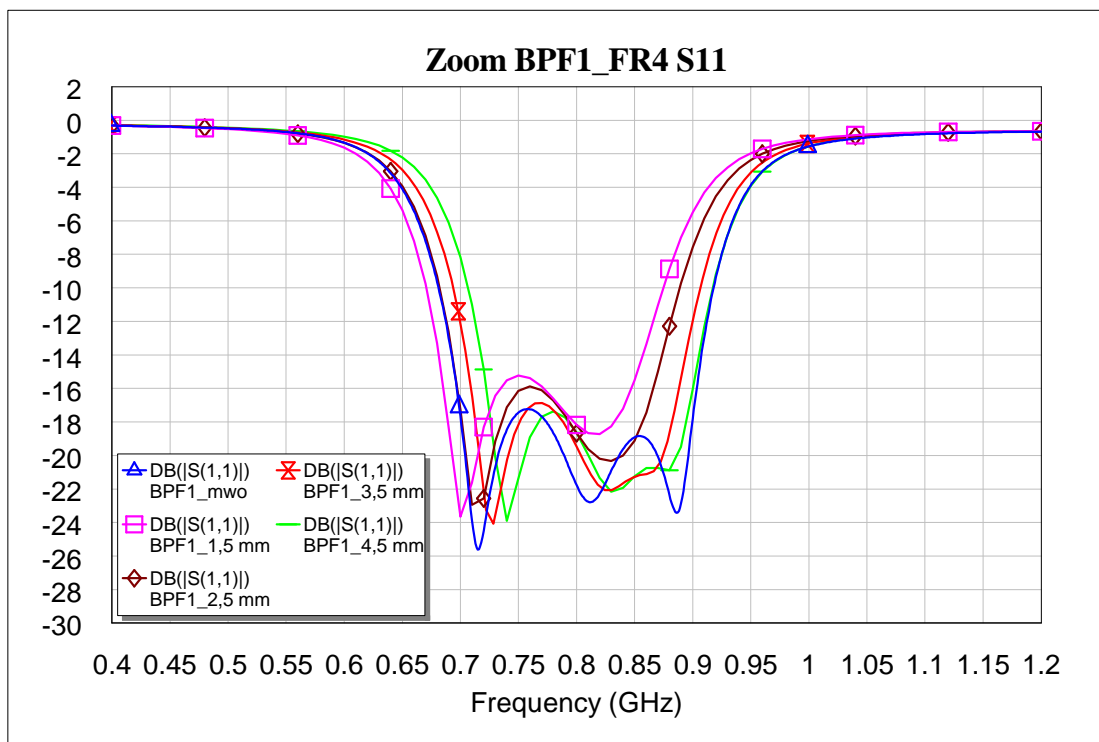
Слика 5.7. Параметар S_{22} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro.

Као што се види са претходних слика, фреквенцијске карактеристике добијене у WIPL-D Microwave Pro су померени по оси учестаности у односу на фреквенцијске карактеристике добијене у Microwave Office. Све криве су померене ка нижим учестаностима за око 50 MHz. Да би се обезбедило слагање симулационих резултата дужине спрежњака WIPL-D Microwave Pro модела су кориговане.

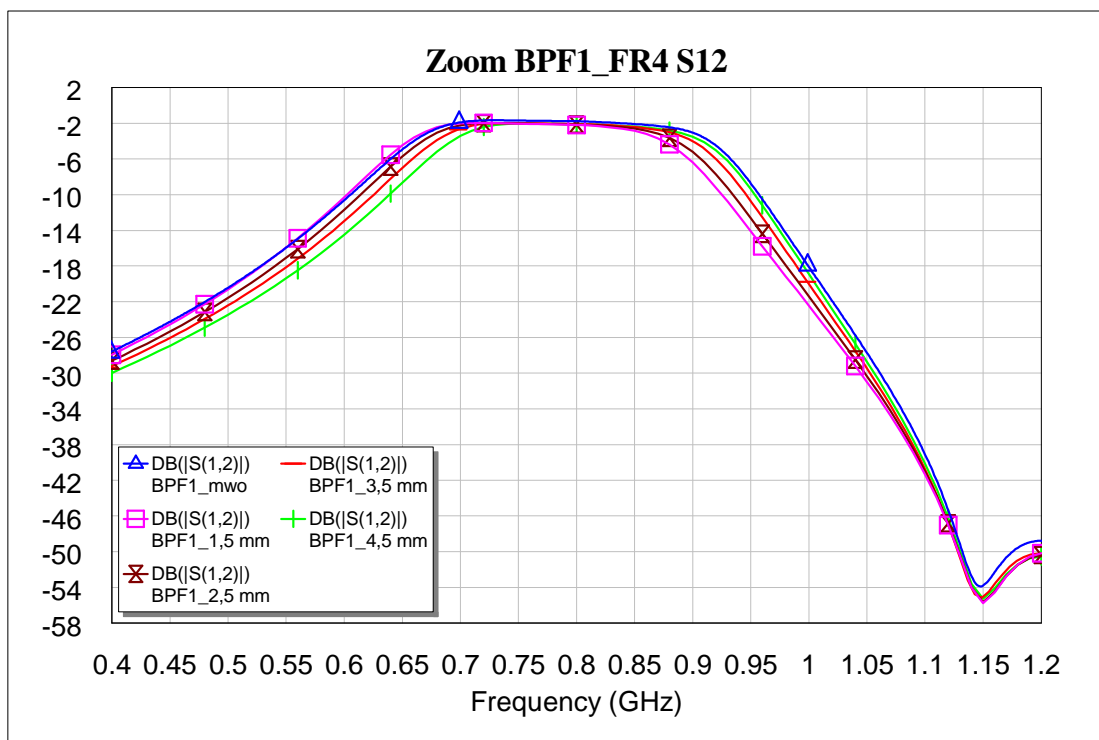
На сликама 5.8 – 5.11 приказане су симулационе фреквенцијске карактеристике филтра у случају када је дужина спрежњака у софтверској компоненти смањена за 1,5 mm, 2,5 mm, 3,5 mm, 4,5 mm.

Увиђа се да је најбоље поклапање резултата S -параметара симулације BPF1_3,5 mm, што подразумева скраћивање дужине спрежњака за 3,5 mm. На сликама 5.12 – 5.18 упоређени су резултати S -параметара симулације BPF1_3,5 mm и симулације извршене у Microwave Office, приказани у пуном опсегу и у пропусном опсегу учестаности.

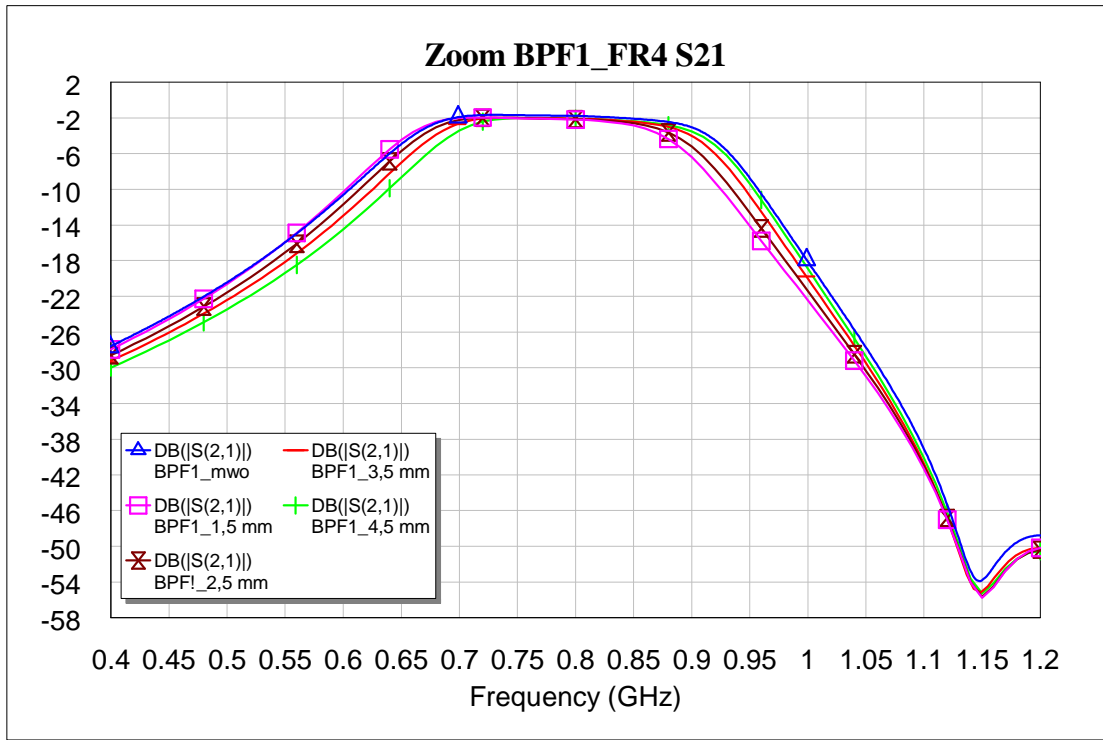
Исти прорачун се односи и на остале моделе филтра BPF у вакууму и BPF2 на супстрату FR-4. Сви резултати су дати у шестом поглављу.



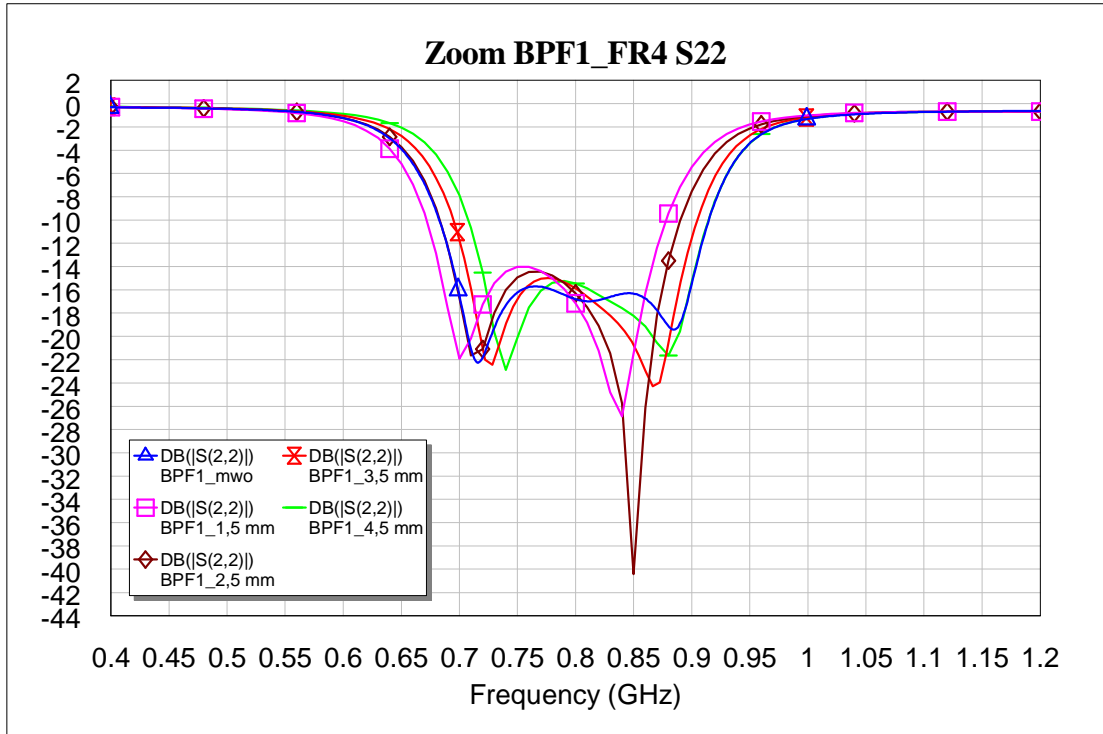
Слика 5.8. Параметар S_{11} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_1,5 mm, BPF1_2,5 mm, BPF1_3,5 mm, BPF1_4,5 mm – симулације WIPL-D Microwave Pro умањених дужина спрежњака за дате вредности.



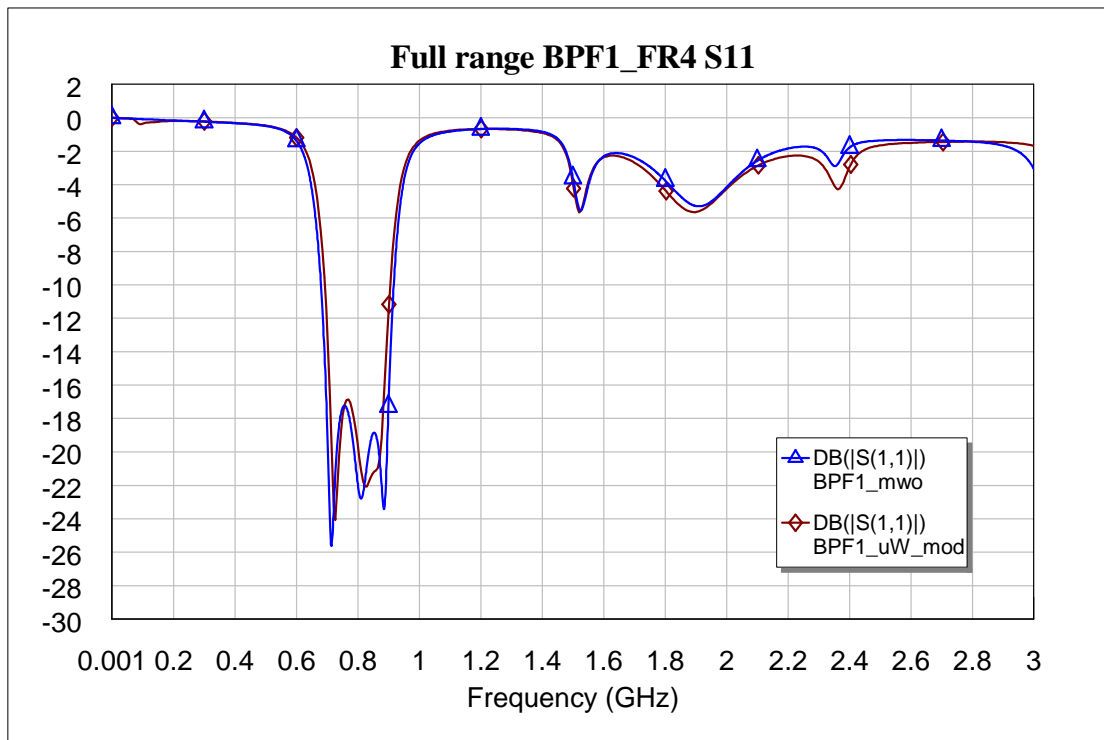
Слика 5.9. Параметар S_{12} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_1,5 mm, BPF1_2,5 mm, BPF1_3,5 mm, BPF1_4,5 mm – симулације WIPL-D Microwave Pro умањених дужина спрежњака за дате вредности.



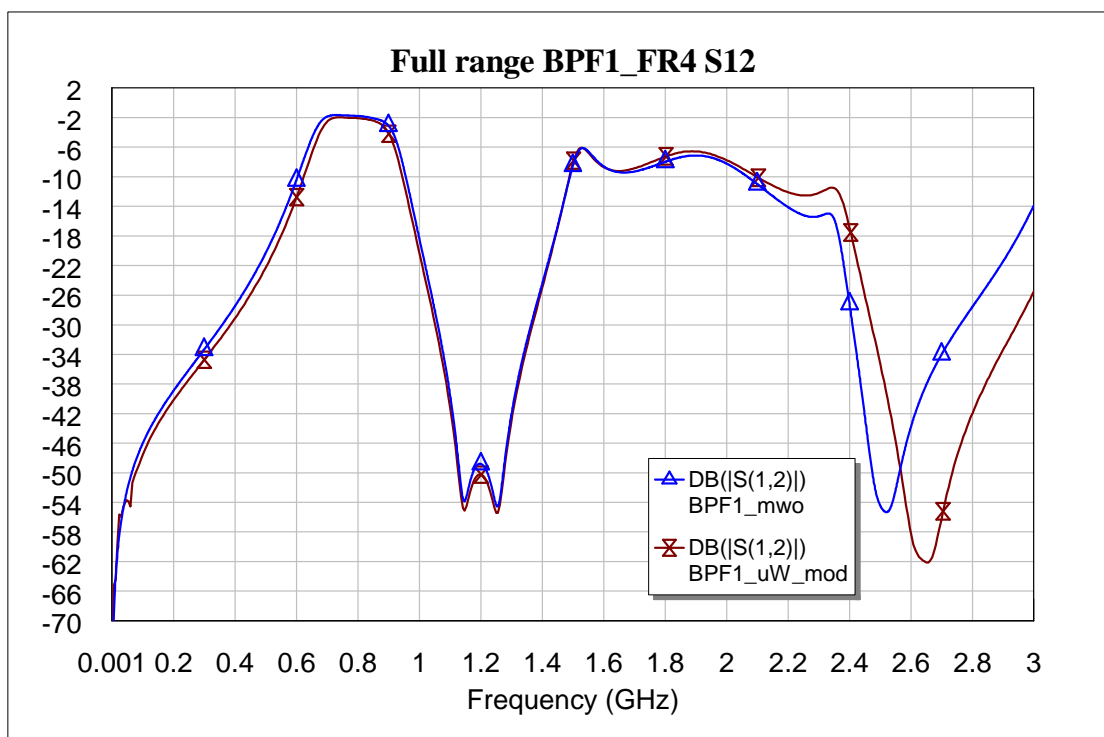
Слика 5.10. Параметар S_{21} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_1,5 mm, BPF1_2,5 mm, BPF1_3,5 mm, BPF1_4,5 mm – симулације WIPL-D Microwave Pro умањених дужина спрежњака за дате вредности.



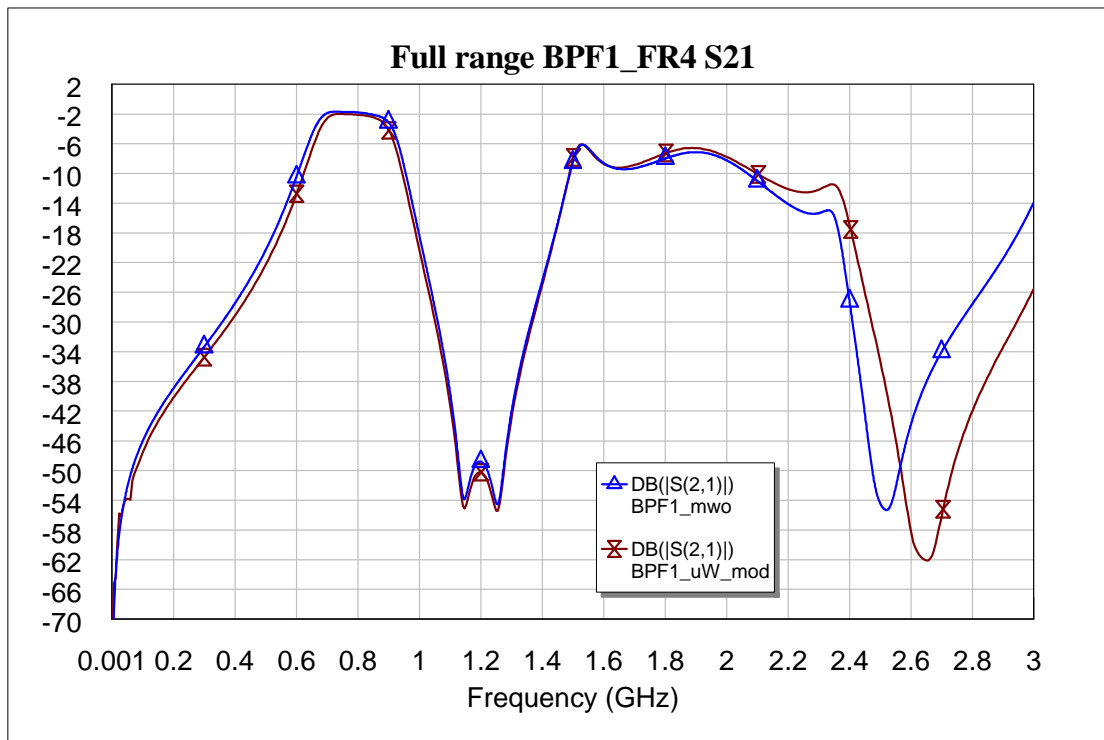
Слика 5.11. Параметар S_{22} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_1,5 mm, BPF1_2,5 mm, BPF1_3,5 mm, BPF1_4,5 mm – симулације WIPL-D Microwave Pro умањених дужина спрежњака за дате вредности.



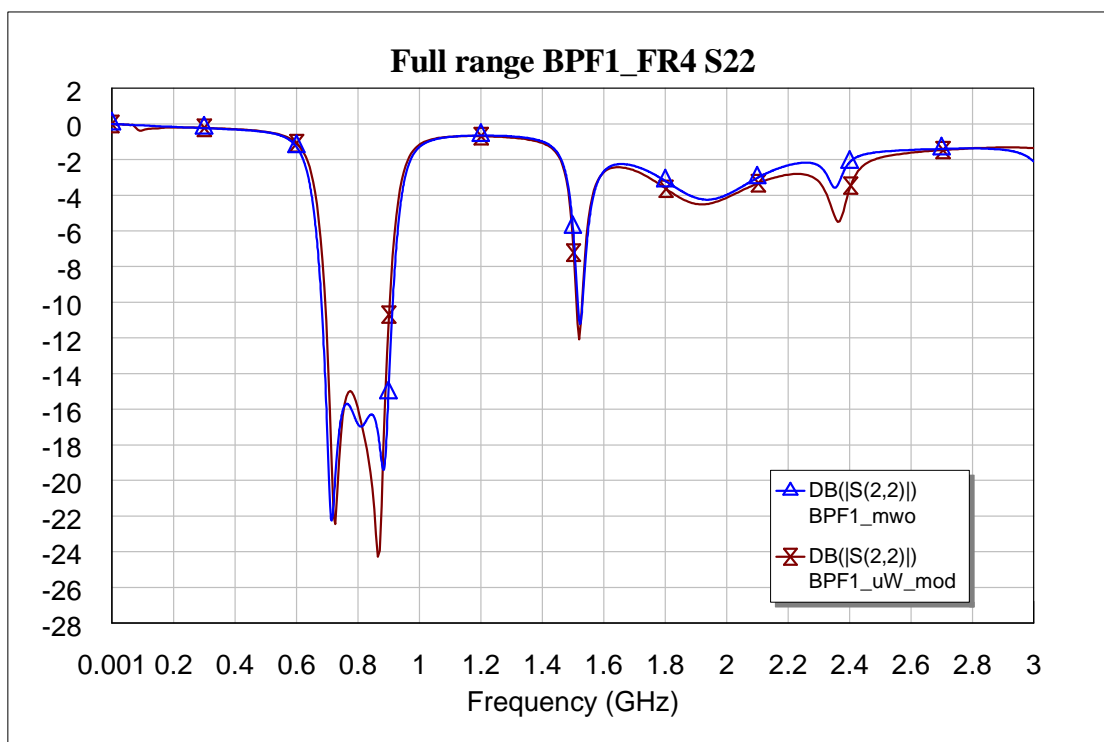
Слика 5.12. Параметар S_{11} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW_mod – симулација WIPL-D Microwave Pro после корекције.



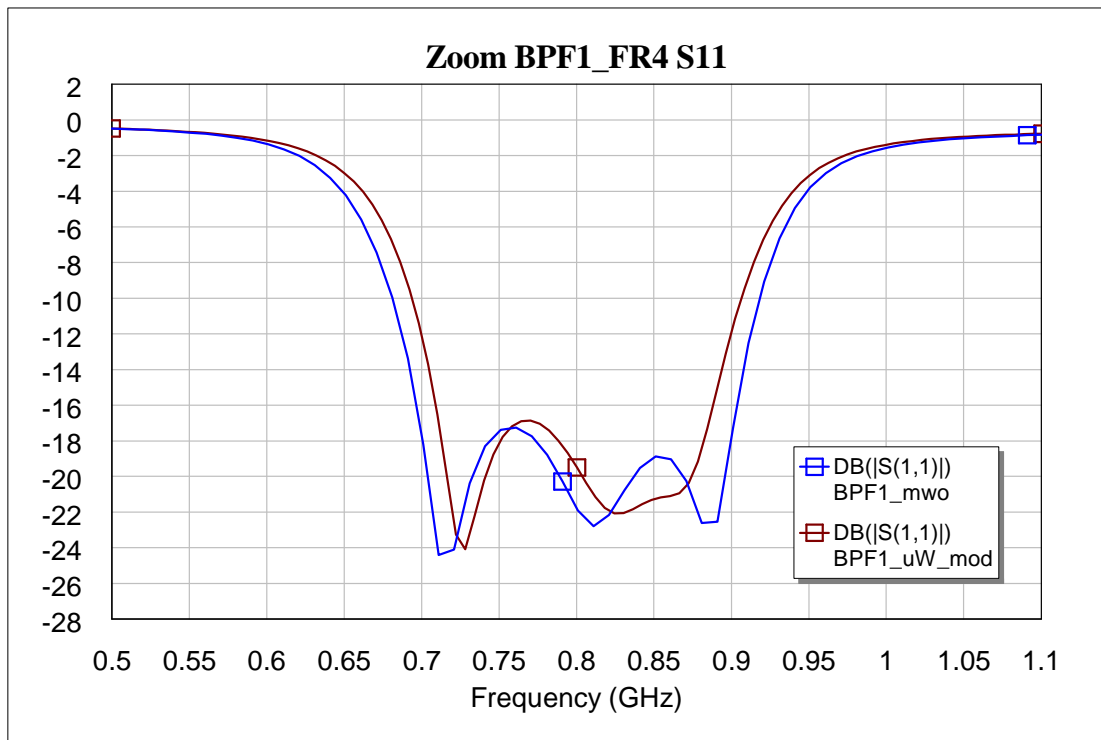
Слика 5.13. Параметар S_{12} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW_mod – симулација WIPL-D Microwave Pro после корекције.



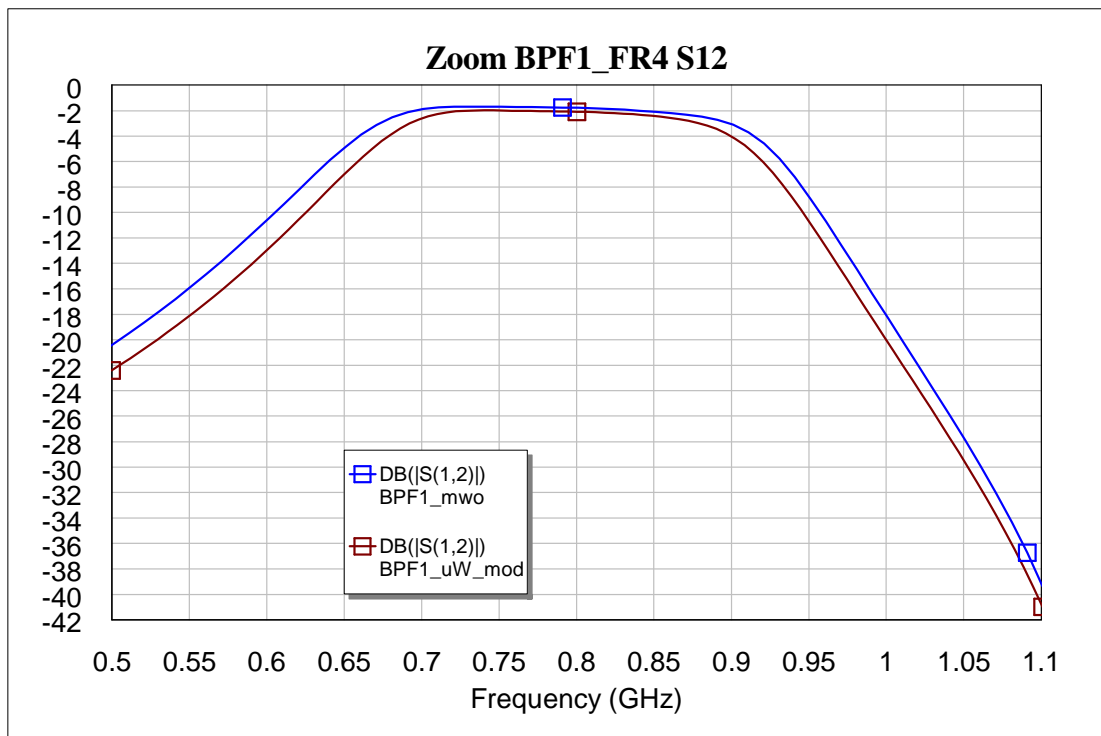
Слика 5.14. Параметар S_{21} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW_mod – симулација WIPL-D Microwave Pro после корекције.



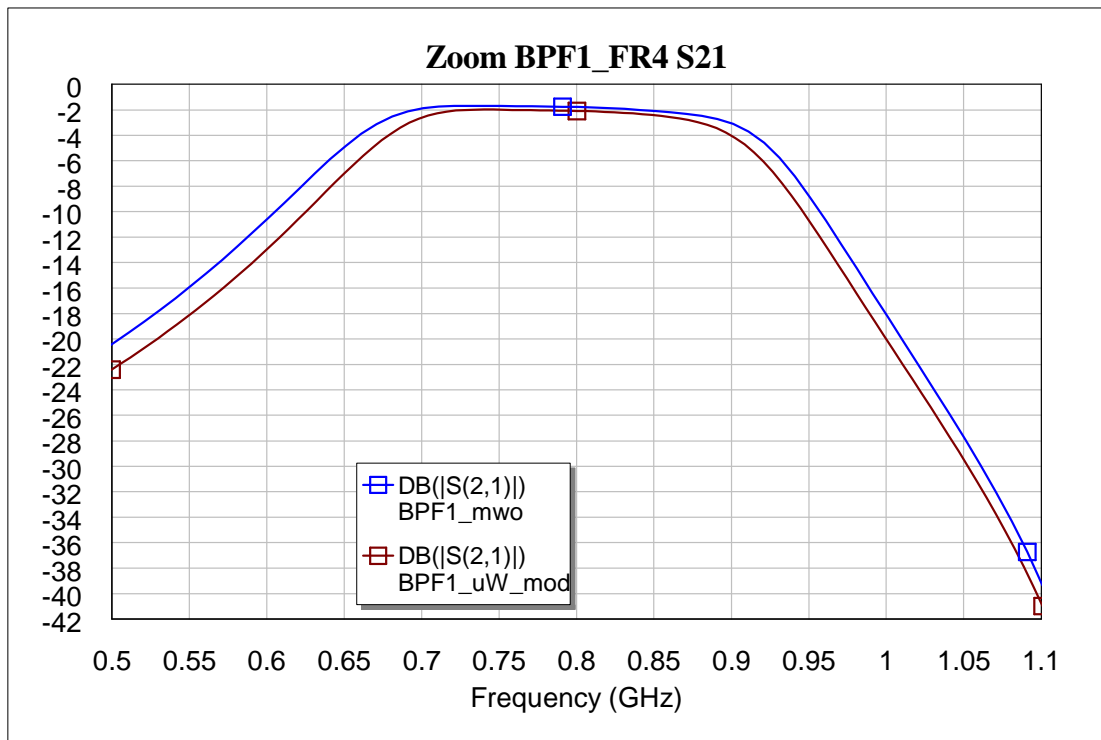
Слика 5.14. Параметар S_{22} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW_mod – симулација WIPL-D Microwave Pro после корекције.



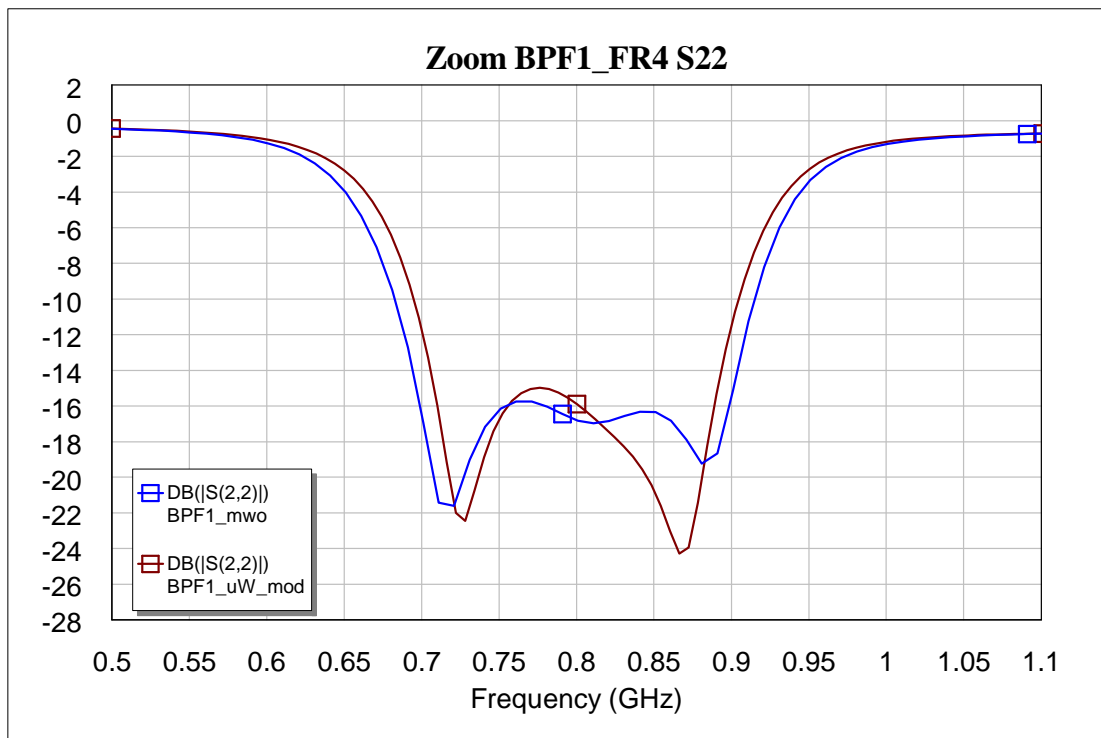
Слика 5.15. Параметар S_{11} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW_mod – симулација WIPL-D Microwave Pro после корекције.



Слика 5.16. Параметар S_{12} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW_mod – симулација WIPL-D Microwave Pro после корекције.



Слика 5.17. Параметар S_{21} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW_mod – симулација WIPL-D Microwave Pro после корекције.



Слика 5.18. Параметар S_{22} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_uW_mod – симулација WIPL-D Microwave Pro после корекције.

6. Експериментални резултати и поређење са резултатима симулација за филтар пропусник опсега

У овом поглављу ће бити приказани сви резултати мерења фреквенцијских карактеристика лабораторијског прототипа филтра пропусника опсега. Експериментални резултати упоређени су са резултатима симулација.

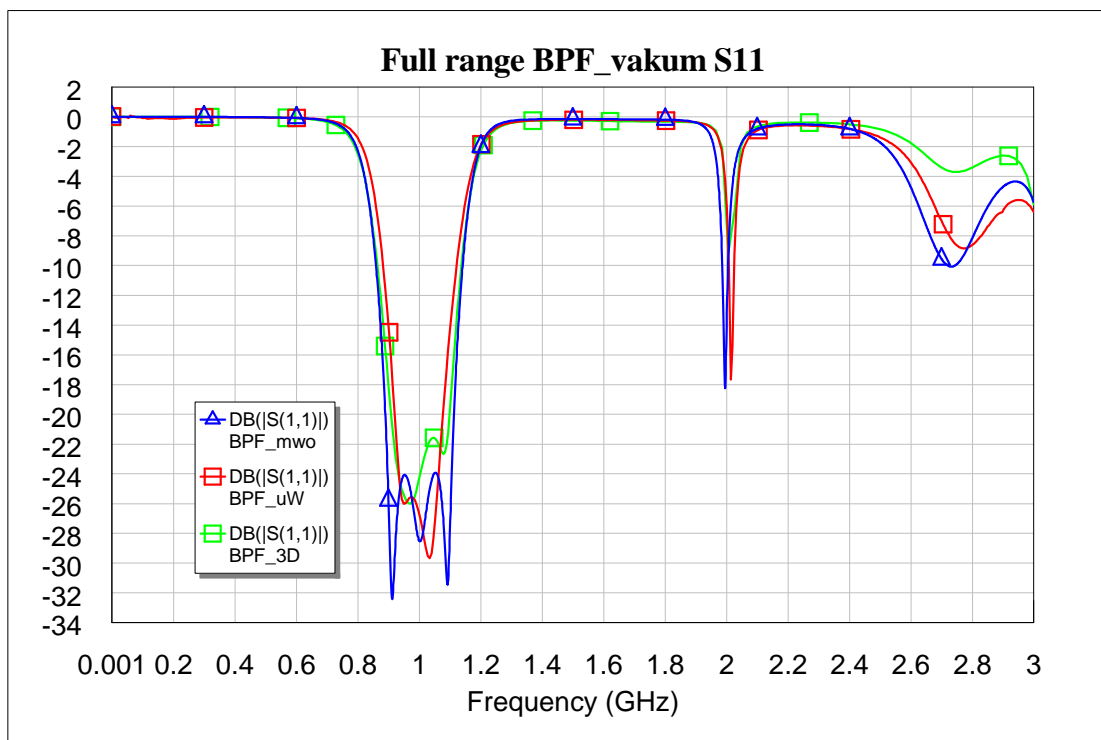
На анализатору мрежа Agilent E5062A измерена су сва четири параметара расејања филтра у опсегу од 300 kHz до 3 GHz.

Фреквенцијске карактеристике су представљене кроз две групе графика. У првој групи су приказани резултати мерења и симулације тако што се на графику приказују параметри S_{11} и S_{21} или S_{22} и S_{12} по модулу. У другој групи се приказује модул само једног параметра расејања.

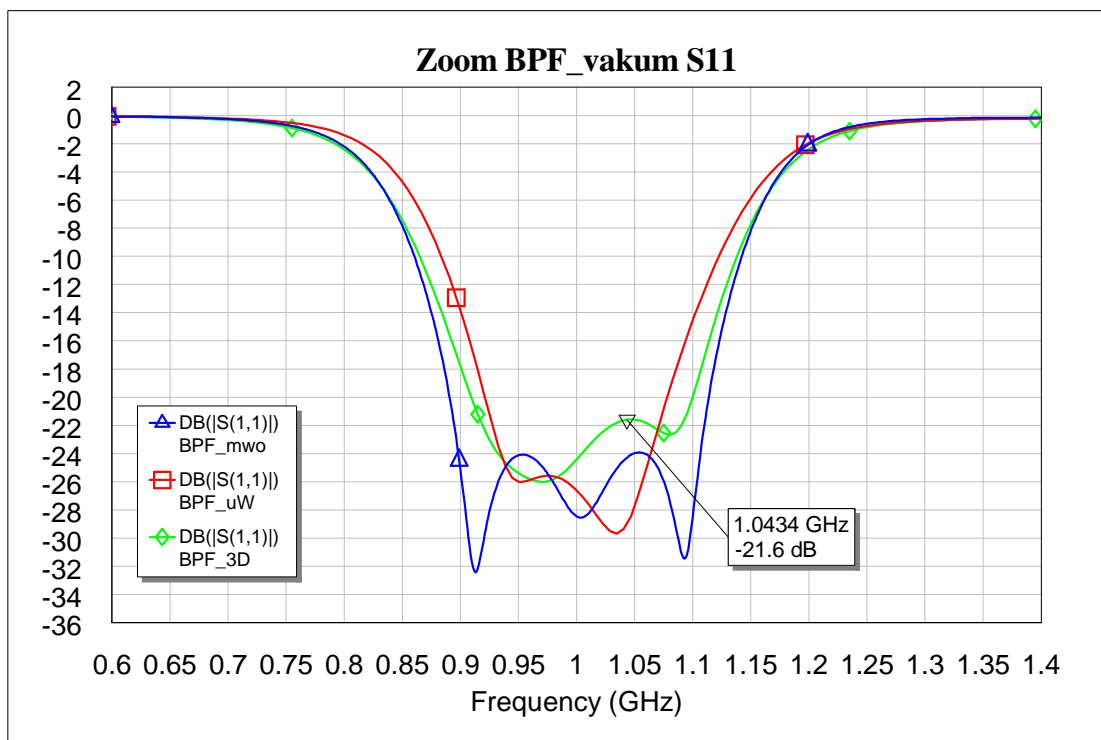
Ради бољег увида у фреквенцијске карактеристике графици се приказују у два опсега учестаности. Први је пун опсег учестаности од 1 MHz до 3 GHz (Full range), а други је пропусни опсег учестаности око централне учестаности (Zoom).

На дијаграмима су постављене ознаке (маркери) на карактеристичним местима: максимуми криве, минимуми криве, на граничним учестаностима где је вредност за 3 dB мања од максимума, на централној учестаности и у тачкама пресека S -параметара.

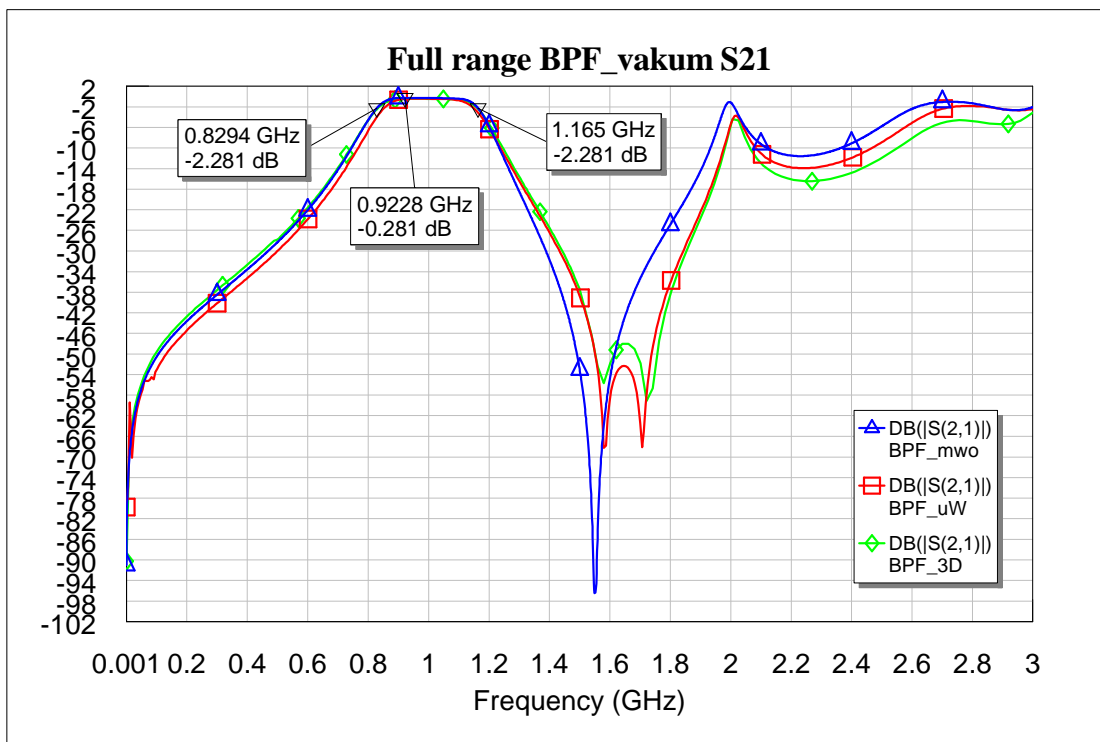
6.1. Резултати симулација за BPF у вакууму



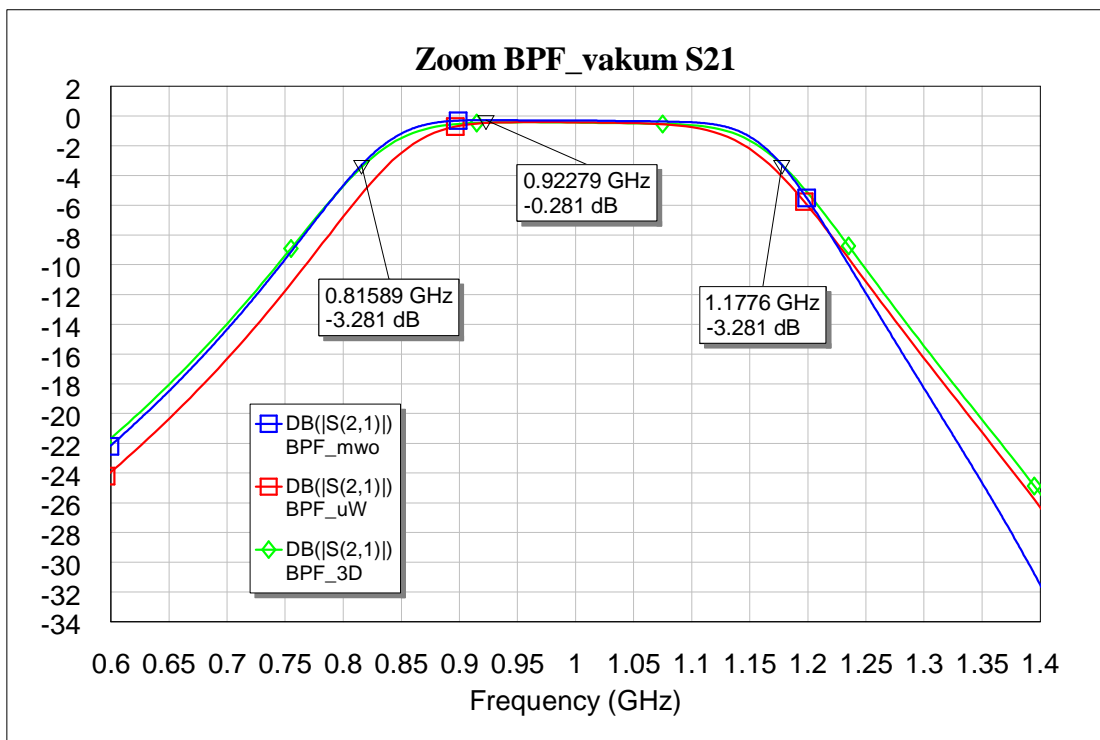
Слика 6.1.1. Параметар S_{11} у пуном опсегу учестаности за BPF. BPF_mwo – симулација Microwave Office, BPF_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.



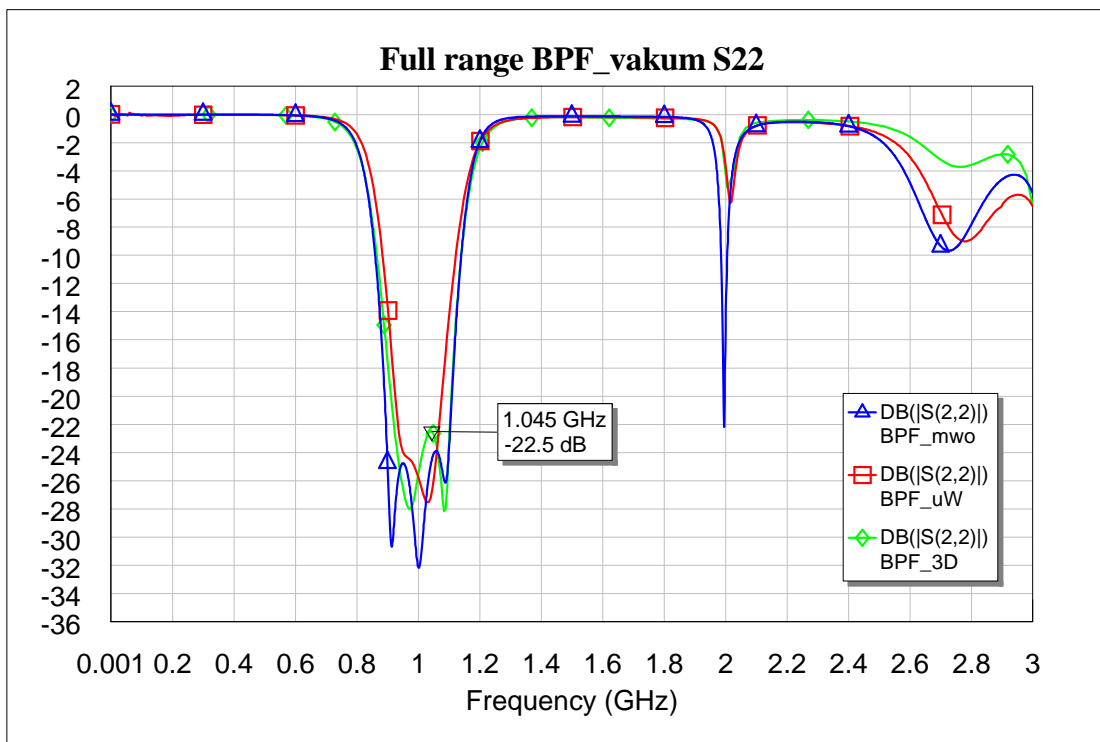
Слика 6.1.2. Параметар S_{11} у пропусном опсегу учестаности за BPF. BPF_mwo – симулација Microwave Office, BPF_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.



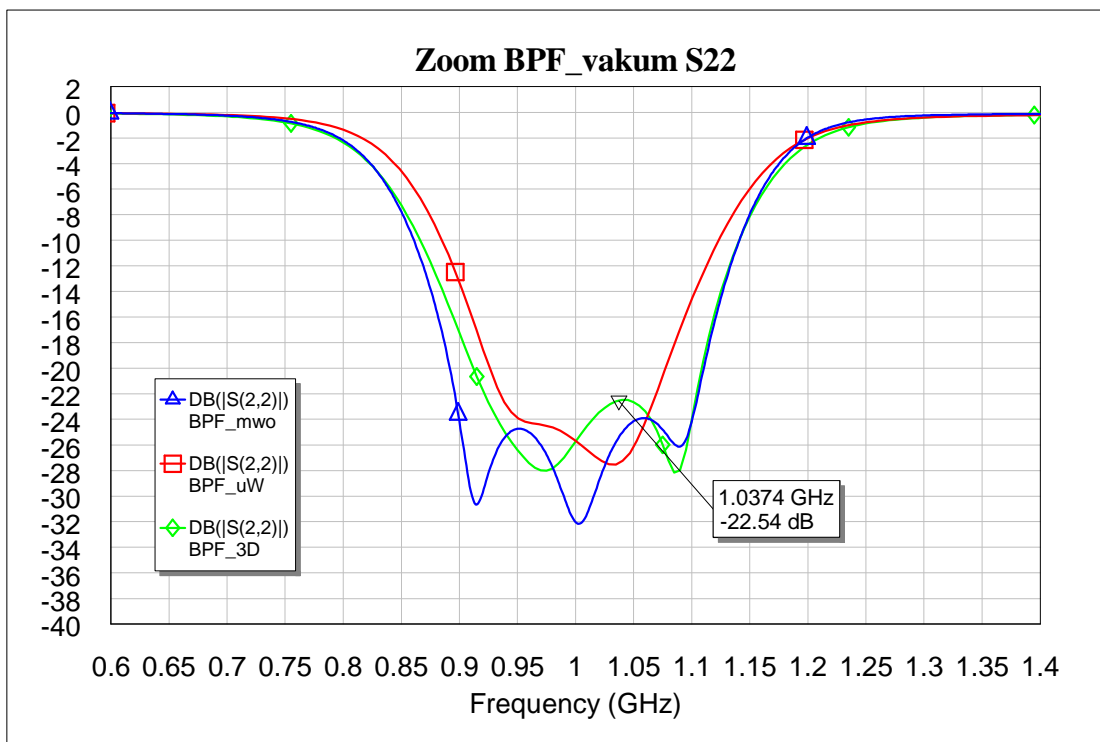
Слика 6.1.3. Параметар S_{21} у пуном опсегу учестаности за BPF. BPF_mwo – симулација Microwave Office, BPF_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.



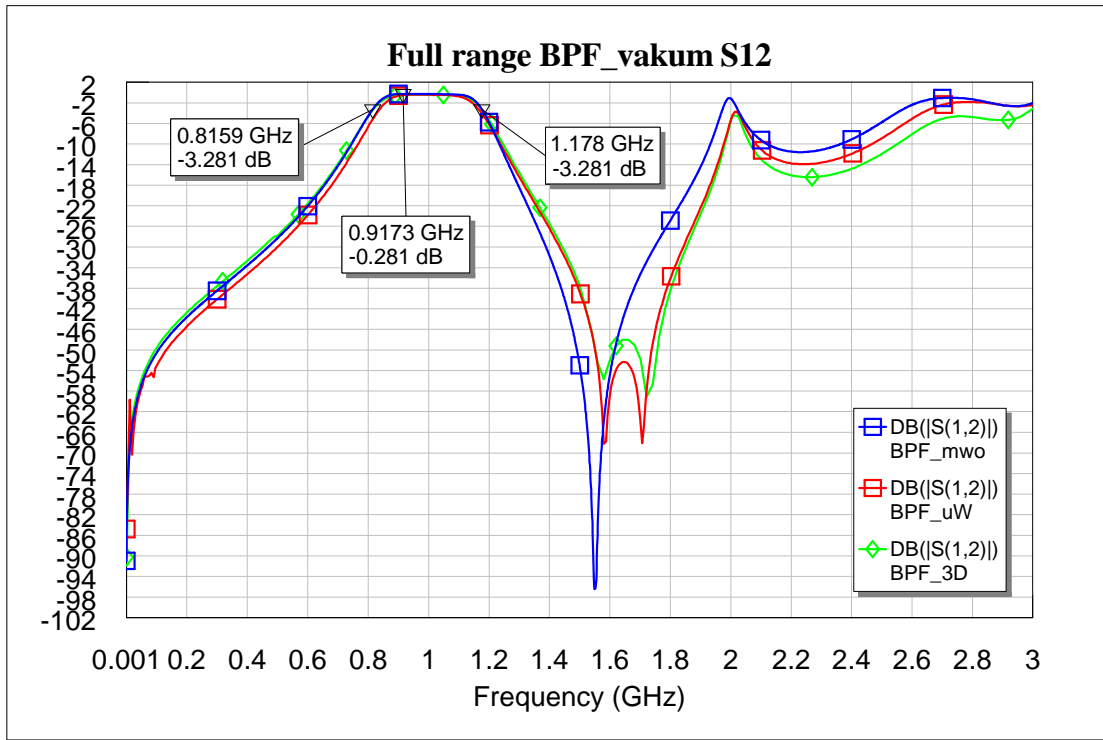
Слика 6.1.4. Параметар S_{21} у пропусном опсегу учестаности за BPF. BPF_mwo – симулација Microwave Office, BPF_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.



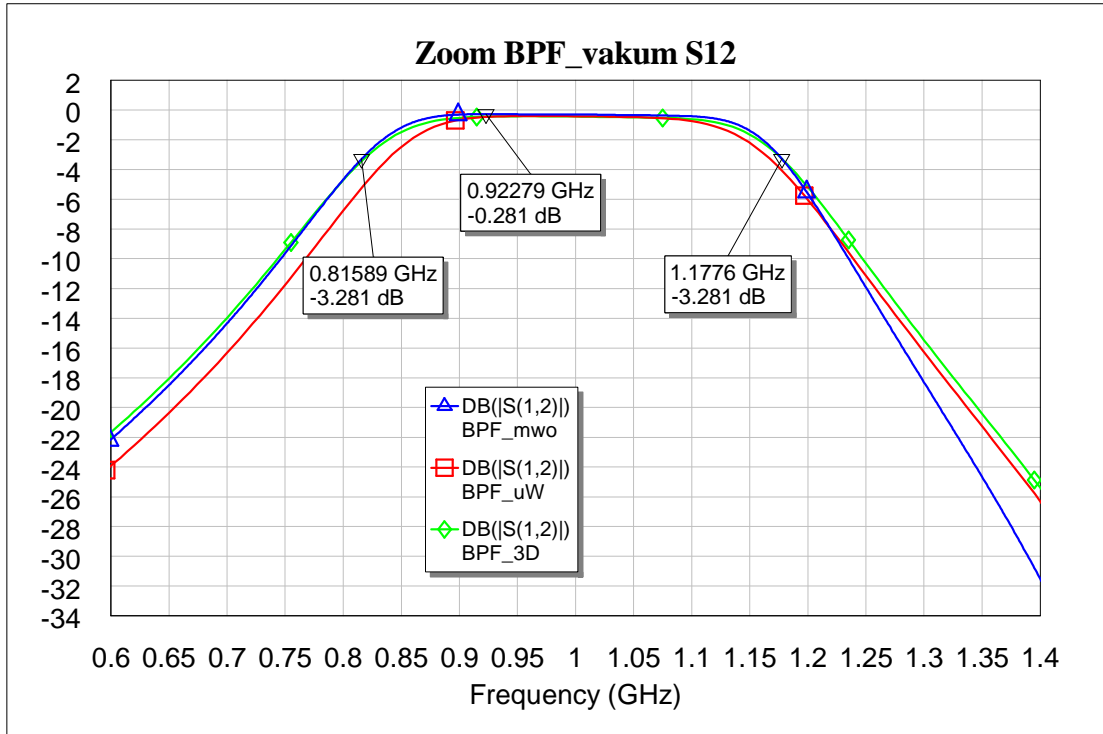
Слика 6.1.5. Параметар S_{22} у пуном опсегу учестаности за BPF. BPF_mwo – симулација Microwave Office, BPF_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.



Слика 6.1.6. Параметар S_{22} у пропусном опсегу учестаности за BPF. BPF_mwo – симулација Microwave Office, BPF_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.

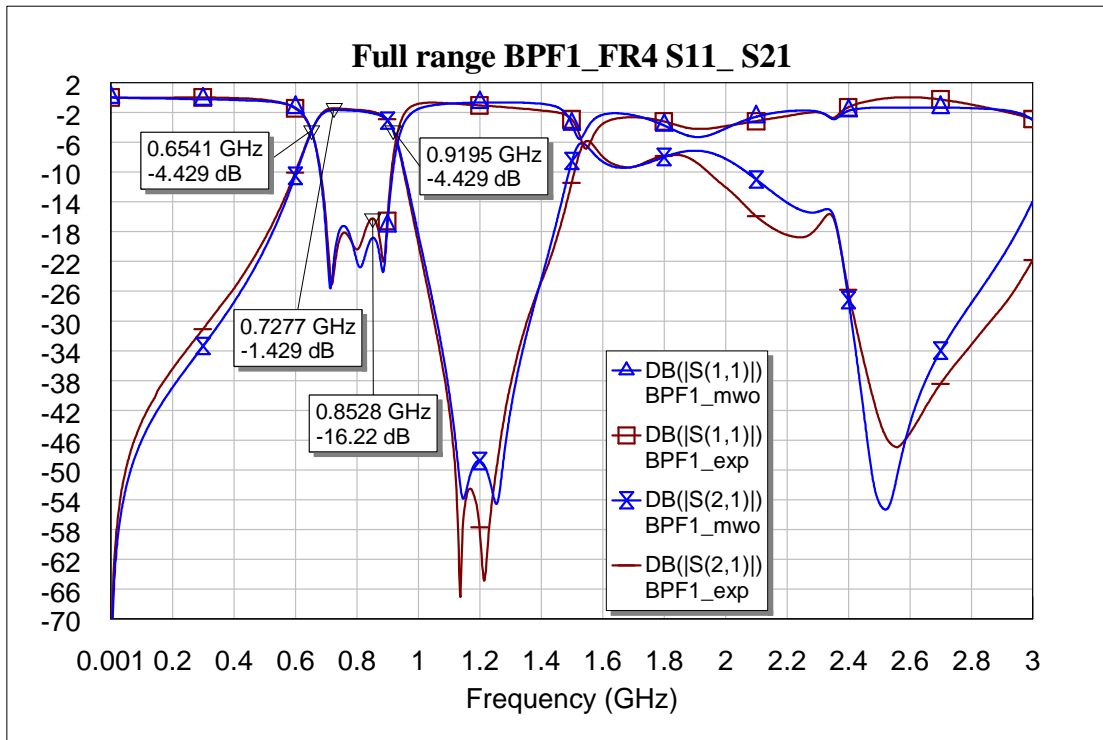


Слика 6.1.7. Параметар S_{12} у пуном опсегу учестаности за BPF. BPF_mwo – симулација Microwave Office, BPF_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.

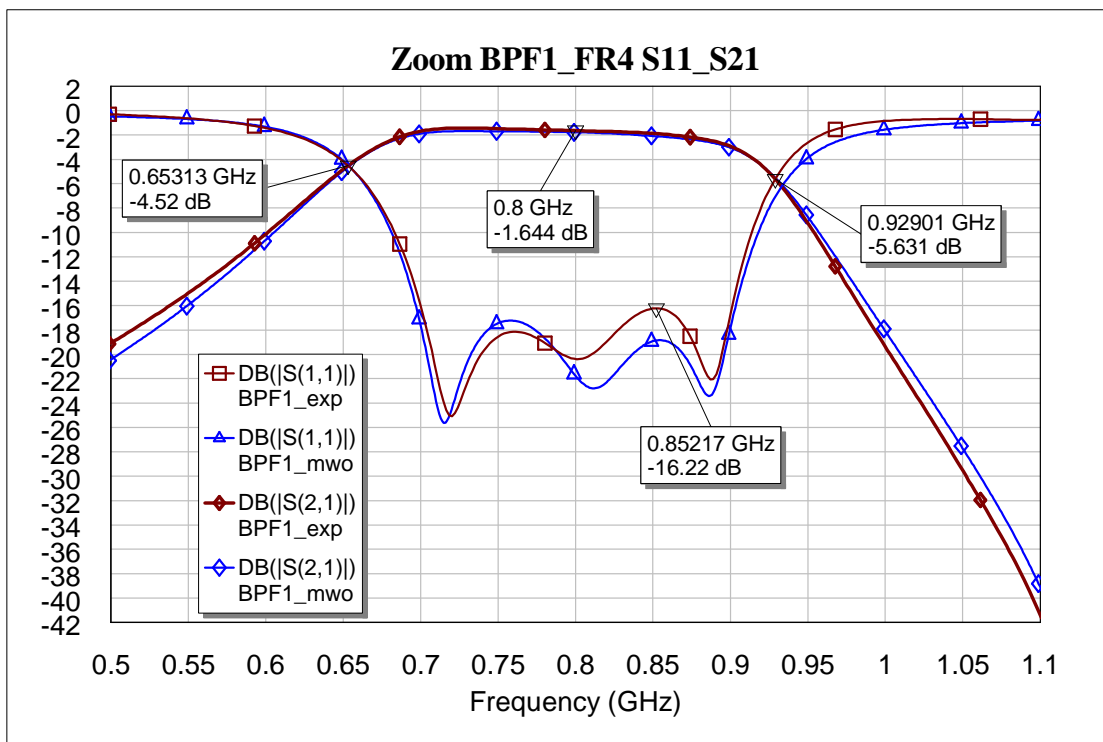


Слика 6.1.8. Параметар S_{12} у пропусном опсегу учестаности за BPF. BPF_mwo – симулација Microwave Office, BPF_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.

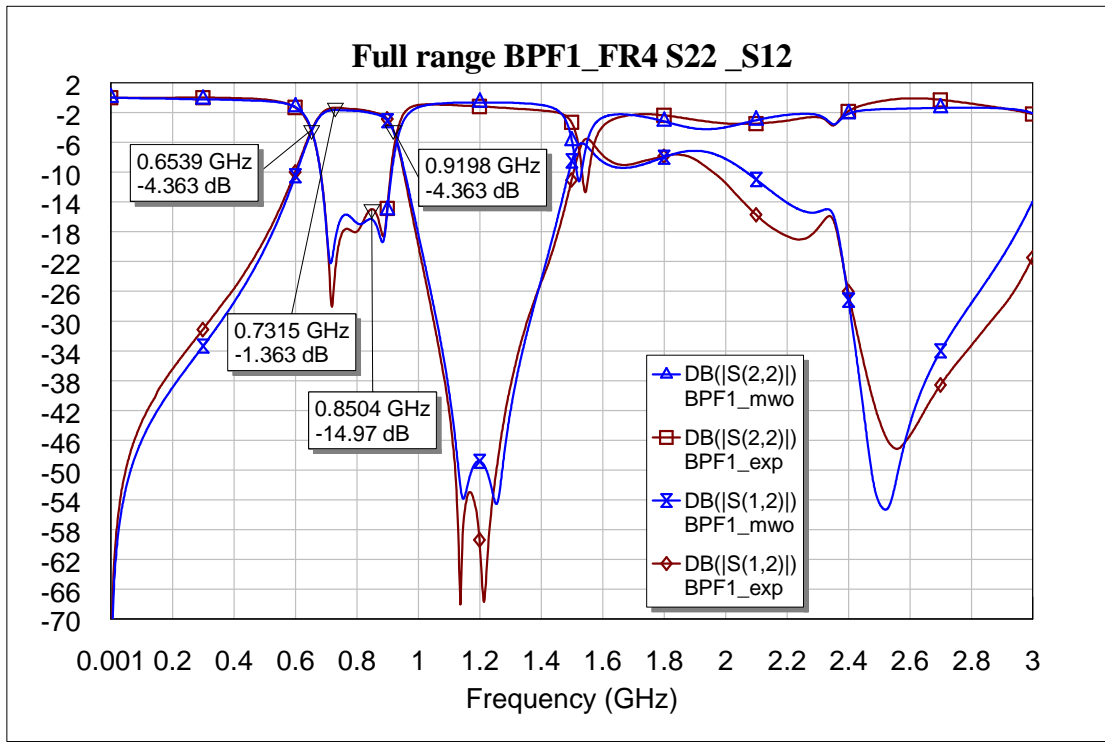
6.2. Резултати мерења и симулација за BPF1 на супстрату FR-4



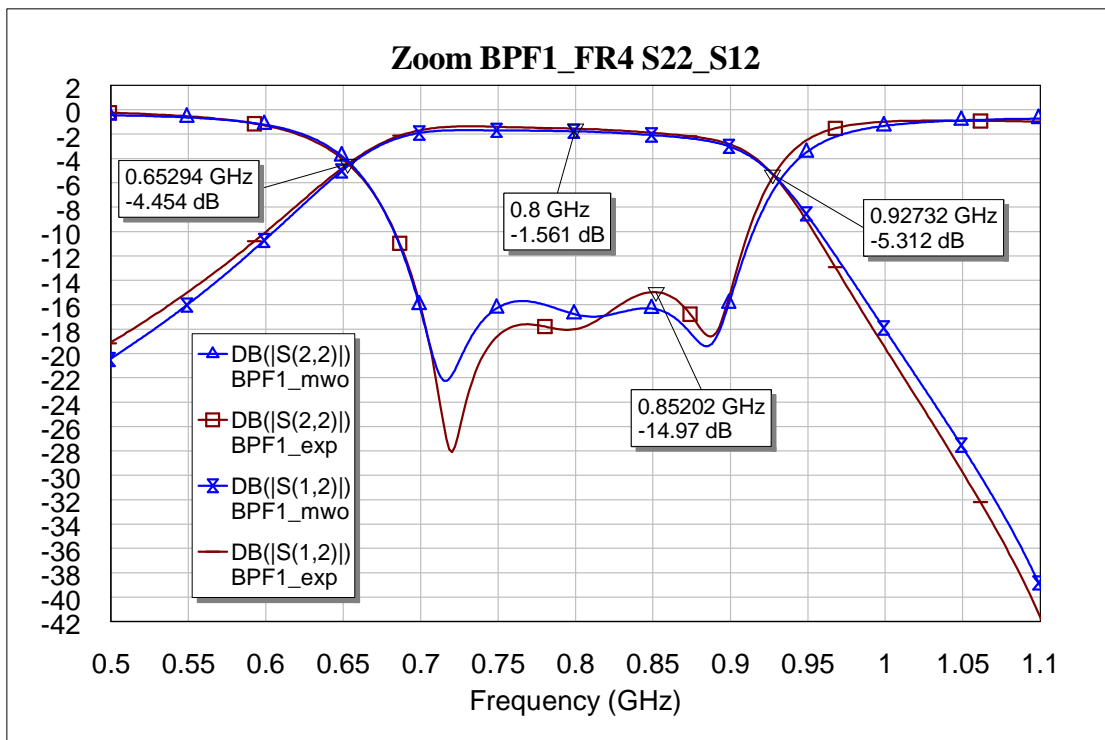
Слика 6.2.1. Параметри S_{11} и S_{21} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exp – мерења 2. авг 2011.



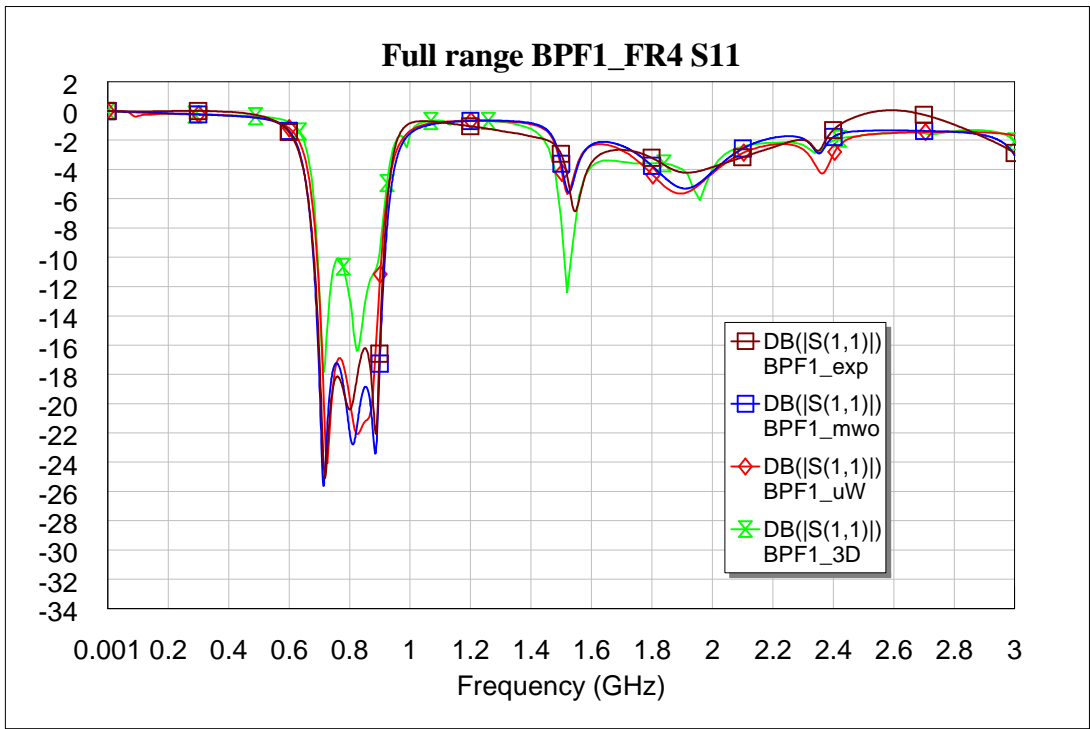
Слика 6.2.2. Параметри S_{11} и S_{21} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exp – мерења 2. авг 2011.



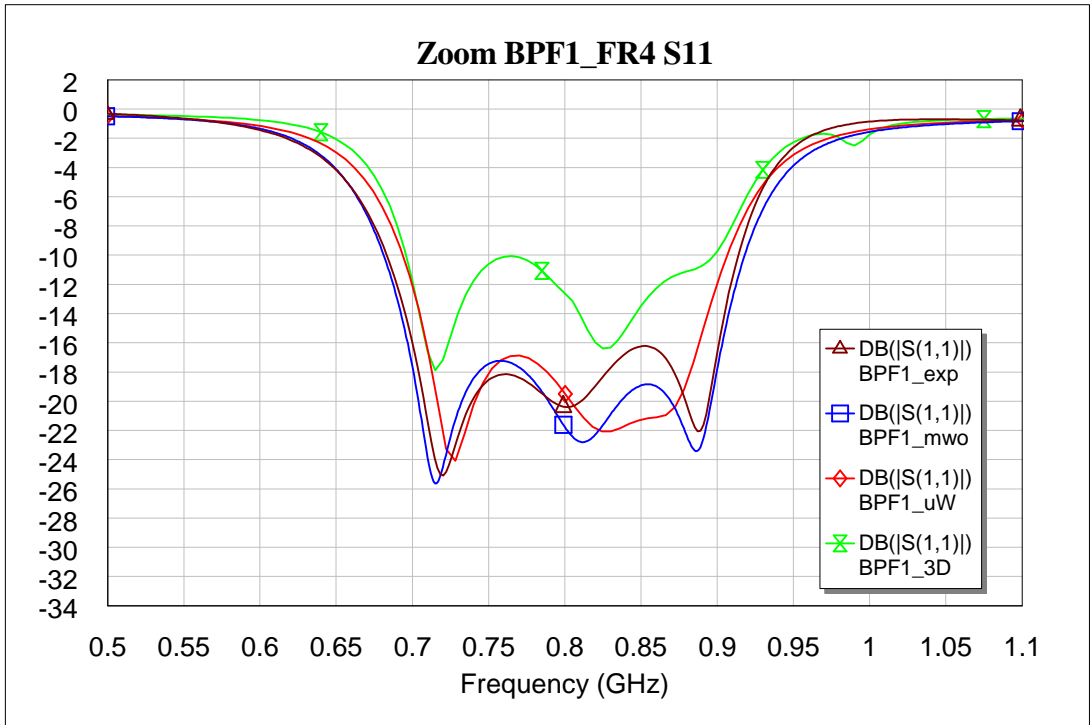
Слика 6.2.3. Параметри S_{22} и S_{12} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exp – мерења 2. авг 2011.



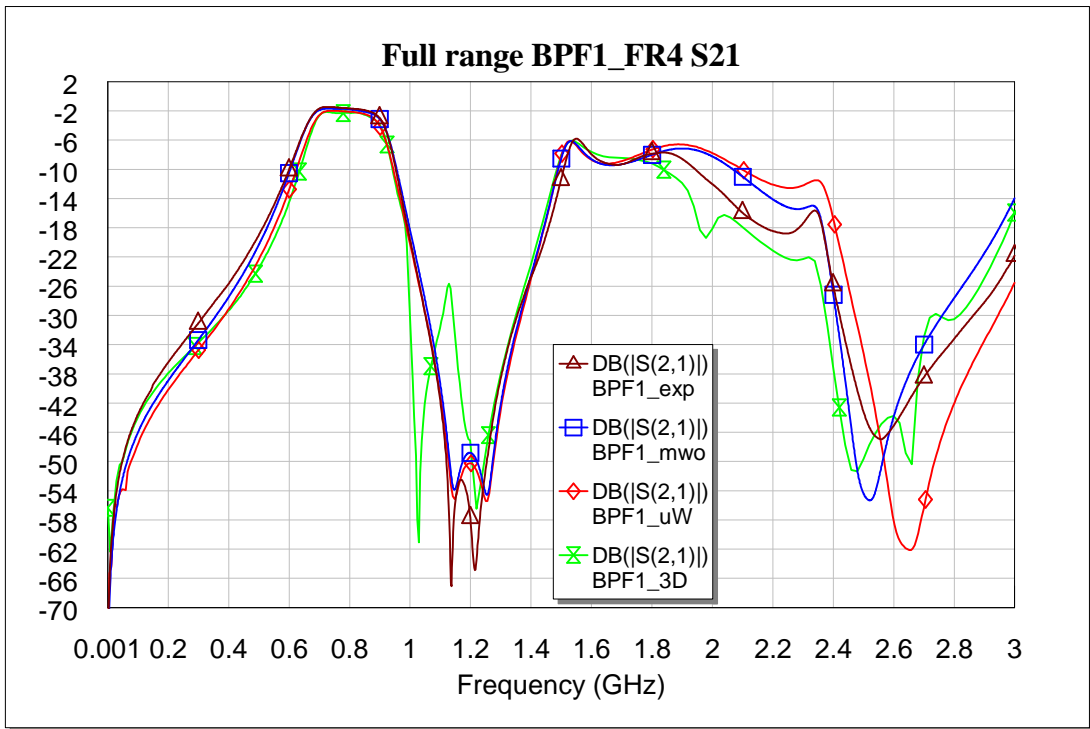
Слика 6.2.4. Параметри S_{22} и S_{12} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exp – мерења 2. авг 2011.



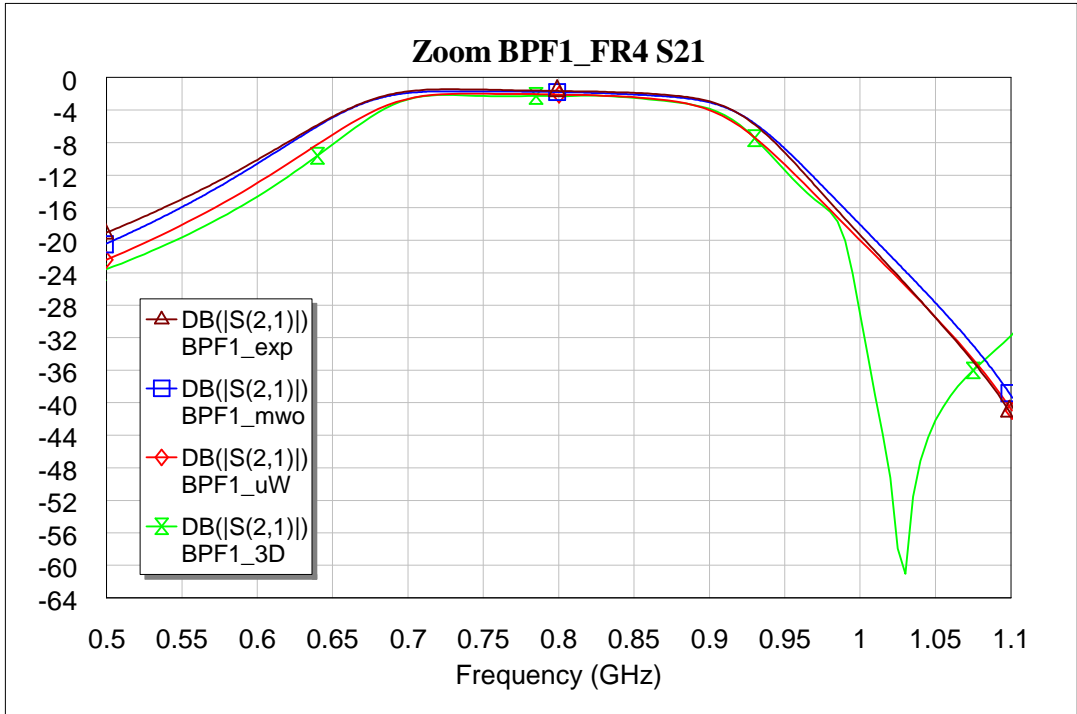
Слика 6.2.5. Параметар S_{11} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exp – мерења 2. авг 2011. BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF1_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.



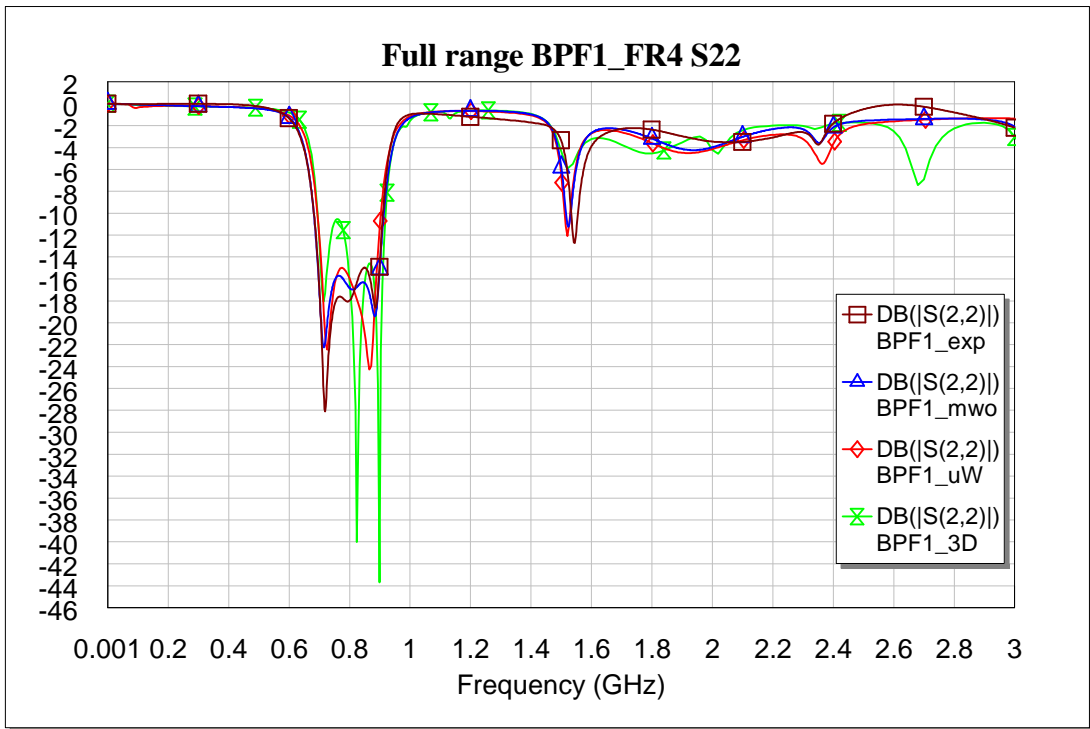
Слика 6.2.6. Параметар S_{11} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exp – мерења 2. авг 2011. BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF1_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.



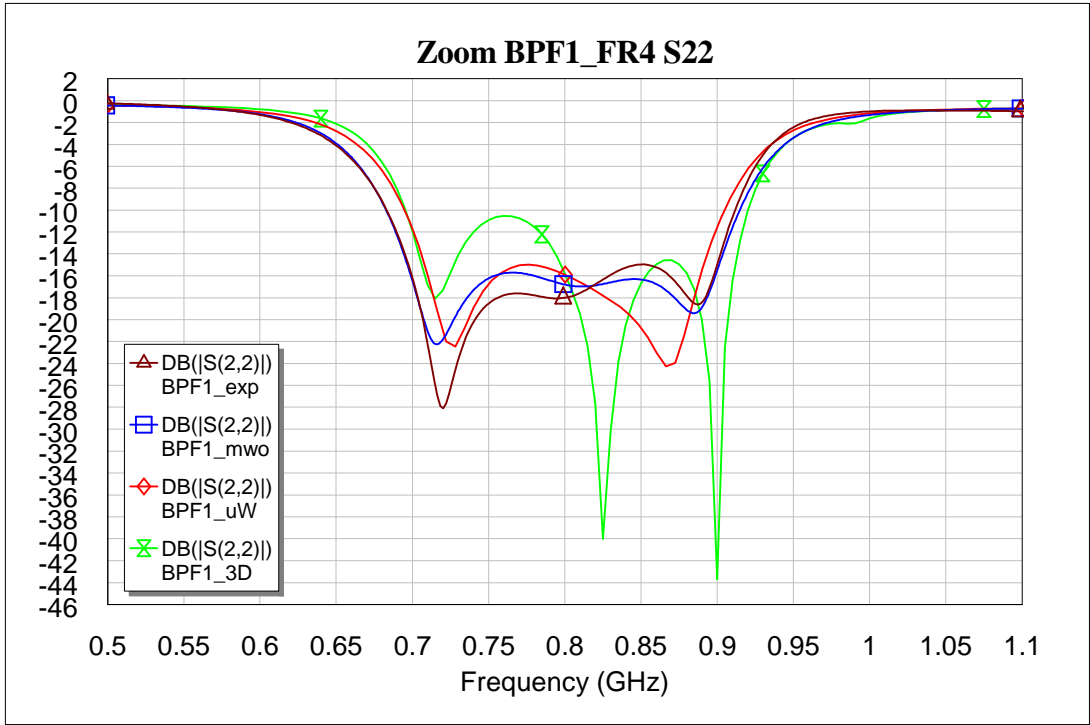
Слика 6.2.7. Параметар S_{11} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exp – мерења 2. авг 2011. BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF1_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.



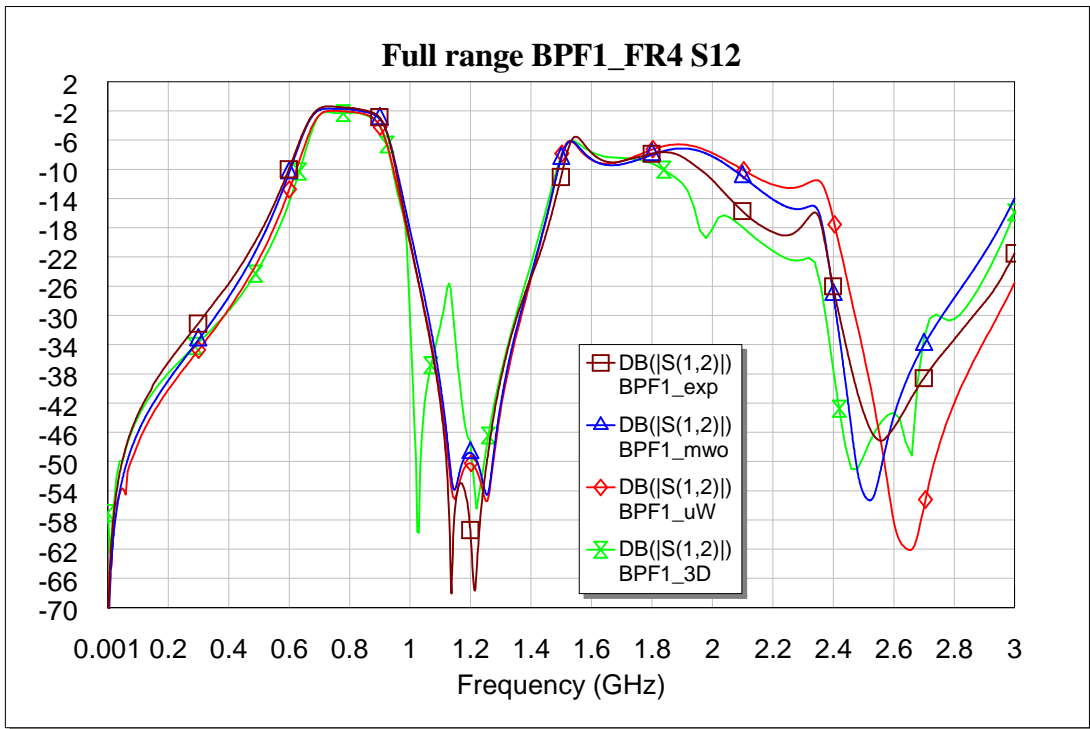
Слика 6.2.8. Параметар S_{21} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exp – мерења 2. авг 2011. BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF1_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.



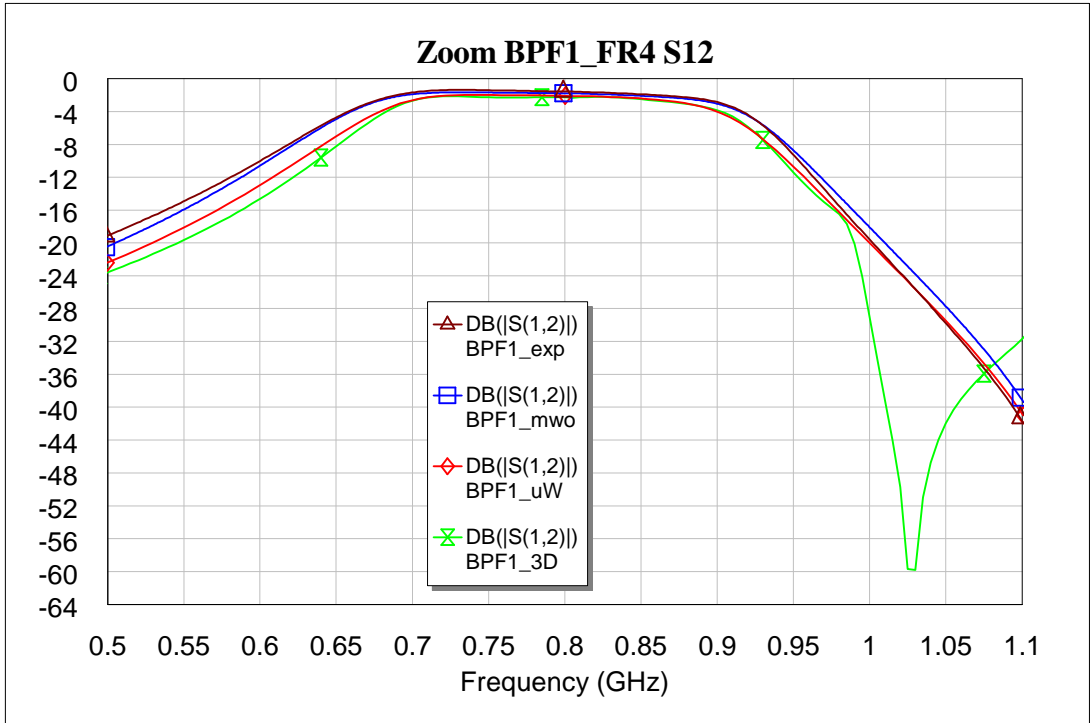
Слика 6.2.9. Параметар S_{22} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exp – мерења 2. авг 2011. BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF1_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.



Слика 6.2.10. Параметар S_{22} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exp – мерења 2. авг 2011. BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF1_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.

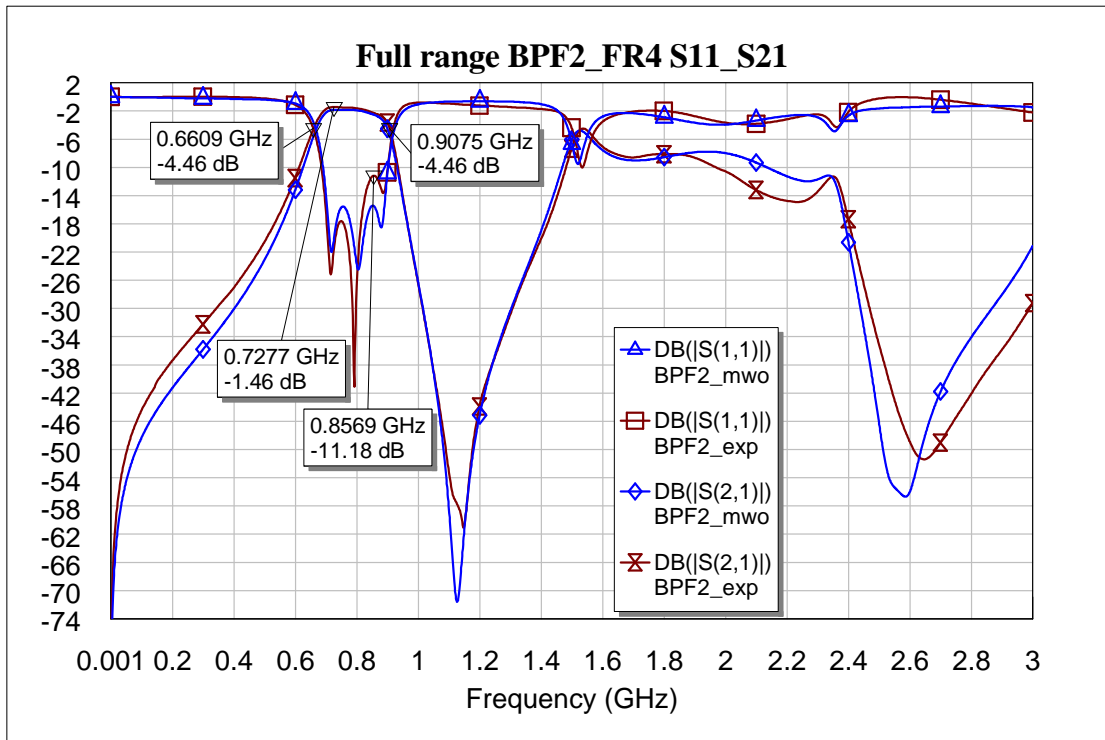


Слика 6.2.11. Параметар S_{12} у пуном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exp – мерења 2. авг 2011. BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF1_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.

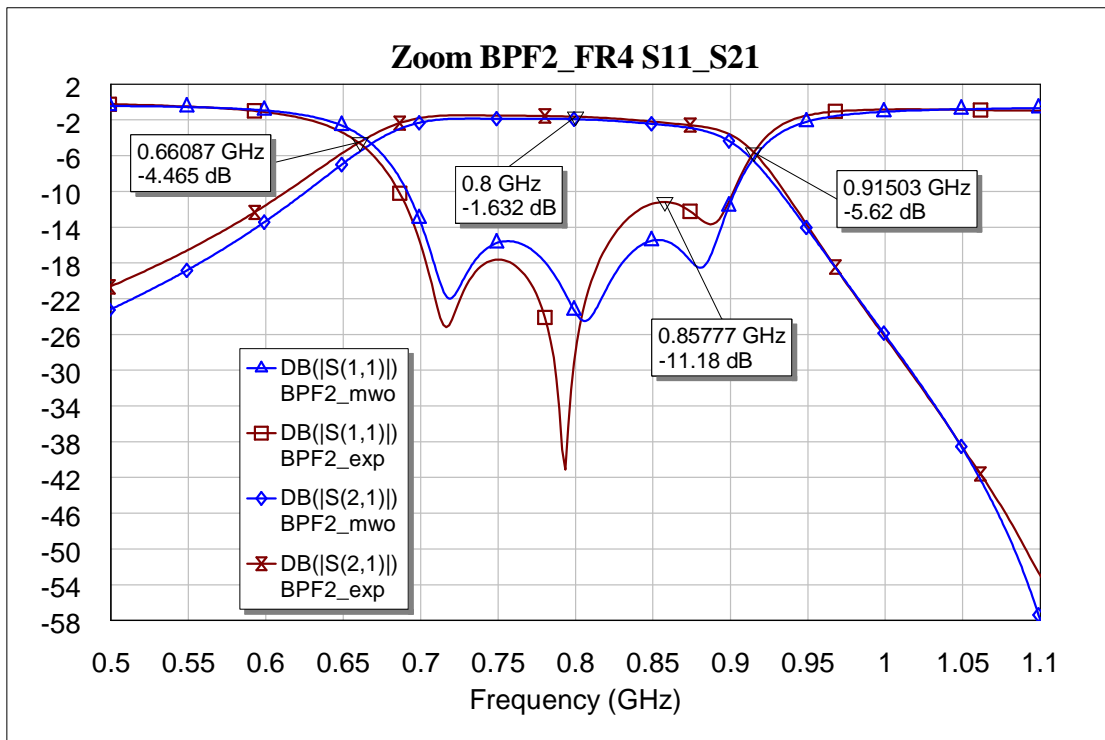


Слика 6.2.12. Параметар S_{12} у пропусном опсегу учестаности за BPF1. BPF1_mwo – симулација Microwave Office, BPF1_exp – мерења 2. авг 2011. BPF1_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF1_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.

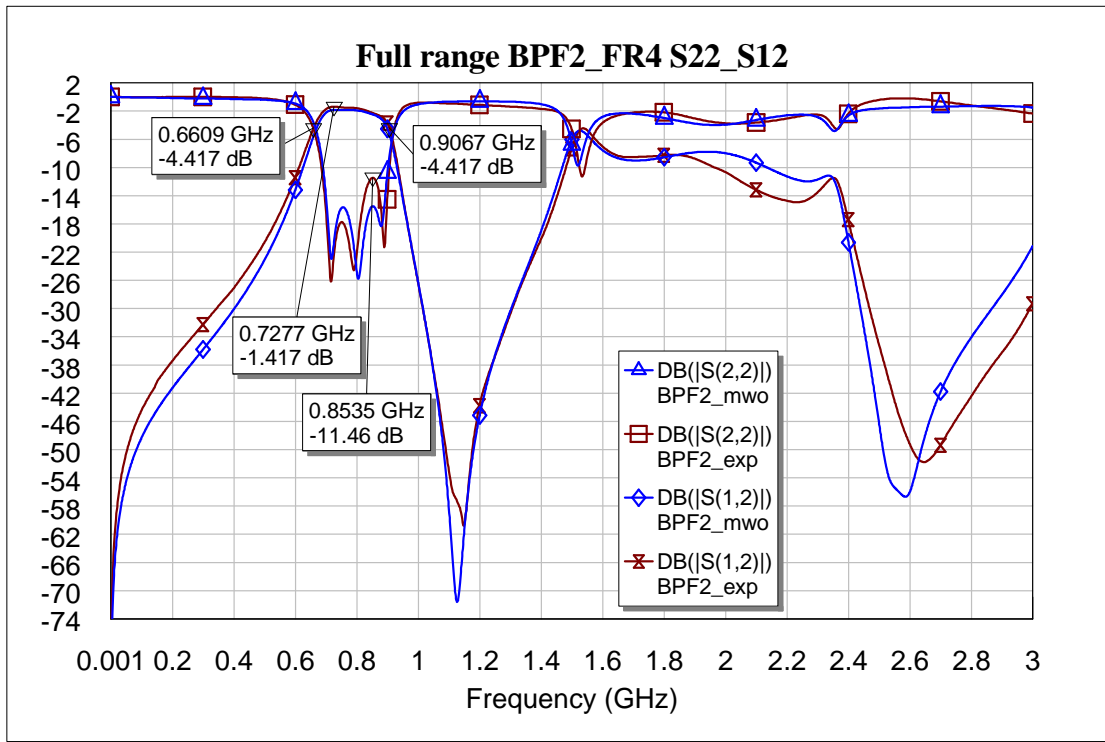
6.3. Резултати мерења и симулација за BPF2 на супстрату FR-4



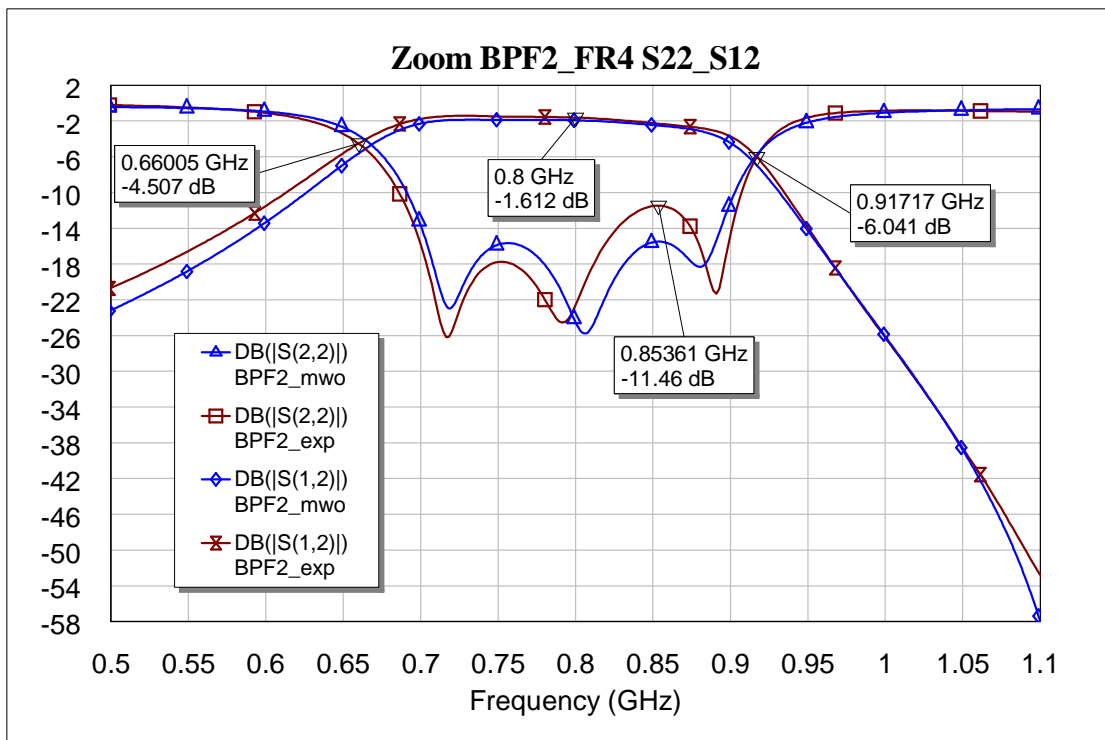
Слика 6.3.1. Параметри S_{11} и S_{21} у пуном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_exp – мерења 2. авг 2011.



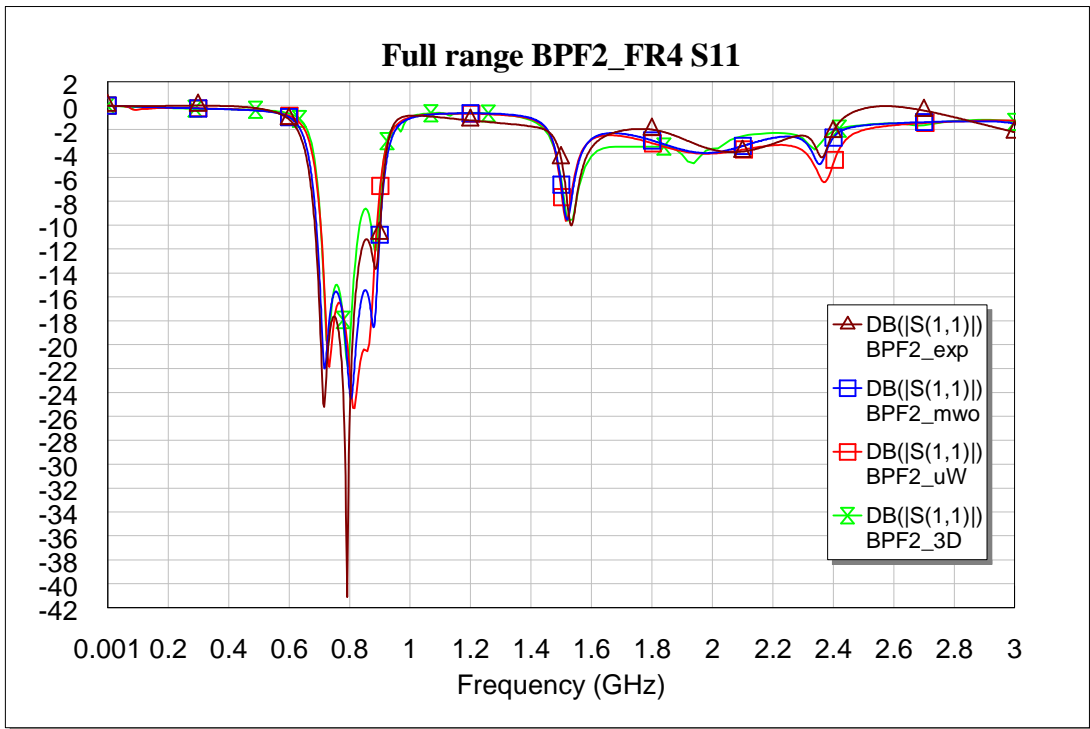
Слика 6.3.2. Параметри S_{11} и S_{21} у пропусном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_exp – мерења 2. авг 2011.



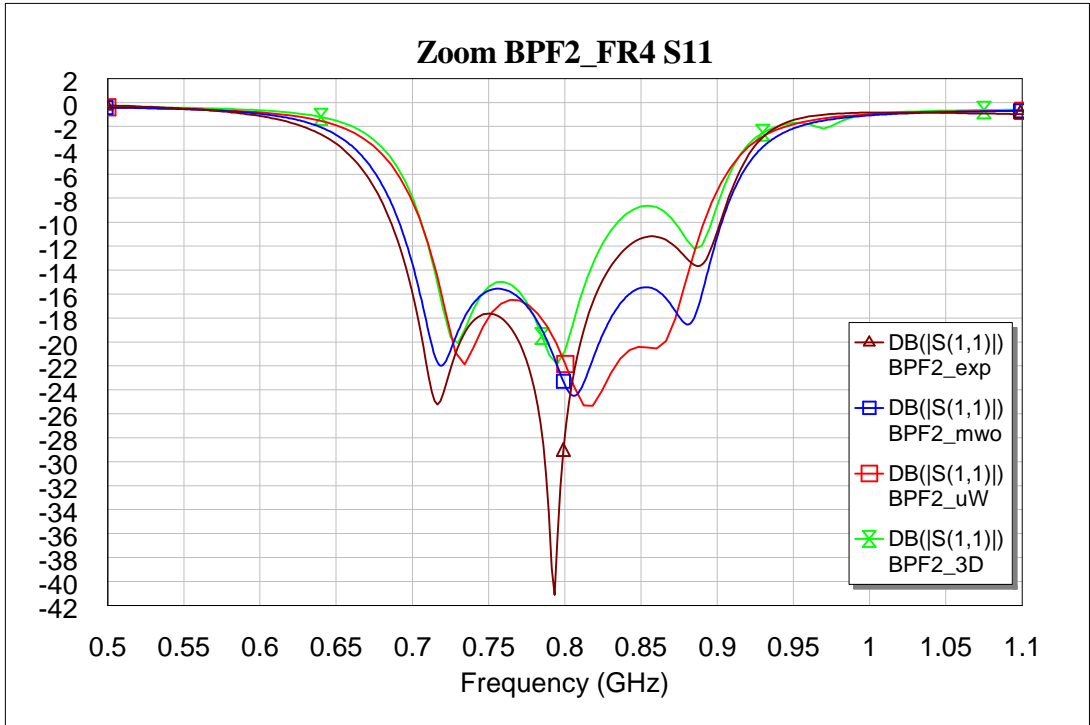
Слика 6.3.3. Параметри S_{22} и S_{12} у пуном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_exp – мерења 2. авг 2011.



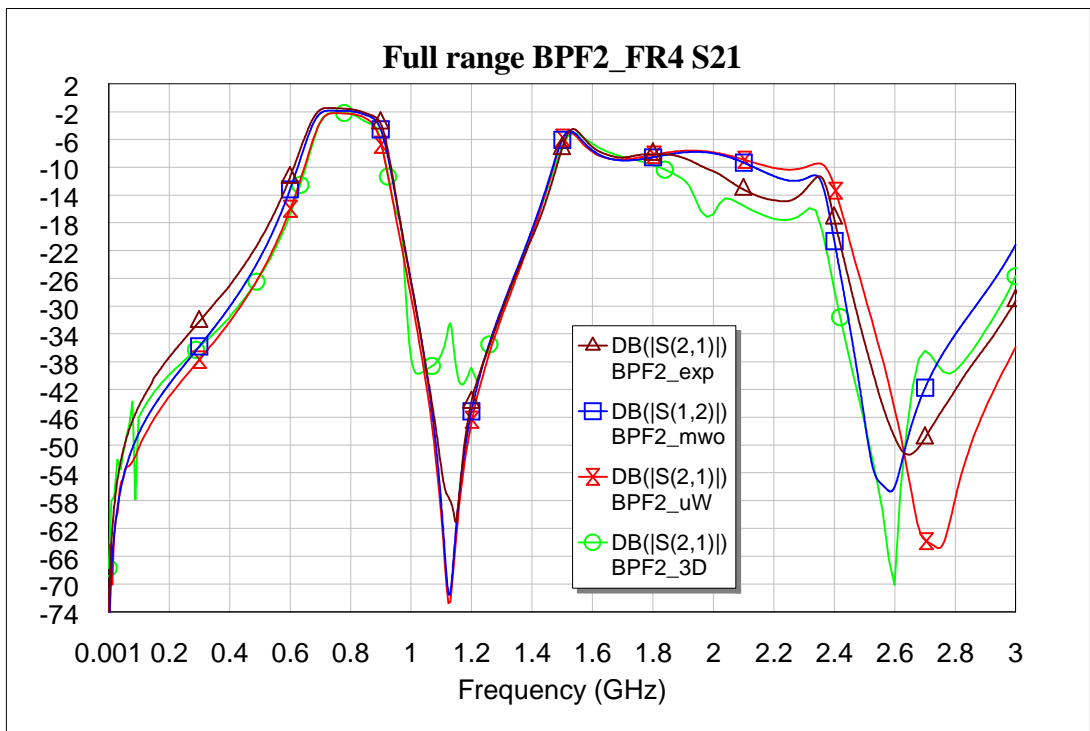
Слика 6.3.4. Параметри S_{22} и S_{12} у пропусном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_exp – мерења 2. авг 2011.



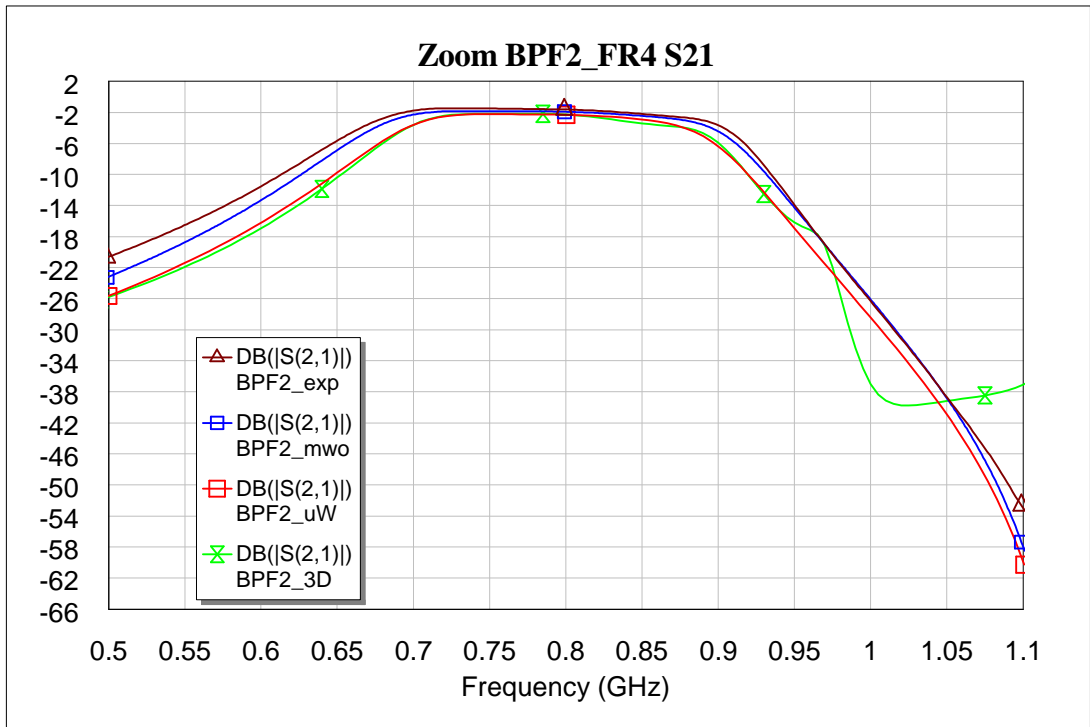
Слика 6.3.5. Параметар S_{11} у пуном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_exp – мерења 2. авг 2011. BPF2_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF2_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.



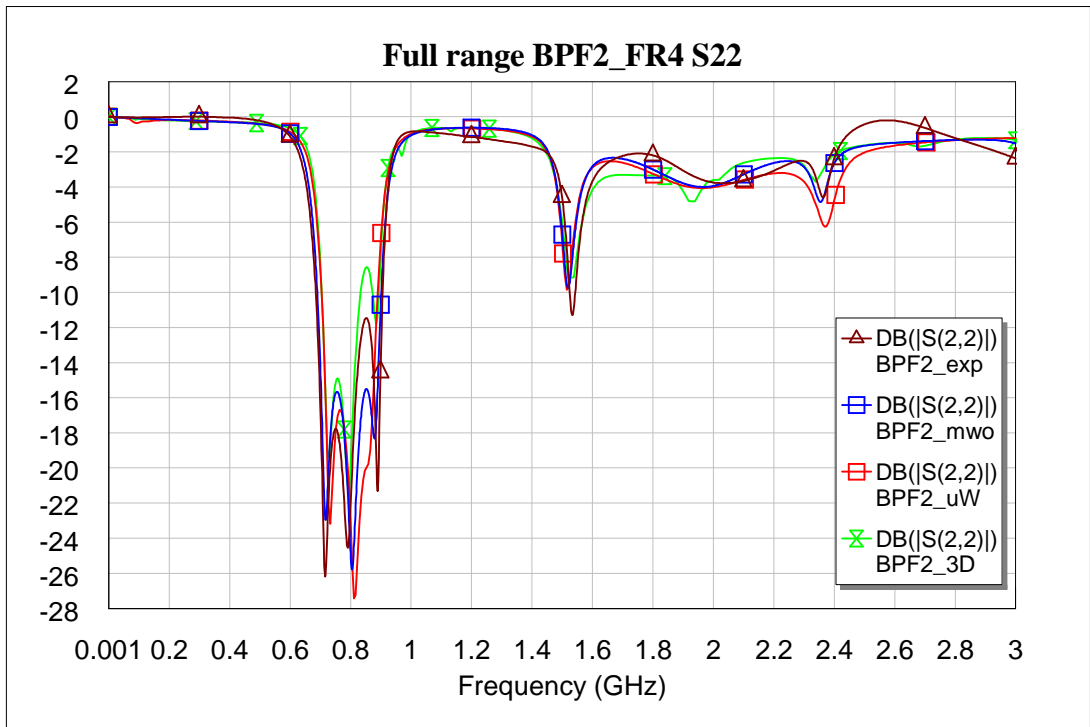
Слика 6.3.6. Параметар S_{11} у пропусном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_exp – мерења 2. авг 2011. BPF2_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF2_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.



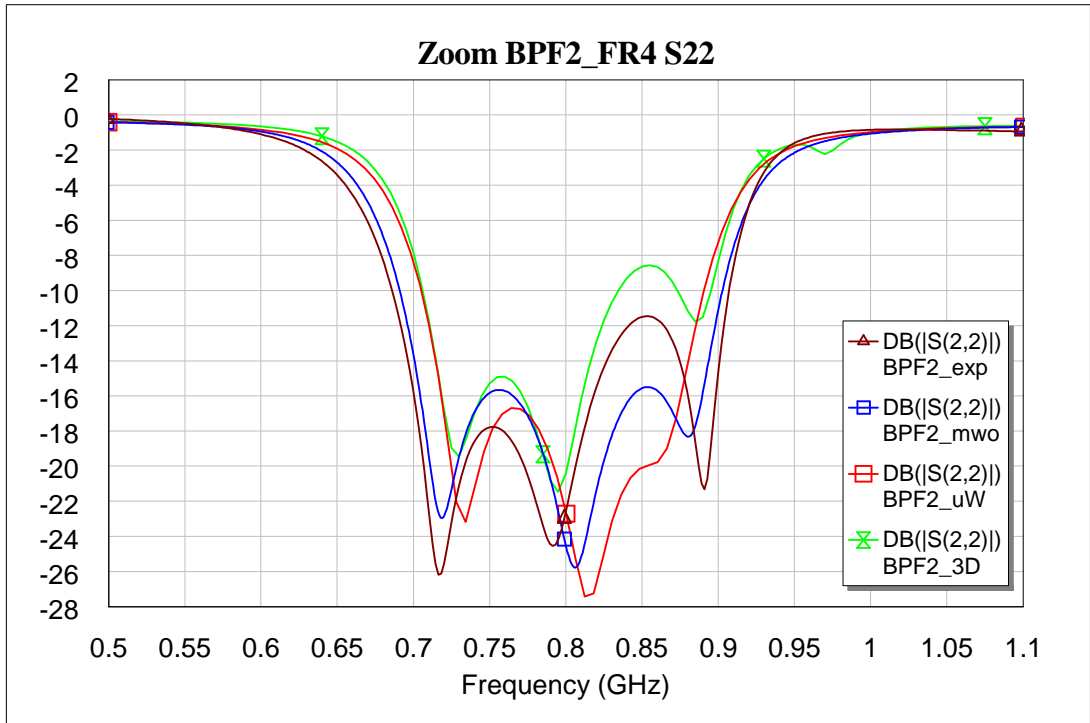
Слика 6.3.7. Параметар S_{21} у пуном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_exp – мерења 2. авг 2011. BPF2_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF2_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.



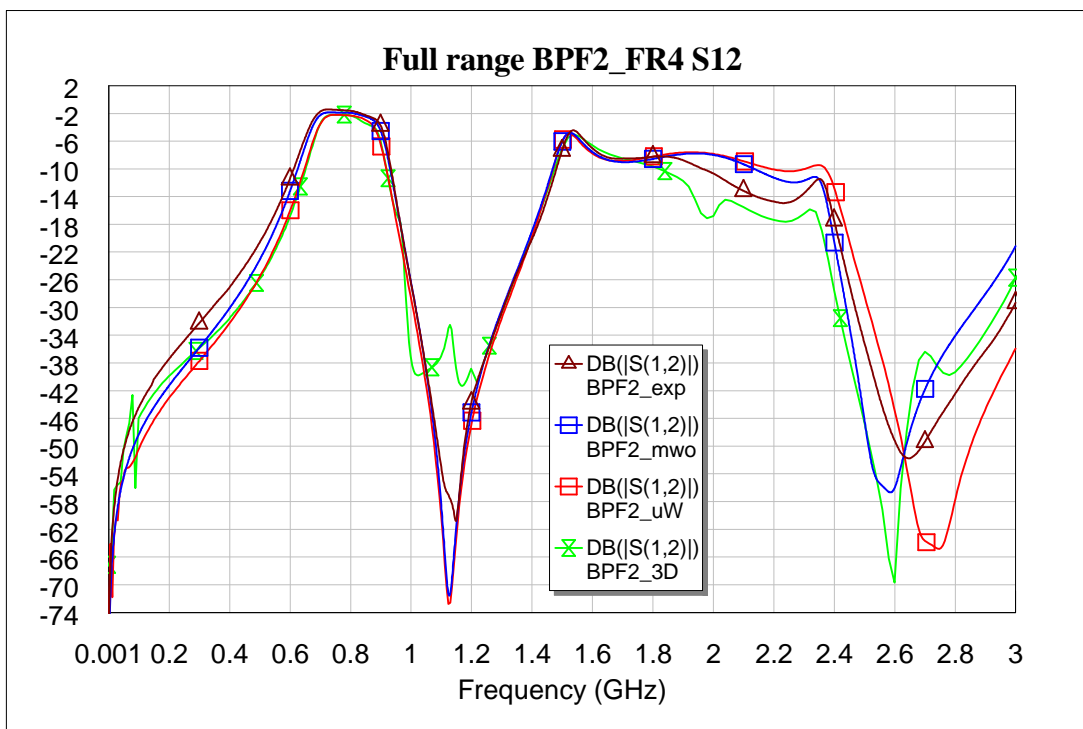
Слика 6.3.8. Параметар S_{21} у пропусном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_exp – мерења 2. авг 2011. BPF2_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF2_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.



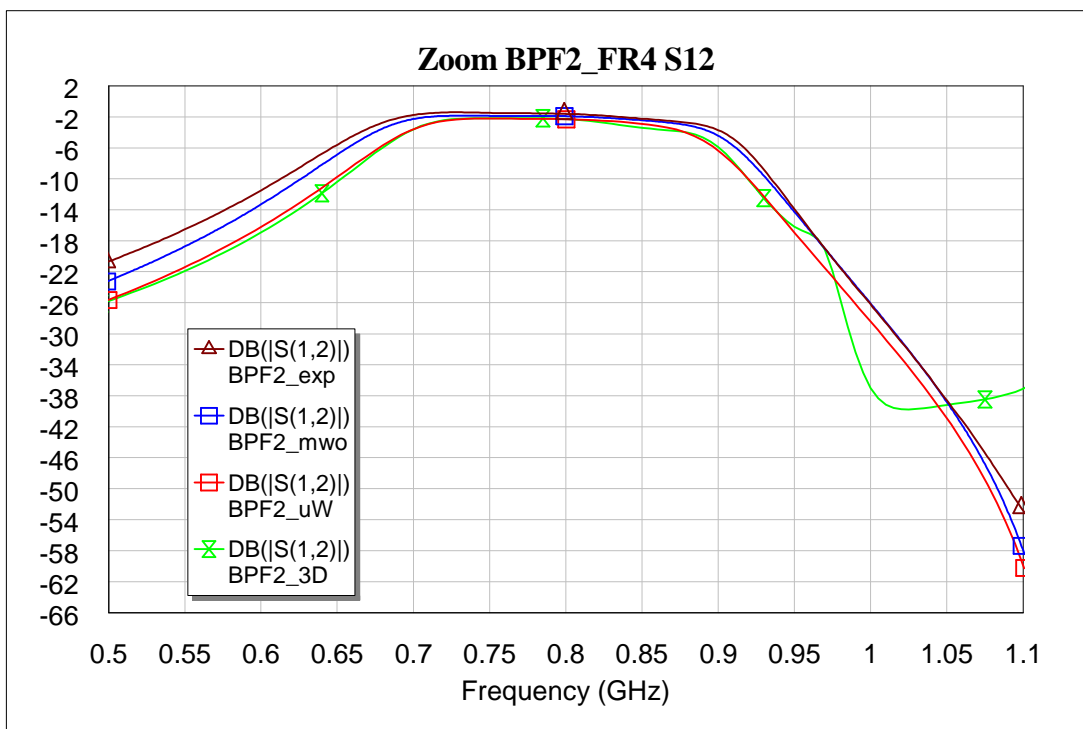
Слика 6.3.9. Параметар S_{22} у пуном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_exp – мерења 2. авг 2011. BPF2_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF2_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.



Слика 6.3.10. Параметар S_{22} у пропусном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_exp – мерења 2. авг 2011. BPF2_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF2_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.



Слика 6.3.11. Параметар S_{12} у пуном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_exp – мерења 2. авг 2011. BPF2_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF2_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.



Слика 6.3.12. Параметар S_{12} у пропусном опсегу учестаности за BPF2. BPF2_mwo – симулација Microwave Office, BPF2_exp – мерења 2. авг 2011. BPF2_uW – симулација WIPL-D Microwave Pro, BPF2_3D – симулација WIPL-D 3D EM Solver.

7. Закључак

Предмет овог рада представља пројектовање микроталасног филтра пропусника опсега са спрегнутим резонаторима у облику правоугаоника, у техници микротракастих водова. Циљ рада је прорачун димензија филтра, прављење симулационог модела, израда лабораторијског прототипа, мерење остварених фреквенцијских карактеристика и поређење симулационих и експерименталних резултата. Основни задатак је да се испита остварљивост оваквог филтра и могућност његове евентуалне примене у пракси.

Према задатој спецификацији направљени су симулациони модели филтра пропусника опсега са спрегнутим резонаторима у облику правоугаоника, у техници микротракастих водова. Израђена су два лабораторијска прототипа филтра на супстрату FR-4. Резултати мерења за оба прототипа упоређени су са резултатима симулација.

На основу експерименталних резултата, мерења фреквенцијских карактеристика лабораторијског прототипа, и резултата симулација филтра пропусника опсега, може се закључити да се експериментални и симулациони резултати слажу и да задовољавају спецификацију. Преносна функција филтра пропусника опсега је асиметрична у односу на централну учестаност филтра, селективнија ка вишим учестаностима.

По правилу филтри са полуталасним резонаторима имају нежељене пропусне опсеге (паразитне опсеге) који се јављају на $2f_c, 3f_c \dots [1]$. Централна фреквенција филтра пропусника опсега који је реализован износи $f_c = 800 \text{ MHz}$, па ће се паразитни опсези јавити на 1,6 GHz и 2,4 GHz, гледајући опсег у коме смо мерили. У случају да су резонатори квазиквадратни спрега се остварује на дужини која је приближно једнака осмини таласне дужине централне учестаности филтра. То је један од разлога појаве широког паразитног пропусног опсега. Разноврсним стратегијама у софтверу Microwave Office покушано је да се нежељени опсези још више потисну, што није било изводљиво. Решења изложена у овом раду представљају компромис задовољења спецификације са једне стране и потискивања паразитног пропусног опсега са друге стране.

Симулирани резултати у софтверу Microwave Office се веома добро поклапају са измереним резултатима за лабораторијски прототип филтра пропусника опсега. Имајући у виду да номинални параметри супстрата (које наводи произвођач) могу одступати од параметара конкретног супстрата од кога се прави лабораторијски прототип, одударење кривих је око 10%, што представља одличан резултат.

Симулација у софтверу WIPL-D Microwave Pro се исто показала веома добро, уз коришћење конструисаног 3D асиметричног спрежњака. Пре корекције дужине асиметричног спрежњака, резултати симулација добијених у овом софтверу су били померени ка нижим учестаностима, али скраћивањем дужине спрежњака тај проблем је решен.

Модел филтра у софтверу WIPL-D 3D EM Solver је комплексан. Симулације трају веома дуго, па се ради упрошћавања модела занемарила дебљина метализације, али и у том случају су резултати симулација задовољавајући.

Даља истраживања која отвара овај рад могу се одвијати у два правца. У једном правцу могу се испитивати реализације филтра на квалитетнијем супстрату нпр. тефлон и другачијој дебљини супстрата. У другом правцу потребно је детаљније проучити софтверску

компоненту асиметричног спрежњака. Такође било би од интереса да се реализације филтра са правоугаоним резонаторима упореде са другим реализацијама као што су филтар са укосницама, интердигитални или чешљасти филтар.

Литература

Стручна литература

- [1] В. Петровић, Д. Тошић, А. Ђорђевић, *Микроталасна пасивна кола*, електронско издање <http://www.etf.bg.ac.rs>, Електротехнички факултет, Београд, 2010.
- [2] А. Ђорђевић, Д. Тошић, *Микроталасна техника*, Академска мисао, Београд, 2006.
- [3] Jia-Sheng Hong, M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, John Wiley & Sons Inc, New York, 2001.
- [4] В. Kolundzija, А. Djordjevic, *Electromagnetic Modeling of Composite Metallic and Dielectric Structures*, Artech House, 2002.

Софтверски алати

- [5] Microwave Office v7.05, Applied Wave Research, <http://www.appwave.com/>, E. Grand Avenue Suite 430, El Segundo, CA 90245, USA, 2006.
- [6] WIPL-D Microwave Pro v2.2, WIPL-D d.o.o., <http://www.wipl-d.com/>, Гандијева 7/32, 11073 Београд, 2002.
- [7] WIPL-D 3D EM Solver v8, WIPL-D d.o.o., <http://www.wipl-d.com/>, Гандијева 7/32, 11073 Београд, 2002.
- [8] LINPAR for Win32 Platforms, v2, <http://mtt.etf.bg.ac.rs/software.htm>, Norwood, MA: Artech House, Inc., 1999.
- [9] Design Explorer 99 SE, v6.6.7, Protel International Limited, <http://www.altium.com/>, 3 Minna Close, Belrose NSW 2085, Sydney, Australia, 2000.
- [10] Microsoft Office Excel, Microsoft, <http://office.microsoft.com/>, One Microsoft Way Redmond, WA 98052-6399, USA, 2003.

Фирме за набавку делова и израду лабораторијског прототипа

- [11] Konelek d.o.o., <http://www.konelek.co.rs>, Цара Душана 35, Земун, телефон +381-11-2613-865.
- [12] ŽIBRET LAMINATI d.o.o., <http://www.zibret-laminati.si>, Brezje pri Grosupljem 1C, 1290 Grosuplje, Slovenia, телефон +386-1-781-03-80.
- [13] KELCO d.o.o., <http://www.kelco.rs>, Булевар Краља Александра 326, Београд, телефони +381-11-2403-376 и +381-11-2403-387.