

5 Filtros

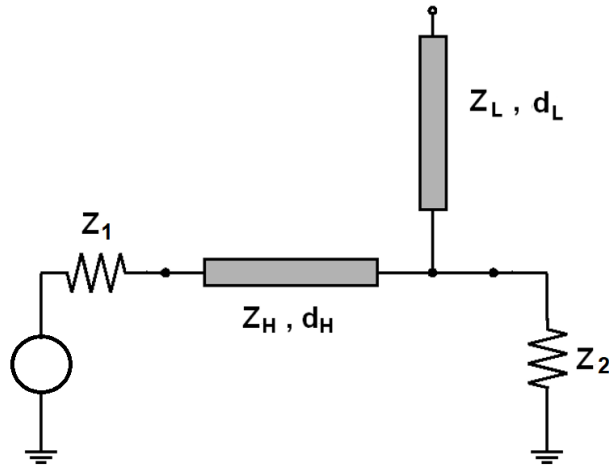
Aula 09 - Capítulo 5: slides 15 a 20

5.3 Exercício Resolvido

Projete um filtro passa-baixas usando elementos distribuídos (trechos de linhas de transmissão) na topologia em T com resposta do tipo Butterworth de segunda ordem e frequência de corte em 1 GHz, cujas portas devem operar com impedâncias características $Z_1 = Z_2 = Z_o = 50 \Omega$. Apresente os resultados da simulação para $|S_{11}|_{dB}$ e $|S_{21}|_{dB}$ em função da frequência. Use linhas de transmissão microstrip num substrato FR4 com constante dielétrica de 4,5 e espessuras do dielétrico e do condutor iguais a 0.8 mm e 18 μm , respectivamente.

- Passo 1: Filtro passa-baixas de segunda ordem em T com linhas de transmissão.

Como foi visto anteriormente (cap2), um indutor pode ser aproximado por um trecho de linha de transmissão terminado em curto-circuito e um capacitor, por um trecho terminado em circuito aberto. Logo o circuito com trechos de linhas de transmissão assume a forma abaixo.



Quanto menor for a impedância característica do trecho, mais ele se aproxima do comportamento do capacitor, e quanto maior for a impedância característico do trecho, mais ele se aproxima do comportamento do indutor.

Como os comportamentos não são idênticos em função da frequência, será escolhida a frequência de corte $f_c = 1 \text{ GHz}$ como referência.

- Passo 2: Projeto do trecho de linha com comportamento capacitivo.

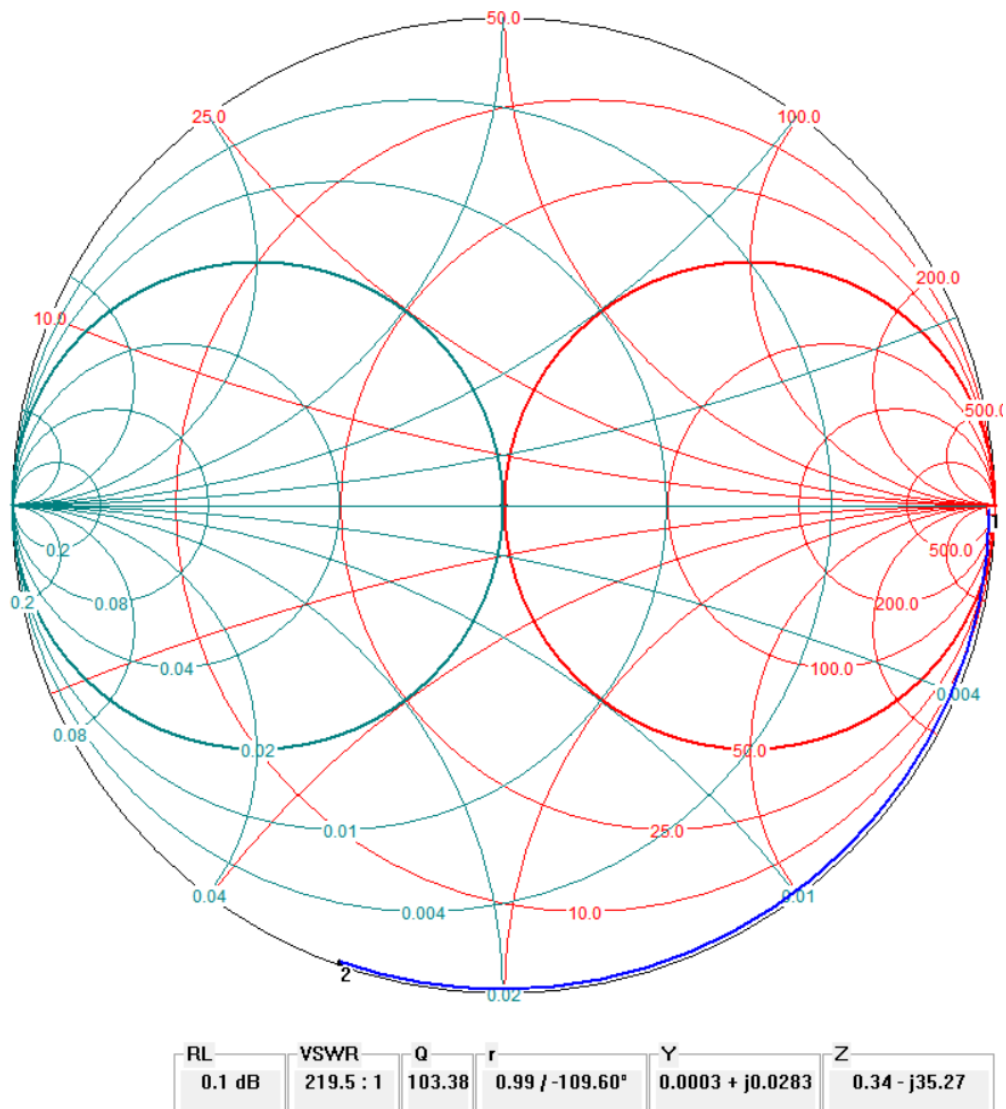
O projeto consiste em encontrar os valores da impedância característica Z_L (low) e do comprimento d_L .

O valor da impedância característica deve ser o menor possível o que implica na maior largura w viável. No substrato do enunciado, uma linha microstrip com impedância carcaterística $Z_o = 50 \Omega$ tem largura $w = 1.48 \text{ mm}$. Será arbitrado cerca do dobro, $w = 3 \text{ mm}$ e usando a calculadora de linha do software QUCS tem-se a figura abaixo.

Tipo de Linha de Transmissão		Parâmetros do Substrato		Parâmetros Físicos	
Linha Microstrip		Er	4.5 NA	W	3 mm
		Mur	1 NA	L	0 mm
		H	0.8 mm		0 NA
		H_t	10 mm		0 NA
		T	18 um	Analisar Sintetizar	
		Cond	4.1e+07 NA	Parâmetros Elétricos	
		Tand	0 NA	Z0	31.6301 Ohm
		Rough	0 mil	Ang_l	0 Deg
			0 NA		0 NA
		Parâmetros do Componente		Resultados Calculados	
		Freq	1 GHz	ErEff: 3.58512	
				Perdas no Condutor: 0 dB	
				Perdas no Dielétrico: 0 dB	
				Profundidade Skin: 2.48558 um	

Agora, usando Carta de Smith com uma carga em circuito aberto (admitância nula), descobre-se o comprimento

$d_L = 18,3 \text{ mm}$ ao se obter uma susceptância igual a $\bar{C}_2 = 0,0283 \text{ S}$ (resultado do exercício resolvido 5.1 da Aula 10), conforme indicado na figura pelo valor de Y .



- Passo 3: Projeto do trecho de linha com comportamento indutivo.

O projeto consiste em encontrar os valores da impedância característica Z_H (high) e do comprimento d_H .

O valor da impedância característica deve ser o maior possível o que implica na menor largura w viável. Será arbitrada uma largura viável do ponto de vista da fabricação, $w = 0,5 \text{ mm}$ e usando a calculadora de linha do software QUCS tem-se a figura abaixo.

Tipo de Linha de Transmissão

Linha Microstrip

Parâmetros do Substrato

Er: 4.5 NA

Mur: 1 NA

H: 0.8 mm

H_t: 10 mm

T: 18 um

Cond: 4.1e+07 NA

Tand: 0 NA

Rough: 0 mil

Parâmetros do Componente

Freq: 1 GHz

Parâmetros Físicos

W: 0.5 mm

L: 0 mm

0 NA

0 NA

Analisar Sintetizar

Parâmetros Elétricos

Z0: 85.4141 Ohm

Ang_l: 0 Deg

0 NA

Resultados Calculados

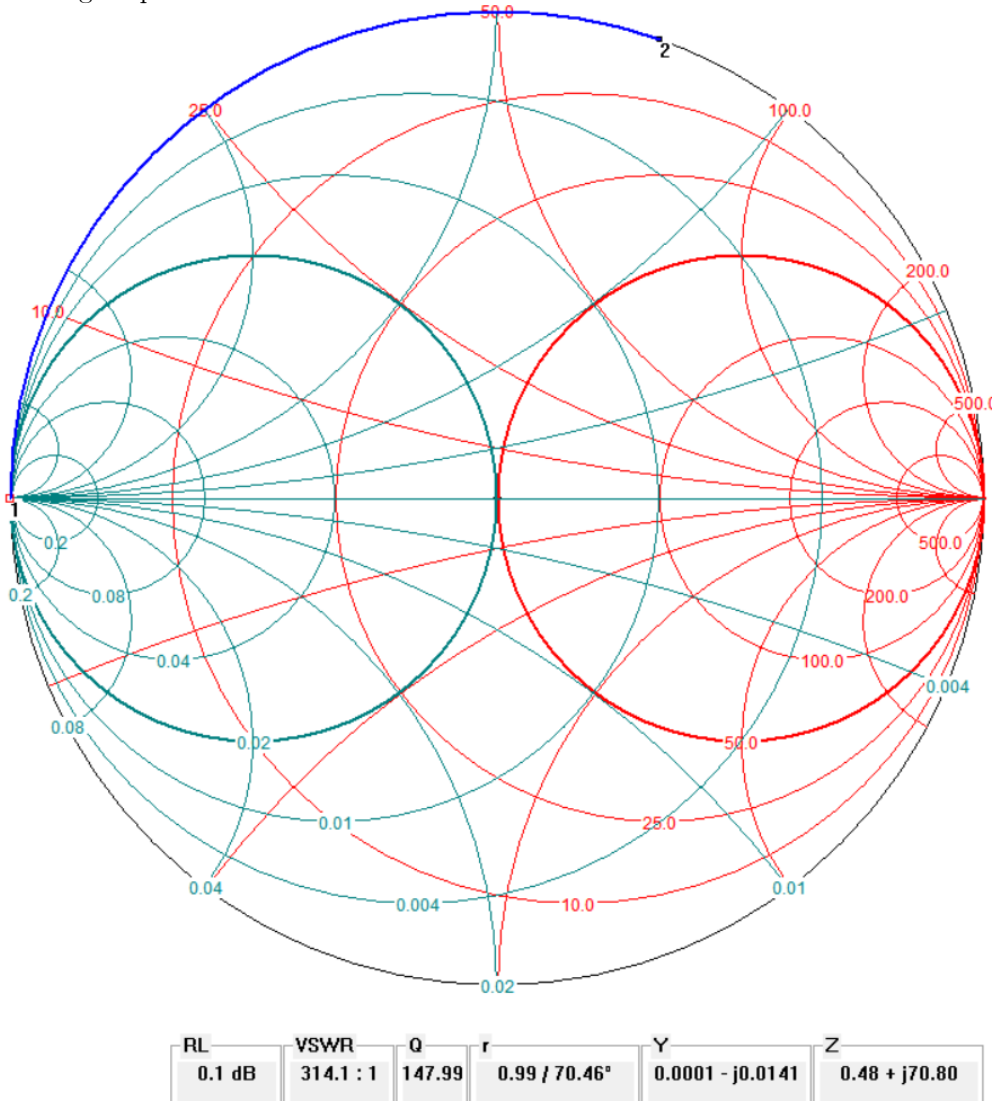
ErEff: 3.07014

Perdas no Condutor: 0 dB

Perdas no Dielétrico: 0 dB

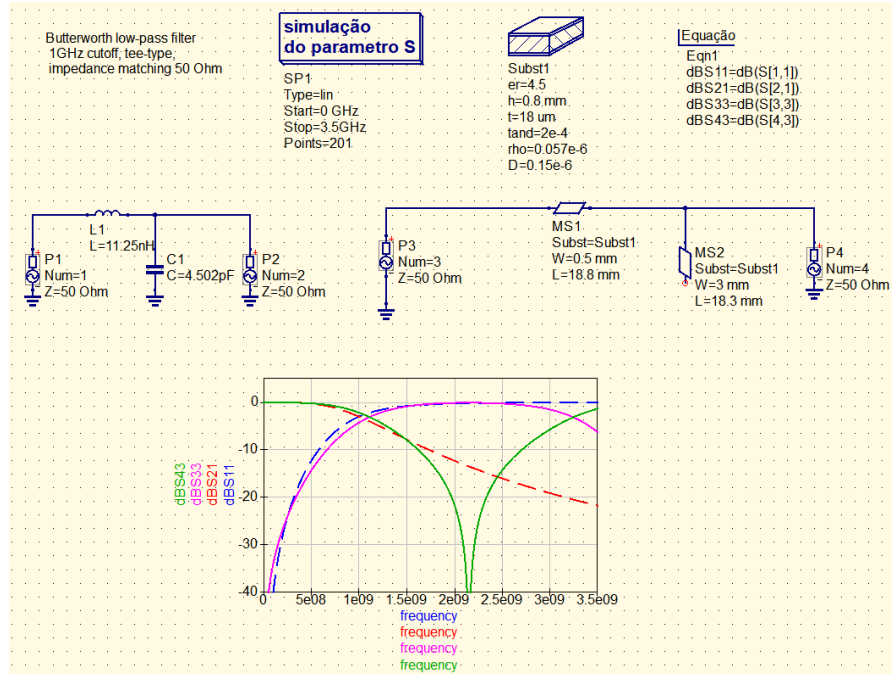
Profundidade Skin: 2.48558 um

Agora, usando Carta de Smith com uma carga em curto-circuito (impedância nula), descobre-se o comprimento $d_H = 18,7 \text{ mm}$ ao se obter uma reatância igual a $\bar{L}_2 = 70,7 \Omega$ (resultado do exercício resolvido 5.1 da Aula 10), conforme indicado na figura pelo valor de Z .



- Passo 4: Implementar no software QUCS e realizar a simulação.

O QUCS tem uma ferramenta de projeto de filtros que já fornece o setup para a simulação dos parâmetros de espalhamento do filtro projetado com os elementos concentrados. Para a simulação de $|S_{11}|_{dB}$ e $|S_{21}|_{dB}$ é necessário adicionar equações junto ao desenho esquemático que realizem estes cálculos a partir dos valores de S_{11} e S_{21} . A função matemática $dB(\cdot)$ equivale a $20 \cdot \log|\cdot|$. O circuito com os trechos de linha de transmissão foi adicionado contendo as fontes de potência 3 e 4 a fim de permitir a comparação dos resultados com os do circuito com elementos concentrados.



▷ Note que o trecho de linha com comportamento capacitivo apresenta um quarto de comprimento de onda em 2,15 GHz, isto significa que nessa frequência o trecho de linha é equivalente a um curto-circuito, daí o fato da transmissão anular-se completamente. A partir dessa frequência a linha passa a ter um comportamento indutivo e em 4,3 GHz é equivalente a um circuito aberto, ou seja o filtro não rejeita mais os sinais como no caso do filtro com elementos concentrados. Mesmo assim, um filtro com elementos concentrados reais também teria um comportamento diverso em altas frequências comparado com o filtro ideal. Ainda assim, o filtro com trechos de linha de transmissão tem utilidade na demodulação de sinais, pois pode ser projetado para rejeitar a frequência da onda portadora deixando passar apenas o sinal demodulado em baixa frequência.

5.4 Exercício Proposto

Projete um filtro passa-faixa (passa-banda) usando trechos de linhas de transmissão acopladas (cap2/sld26-30, cap5/sld19-20) com resposta do tipo Chebyshev de terceira ordem, 0,5 dB de ondulação e largura de faixa de 20% centrada em 2,4 GHz, cujas portas devem operar com impedâncias características $Z_1 = Z_2 = Z_o = 50 \Omega$. Apresente os resultados da simulação para $|S_{11}|_{dB}$ e $|S_{21}|_{dB}$ em função da frequência. Use linhas de transmissão microstrip num substrato FR4 com constante dielétrica de 4,5 e espessuras do dielétrico e do condutor iguais a 0,8 mm e 18 μm , respectivamente.

▷ Obs: Use a teoria de projeto de filtros passa-faixa calculando os coeficientes k_{nm} (cap5/sld15, no caso do filtro de terceira ordem é necessário calcular os valores extremos k_{01} e k_{34} e os valores intermediários k_{12} e k_{23}). As linhas de transmissão acopladas tem dois modos de propagação com seus respectivos valores de impedância característica e constante dielétrica efetiva (cap2/sld26-30). São eles: o modo comum ou par (even) com Z_{oe} e ϵ_{ree} e o modo diferencial ou ímpar (odd) com Z_{oo} e ϵ_{reo} . A calculadora de linha do QUCS contempla o caso de linhas microstrip acopladas cujo parâmetro geométrico adicional é o espaçamento s entre as duas linhas de igual largura w .