



Filter Design

จัดทำโดย

นายธรรมราช	งามอยู่	รหัสนักศึกษา	62070502431
นายปัญญากร	อธิกะ	รหัสนักศึกษา	62070502439
นางสาวพิมพ์นารา	เริงสำราญ	รหัสนักศึกษา	62070502478

เสนอ

ผศ.ดร. ธอริน อีร์เดชวานิชกุล

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของรายวิชา ENE450 Applied Communications and Transmission Lines

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปีการศึกษา 1/2564

Instruction:

- Design your filter using the “insertion loss” method discussed in class.
- Draw your “prototype” circuit AND the “transformation” circuit.
- Use MATLAB to plot the insertion loss (dB) versus freq (GHz) in linear scale of your final circuit.
- ALSO, plot another “zoom-in” version of the plot above to show the level of the ripples.
- Discuss your results.
- Conclusion

Problem 18: Design a Bandstop filter having a maximally flat response

- The order $N = 5$
- The center frequency of 5 GHz
- The fractional bandwidth is 16%
- The impedance is $R_s = 45$ ohms

Objectives (วัตถุประสงค์)

1. เพื่อศึกษาและออกแบบวงจร Bandstop filter แบบ maximally flat response
2. เพื่ออธิบายขั้นตอนการออกแบบของ Low-pass Prototype และการ Transform circuit เป็นวงจร Bandstop filter แบบ maximally flat response
3. เพื่อวิเคราะห์กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Insertion loss (dB) กับ Frequency (GHz) และ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Insertion loss (dB) กับ Frequency (dB)

Procedure (ขั้นตอนการทดลอง)

ทำการออกแบบวงจรทั้งหมด 2 แบบ คือ Shunt circuits และ Series circuits

1. Shunt Circuits

1.1 ออกแบบวงจร Shunt Circuits แบบ Low-pass Prototype

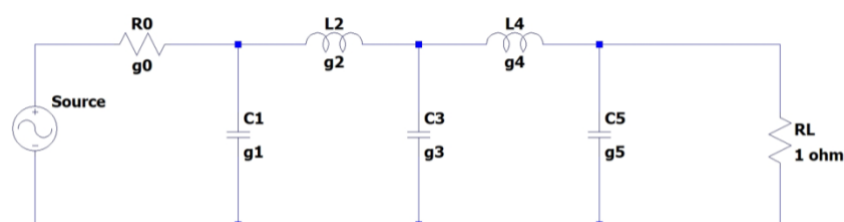


figure 1 Low Pass Prototype Shunt Circuits

1.2 จากหัวข้อการออกแบบของวงจรที่เลือกมานั้น มีค่า N เท่ากับ 5 นำค่าจากตารางมาใส่ใน Prototype

N	g ₁	g ₂	g ₃	g ₄	g ₅	g ₆	g ₇	g ₈	g ₉	g ₁₀	g ₁₁
1	2.0000	1.0000									
2	1.4142	1.4142	1.0000								
3	1.0000	2.0000	1.0000	1.0000							
4	0.7654	1.8478	1.8478	0.7654	1.0000						
5	0.6180	1.6180	2.0000	1.6180	0.6180	1.0000					
6	0.5176	1.4142	1.9318	1.9318	1.4142	0.5176	1.0000				
7	0.4450	1.2470	1.8019	2.0000	1.8019	1.2470	0.4450	1.0000			
8	0.3902	1.1111	1.6629	1.9615	1.9615	1.6629	1.1111	0.3902	1.0000		
9	0.3473	1.0000	1.5321	1.8794	2.0000	1.8794	1.5321	1.0000	0.3473	1.0000	
10	0.3129	0.9080	1.4142	1.7820	1.9754	1.9754	1.7820	1.4142	0.9080	0.3129	1.0000

figure 2 Element values for Maximally Flat Low Pass Filter prototypes

1.3 จากตารางข้างต้น ที่ N = 5 นำค่ามาใส่ในวงจรที่เราออกแบบจะได้ Low-pass Prototype เป็น

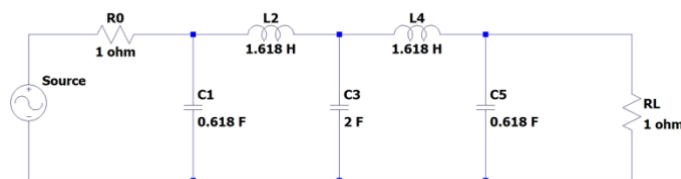


figure 3 maximally flat low-pass prototype filters of order N=5

1.4 ทำการ Transform Prototype ของตัววงจร Low-pass Prototype โดยใช้ตาราง Prototype elements ในการหาค่า components ต่าง ๆ









Prototype elements:	resistor	conductor	inductor	capacitor
	 g	 g	 g	 g
Bandstop filter	resistor  gR_S	conductor  $\frac{g}{R_S}$ $\frac{gR_S(\omega_2 - \omega_1)}{\omega_0^2}$	 $\frac{1}{gR_S(\omega_2 - \omega_1)}$	 $\frac{R_S}{g(\omega_2 - \omega_1)}$ $\frac{g(\omega_2 - \omega_1)}{R_S\omega_0^2}$

figure 4 Prototype Elements

1.5 จะได้วงจรหลังจากการ Transform ดังนี้

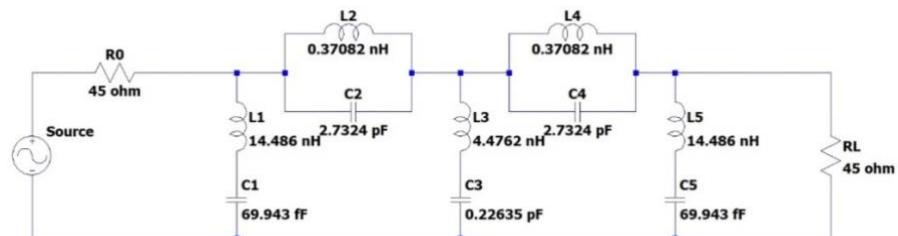


figure 5 Shunt circuits of Bandstop filter having a maximally flat response at order N = 5

กำหนดค่า center frequency = 5 GHz จะได้ค่า $\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi \times 5 \times 10^9 = 31.4159 \text{ GHz}$

fractional bandwidth = 0.16 (16%) จะได้ค่า $\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} = 0.16$ ดังนั้น $\omega_2 - \omega_1 = 5.0265 \text{ GHz}$

สามารถหาค่า component ต่าง ๆ ในวงจรได้โดยใช้สมการจาก figure 4 ดังนี้

Table 1 Component in figure 5

components	g				
	1	2	3	4	5
L	14.486 nH	0.37082 nH	4.4762 nH	0.37082 nH	14.486 nH
C	69.943 fF	2.7324 pF	0.22635 pF	2.7324 pF	69.943 fF

Table 2 R in figure 5

component	0	L
R	45 ohms	45 ohms

โดยใช้ MATLAB Code ดังนี้

```
% Example 8.3 in the textbook, maximally flat Bandpass filter
% EIE/ENE 450 Applied Communications and Transmission Lines
% Instructor: Watcharapan Suwansantisuk

clear all;
RS = 45; % source impedance (ohm)
f0 = 5e9; % center frequency (Hz)
w0 = 2*pi*f0; % center frequency (rad/sec)
fbw = 0.16; % fractional bandwidth = (w2- w1)/w0
g0 = 1;
g = [0.6180 1.6180 2.0000 1.6180 0.6180 1.0000]; % table of prototype elements
f = linspace(0,10*10^9,3000); % frequency to plot (Hz)

% transformation (the symbols here are the the symbols in the solution
% with prime signs)
diff = w0*fbw; % w2-w1

R0 = g0 * RS

L1 = RS / ( g(1) * diff )
C1 = g(1) * diff / ( RS * w0 ^ (2) )

L2 = g(2) * RS * diff / ( w0 ^ (2) )
C2 = 1 / ( g(2) * RS * diff )

L3 = RS / ( g(3) * diff )
C3 = g(3) * diff / ( RS * w0 ^ (2) )

L4 = g(4) * RS * diff / ( w0 ^ (2) )
C4 = 1 / ( g(4) * RS * diff )

L5 = RS / ( g(5) * diff )
C5 = g(5) * diff / ( RS * w0 ^ (2) )

RL = g(6)*RS

% find input impedance
w = 2*pi*f; % the angular frequency (rad/sec) to plot

% input impedance looking into C5
Zin5 = parallel( ( j * w * L5 ) + ( 1 ./ ( j * w * C5 ) ) , RL );

% input impedance looking into C4
Zin4 = parallel( j * w * L4 , 1 ./ ( j * w * C4 ) ) + Zin5 ;

% input impedance looking into C3
Zin3 = parallel( ( j * w * L3 ) + ( 1 ./ ( j * w * C3 ) ) , Zin4 );

% input impedance looking into C2
Zin2 = parallel( j * w * L2 , 1 ./ ( j * w * C2 ) ) + Zin3 ;

% input impedance
Zin = parallel( ( j * w * L1 ) + ( 1 ./ ( j * w * C1 ) ) , Zin2 );

% alternative code for P_LR:
% Gam = (zin-RS)/(zin+RS); % reflection coefficient
% P_LR = 1 ./ ( 1 - abs(Gam).^2 ); % power loss ratio
P_LR = abs( Zin + RS ).^2 ./ ( 2 * RS * ( conj( Zin ) + Zin ) ); % power loss ratio
IL = 10 * log10( P_LR ); % insertion loss

subplot(2,1,2);
semilogx(f/10^9, IL, 'Linewidth', 2);
xlabel('frequency (dB)');
ylabel('Attenuation, i.e., IL (dB)');
title('Frequency response (dB) of a maximally flat Bandstop filter (N=5)');
grid on;

subplot(2,1,1);
plot(f/10^9, IL, 'Linewidth', 2);
xlabel('frequency (Hz)');
ylabel('Attenuation, i.e., IL (dB)');
title('Frequency response (Hz) of a maximally flat Bandstop filter (N=5)');
grid on;

% return the equivalent impedance of two impedances in parallel
% Input:
% Z1, Z2 - two vectors of the same size
% Output:
% Z - a vector the same size as Z1, where
% Z(i,j) = the parallel impedance of Z1(i,j) and Z2(i,j)
function Z = parallel(Z1, Z2)
Z = Z1 .* Z2 ./ (Z1+Z2);
end
```

2. Series Circuits

2.1 ออกแบบวงจร Series Circuits แบบ Low-pass Prototype

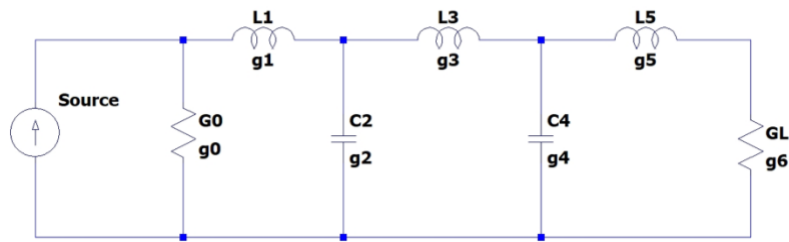


figure 6 Low-pass prototype series circuits

2.2 จากหัวข้อการออกแบบของวงจรที่เลือกมา มีค่า N เท่ากับ 5 นำค่าจากในตารางมาใส่ใน Prototype

N	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}	g_{11}
1	2.0000	1.0000									
2	1.4142	1.4142	1.0000								
3	1.0000	2.0000	1.0000	1.0000							
4	0.7654	1.8478	1.8478	0.7654	1.0000						
5	0.6180	1.6180	2.0000	1.6180	0.6180	1.0000					
6	0.5176	1.4142	1.9318	1.9318	1.4142	0.5176	1.0000				
7	0.4450	1.2470	1.8019	2.0000	1.8019	1.2470	0.4450	1.0000			
8	0.3902	1.1111	1.6629	1.9615	1.9615	1.6629	1.1111	0.3902	1.0000		
9	0.3473	1.0000	1.5321	1.8794	2.0000	1.8794	1.5321	1.0000	0.3473	1.0000	
10	0.3129	0.9080	1.4142	1.7820	1.9754	1.9754	1.7820	1.4142	0.9080	0.3129	1.0000

Figure 7 Element values for Maximally Flat Low Pass Filter prototypes

2.3 จากตารางข้างต้น ที่ $N = 5$ นำค่ามาใส่ในวงจรที่เราออกแบบจะได้ Low-pass Prototype เป็น

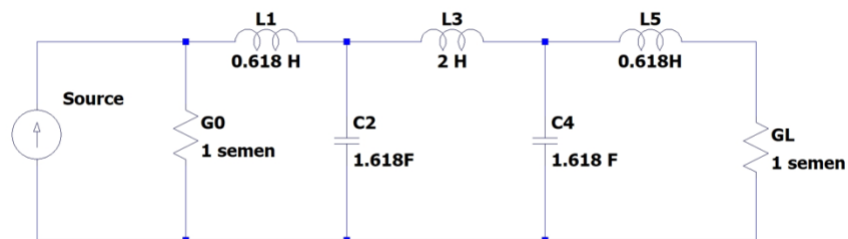


figure 8 maximally flat low-pass prototype filters of order $N=5$

2.4 ทำการ Transform Prototype ของตัววงจร Low-pass Prototype โดยใช้ตาราง Prototype elements ในการหาค่า components ต่าง ๆ









Prototype elements:	resistor  g	conductor  g	inductor  g	capacitor  g
Bandstop filter	resistor  gR_S	conductor  $\frac{g}{R_S}$	$\frac{gR_S(\omega_2 - \omega_1)}{\omega_0^2}$  $\frac{1}{gR_S(\omega_2 - \omega_1)}$	$\frac{R_S}{g(\omega_2 - \omega_1)}$  $\frac{g(\omega_2 - \omega_1)}{R_S\omega_0^2}$

figure 9 Prototype Elements

2.5 จะได้วงจรหลังจากการ Transform ดังนี้

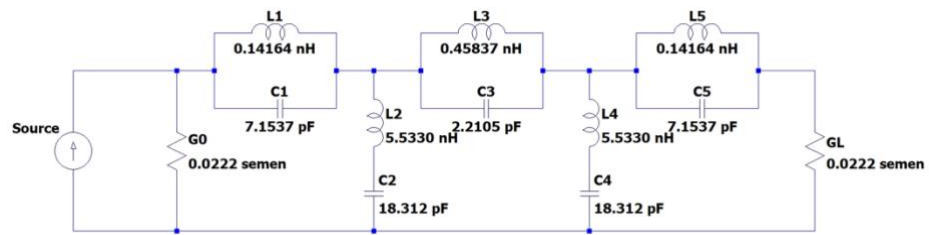


figure 10 Series circuits of Bandstop filter having a maximally flat response

กำหนดค่า center frequency = 5 GHz จะได้ค่า $\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi \times 5 \times 10^9 = 31.4159 \text{ GHz}$

fractional bandwidth = 0.16 (16%) จะได้ค่า $\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} = 0.16$ ดังนั้น $\omega_2 - \omega_1 = 5.0265 \text{ GHz}$

สามารถหาค่า component ต่าง ๆ ในวงจรได้โดยใช้สมการจาก figure 9 ดังนี้

Table 3 Component in figure 10

components	g				
	1	2	3	4	5
L	0.14164 nH	5.5330 nH	0.45873 nH	5.5330 nH	0.14164 nH
C	7.1537 pF	18.312 pF	2.2105 pF	18.312 pF	7.1537 pF

Table 4 G in figure 10

component	O	L
G	0.0222 semen	0.0222 semen

โดยใช้ MATLAB Code ดังนี้

```
% Example 8.3 in the textbook, maximally flat low-pass filter
% EIE/ENE 450 Applied Communications and Transmission Lines
% Instructor: Watcharapan Suwansantisuk

clear all;
RS = 45; % source impedance (ohm)
f0 = 5e9; % center frequency (Hz)
w0 = 2*pi*f0; % center frequency (rad/sec)
fbw = 0.16; % fractional bandwidth = (w2- w1)/w0
g0 = 1;
g = [0.6180 1.6180 2.0000 1.6180 0.6180 1.0000]; % table of prototype elements
f = linspace(0,10*10^9,3000); % frequency to plot (Hz)

% transformation (the symbols here are the the symbols in the solution
% with prime signs)
diff = w0*fbw; % w2-w1

R0 = g0 / RS

L1 = g(1) * RS * diff / ( w0 ^ (2) )
C1 = 1 / ( g(1) * RS * diff )

L2 = RS / ( g(2) * diff )
C2 = g(2) * diff / ( RS * w0 ^ (2) )

L3 = g(3) * RS * diff / ( w0 ^ (2) )
C3 = 1 / ( g(3) * RS * diff )

L4 = RS / ( g(4) * diff )
C4 = g(4) * diff / ( RS * w0 ^ (2) )

L5 = g(5) * RS * diff / ( w0 ^ (2) )
C5 = 1 / ( g(5) * RS * diff )

GL = g(6)/ RS
RL = 1 / GL

% find input impedance
w = 2*pi*f; % the angular frequency (rad/sec) to plot

% input impedance looking into C5
Zin5 = parallel( j * w * L5 , 1 ./ ( j * w * C5 ) ) + RL ;

% input impedance looking into C4
Zin4 = parallel( ( j * w * L4 ) + ( 1 ./ ( j * w * C4 ) ) , Zin5 );

% input impedance looking into C2
Zin3 = parallel( j * w * L3 , 1 ./ ( j * w * C3 ) ) + Zin4 ;

% input impedance looking into C3
Zin2 = parallel( ( j * w * L2 ) + ( 1 ./ ( j * w * C2 ) ) , Zin3 );

% input impedance
Zin = parallel( j * w * L1 , 1 ./ ( j * w * C1 ) ) + Zin2 ;

% alternative code for P_LR:
% Gam = (zin-RS)/(zin+RS); % reflection coefficient
% P_LR = 1 ./ ( 1 - abs(Gam).^2 ); % power loss ratio
P_LR = abs( Zin + RS ).^2 ./ ( 2 * RS * ( conj( Zin ) + Zin ) ); % power loss ratio
IL = 10 * log10( P_LR ); % insertion loss
%fdB = 10*log10( f/1e9 ) ;

subplot (2,1,2);
semilogx(f/10^9, IL, 'Linewidth', 2);
xlabel('frequency (dB)');
ylabel('Attenuation, i.e., IL (dB)');
title('Frequency response (dB) of a maximally flat Bandstop filter (N=5)');
grid on;

subplot (2,1,1);
plot(f/10^9, IL, 'Linewidth', 2);
xlabel('frequency (Hz)');
ylabel('Attenuation, i.e., IL (dB)');
title('Frequency response (Hz) of a maximally flat Bandstop filter (N=5)');
grid on;

% return the equivalent impedance of two impedances in parallel
% Input:
% Z1, Z2 - two vectors of the same size
% Output:
% Z - a vector the same size as Z1, where
% Z(i,j) = the parallel impedanec of Z1(i,j) and Z2(i,j)
function Z = parallel(Z1, Z2)
    Z = Z1 .* Z2 ./ (Z1+Z2);
end
```

Result (ผลการการทดลอง)

1. Shunt Circuits

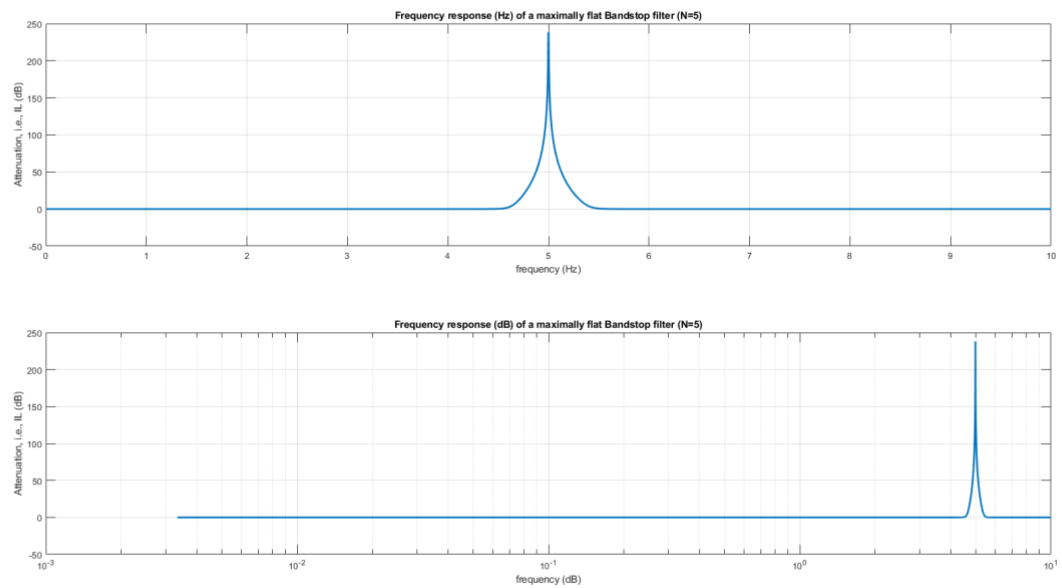


figure 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Attenuation กับ Frequency ของ Shunt circuit

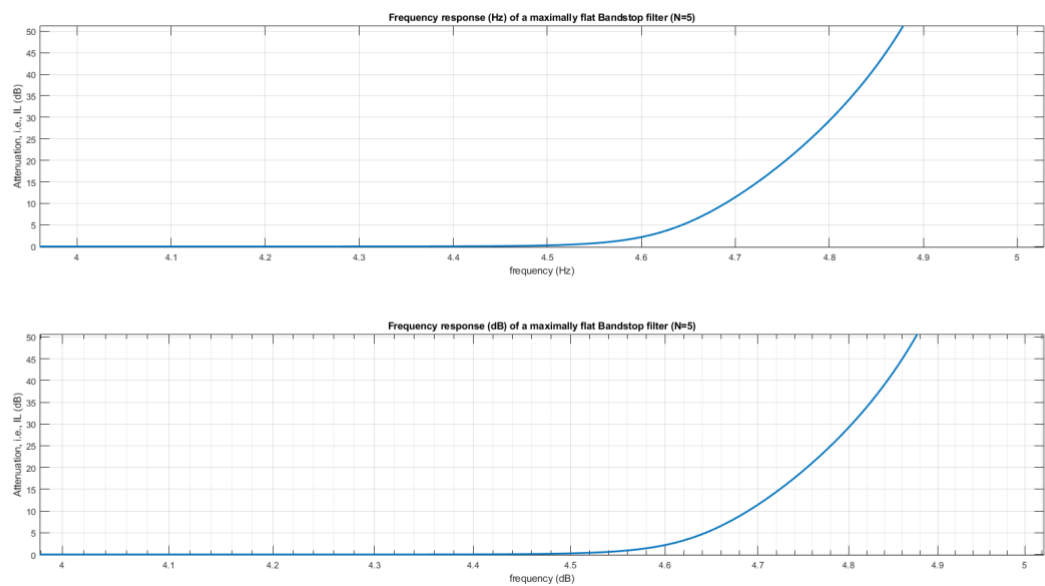


figure 12 Zoom in กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Attenuation กับ Frequency ของ Shunt circuit

2. Series Circuit

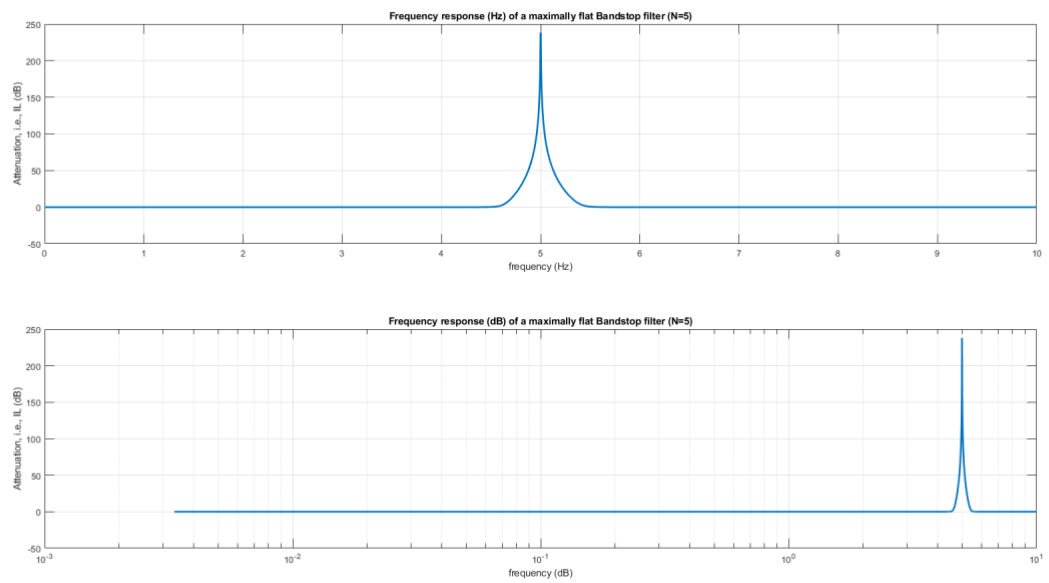


figure 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Attenuation กับ Frequency ของ Series circuit

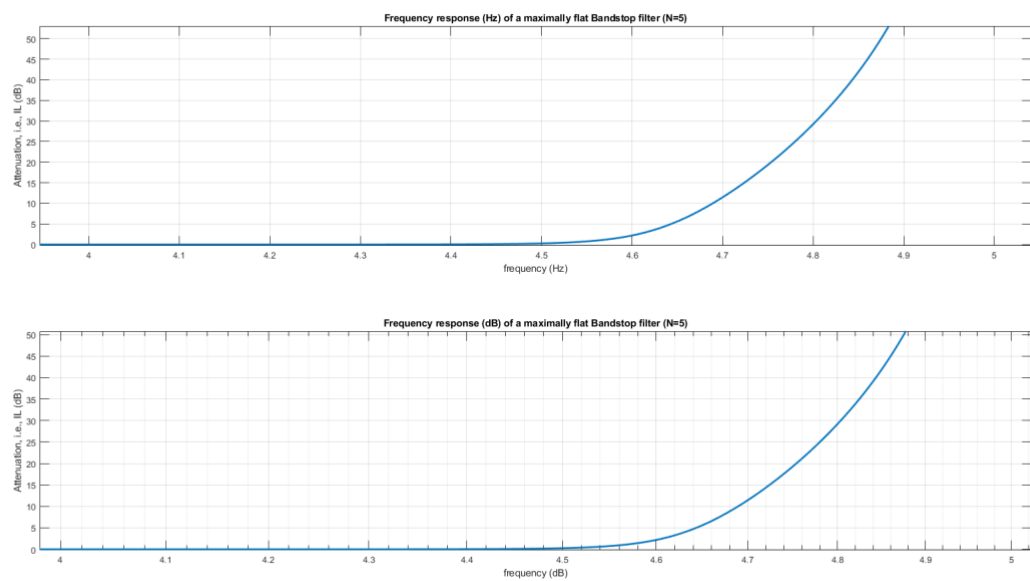


figure 14 Zoom in กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Attenuation กับ Frequency ของ Series circuit

Discussions (วิจารณ์ผลการทดลอง)

จากผลการทดลอง Filter design เริ่มต้นได้รับค่า Order N เท่ากับ 5 นำไปเทียบกับค่า g ใน figure 2 หรือ 7 เพื่อทำการออกแบบวงจร Low-pass Prototype ของวงจร Bandstop Filter ทั้งแบบ Shunt circuits และ Series circuits โดยในส่วนของการทดลองแบบ Shunt circuits พบว่ามีค่า Intersection loss (dB) หรือค่า Attenuation ที่ความถี่ 5 GHz มีค่าประมาณ 238 dB ถัดมาที่ส่วนของการทดลองแบบ Series circuits พบว่ามีค่า Intersection loss (dB) หรือค่า Attenuation (dB) ที่ความถี่ 5 GHz มีค่าประมาณ 238 dB เช่นกัน จะเห็นว่ายิ่งค่า N มีค่ามากเท่าไร ก็จะส่งผลให้ค่า Attenuation มีค่ามากขึ้นเท่านั้น และยิ่งมีความใกล้เคียงความเป็นอุดมคติมากขึ้นอีกด้วย ดังนั้นจากการทดลองที่ใช้ค่า N เท่ากับ 5 จะเห็นว่ากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Intersection loss (dB) กับ Frequency (GHz) นั้นมีความใกล้เคียงความเป็นอุดมคติในระดับหนึ่ง และเมื่อทำการ zoom in ลงไปยังบริเวณที่ค่า Attenuation (dB) ในกราฟเริ่มเปลี่ยนแปลง จะไม่ปรากฏ Ripple ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของ maximally flat response

Conclusions (สรุปผลการทดลอง)

จากผลการทดลอง Filter design เพื่อออกแบบ Bandstop filter having a maximally flat response และศึกษาขั้นตอนการออกแบบ Low-pass Prototype รวมถึงการ Transform circuit เพื่อสังเกตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Intersection loss (dB) กับ Frequency (GHz) และ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Intersection loss (dB) กับ Frequency (dB) เริ่มต้นจะใช้ค่า Order N เท่ากับ 5 นำไปเทียบกับค่า g ใน figure 2 หรือ 7 เพื่อเป็นการออกแบบวงจร Low-pass Prototype ทั้งแบบ Shunt circuits และ Series circuits เมื่อเราออกแบบวงจร Low-pass Prototype เสร็จก็จะทำการ Transform circuit ให้ได้เป็น Bandstop filter โดยค่า components ต่าง ๆ ในวงจรสามารถหาค่าได้ตามสมการใน figure 4 หรือ 9 กำหนดใช้ค่า center frequency เท่ากับ 5 GHz, ค่า fractional bandwidth เท่ากับ 16% และค่า impedance R_s เท่ากับ 45Ω โดยทำการทดลองผ่านโปรแกรม MATLAB simulation จากการทดลองพบว่าในช่วงของ center frequency จะมีค่า Insertion loss ที่สูงที่สุด ทำให้สัญญาณไม่สามารถผ่านไปได้ในช่วงนี้ ซึ่งเป็นช่วง stop band ที่ความถี่ฝั่งรอบข้างของ center frequency จะเป็นช่วงที่สัญญาณผ่านไปได้ ซึ่งเป็นช่วง pass band และเมื่อทำการ zoom in ลงไปยังบริเวณที่ค่า Attenuation ในกราฟเริ่มเปลี่ยนแปลงนั้น จะไม่ปรากฏ Ripple ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของ maximally flat response