

工學碩士 學位論文

링 공진기를 사용한 대역통과 필터의
설계에 관한 연구

*A Study on Design of Band Pass Filter Using
Ring Resonators*

指導教授 金 東 一

2004年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電波工學科 金 保 永

工學碩士 學位論文

링 공진기를 사용한 대역통과 필터의
설계에 관한 연구

*A Study on Design of Band Pass Filter Using
Ring Resonators*

指導教授 金 東 一

2004年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電波工學科 金 保 永

목 차

Nomenclature	ii
Abstract	iii
제 1 장 서 론	
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구내용	2
제 2 장 종래 Ring Filter의 해석	
2.1 종래 Ring Filter의 수식 이론	3
2.2 종래 Ring Filter의 주파수 특성	7
제 3 장 본 연구에서 제안한 Ring Filter의 해석	
3.1 본 연구에서 제안한 Ring Filter의 수식이론	9
3.2 3단 Ring Filter의 회로해석	14
제 4 장 최적 설계 및 계산 결과	
4.1 Powell's LSM을 이용한 최적설계	17
4.2 최적 파라미터를 이용한 계산 결과	18
제 5 장 링 공진기를 사용한 대역통과필터의 제작 및 측정	
제 6 장 결 론	
참고 문헌	25
부록 Powell's LSM program	26

Nomenclature

f	: 주파수(Frequency)
f_0	: 중심 주파수(center frequency)
f_m	: 정규화 주파수(normalized frequency)
λ	: 파장(Wavelength)
$S_{ij}(i=j)$: 반사계수(Reflection Coefficient)
$S_{ij}(i \neq j)$: 투과계수(Transmission Coefficient)
Z	: 선로의 임피던스(External Line of Impedance)
Z_{in}^e	: 우모드 여진(Even-mode Excitation)시의 입력임피던스
Z_{in}^o	: 기모드 여진(Odd-mode Excitation)시의 입력임피던스
Z_0	: 선로의 특성임피던스(External Line of Characteristic Impedance)
Γ_e	: Reflection coefficients for the even-mode excitation
Γ_o	: Reflection coefficients for the odd-mode excitation
$[S]$: Scattering matrix
$[A]$: ABCD matrix
$[T]$: Transfer matrix

Abstract

With the development of electronics, information, and communication industries, the radio communication systems accomplished fast growth and the quality of human life is improving rapidly under benefit of various informations.

Filter is one of the elements indispensable for microwave /millimeterwave system. Various kinds of filters have been studied and developed. The filter with better characteristics is needed for qualitative elevation of microwave system. In this work, in order to realize a band pass filter with wide-band characteristics for mobile communications, 2 GHz band pass filter was designed using ring resonator with stub. The three stage wide-band BPF was designed and fabricated. For broadband design, the ring circumference was divided by 4 sections with $1/8$ wavelength and 2 sections with $1/4$ wavelength which have different line impedances. The characteristics of the proposed BPF were highly improved by using three stage ring resonator. The characteristic impedance values of each sections were obtained by Powell's least square algorithm where differentiations are not needed. The measured results showed a good agreement with the theoretical results as well as ADS simulation.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

전기전자 산업이 발전함에 따라 무선통신 시스템을 이용한 정보통신기술 및 통신 산업이 급속한 성장을 이루고 있으며, 다양한 정보의 혜택아래 삶의 질은 급속도로 개선되고 있다. 최근 정보화 사회의 급격한 발달은 통신수단의 급격한 발전을 가져왔다. 고정된 장소에서의 통화로부터 자동차, 기차, 항공기, 선박 등의 이동 수단에서의 통화, 보행 중의 통신 및 위성통신까지 사용될 수 있는 통신시스템으로 발전하고 있다. 따라서 수요자의 급증에 따라 마이크로파, 밀리미터파 통신에서는 사용주파수 대역의 광대역화에 대한 연구가 필수 불가결하다[1].

무선통신 시스템을 구성하는 소자 중 필터(Filter)는 필수적인 소자이며 이에 따라 다양한 종류의 필터가 연구, 개발되고 있으며 무선통신 시스템의 질적 향상을 위해서 특성이 보다 좋은 필터의 연구가 필요할 것이다. 필터는 RF 시스템 전반에 걸쳐 가장 많이 사용되는 회로 중 하나로 수동회로는 물론 능동회로, 시스템에 걸쳐서 단품, 부속품, 매칭회로 등 Filtering 개념이 필요하지 않은 곳은 없으며, 매우 다양한 종류와 형태로 구현되고 있다. 특정 대역의 주파수 성분만을 골라내기 위한 회로 또는 구조물, 회로적으로는 L과 C의 조합으로 구성이 가능하며, 분류기준에 따라 다양한 종류의 필터가 존재한다. 본 논문에서는 보다 작은 크기의 필터를 제작하기 위하여 링 공진기를 사용하여 링 형태로 BPF(Band Pass Filter)를 제작하였으며 $\lambda/8$ 선로를 기본으로 선로의 폭을 달리하여 특성을 개선하였다.

1.2 연구내용

필터는 특정 대역의 주파수 성분만을 골라내기 위한 회로 또는 구조물로서 회로적으로는 L과 C의 조합으로 구성이 가능하며, 대역 혹은 통과대역 파형 혹은 구현방법 등의 분류기준에 따라 다양한 종류의 필터가 존재한다.

본 논문에서는 대역분류에 따라 특정 대역의 주파수 성분만을 골라내는 BPF(Band Pass Filter)에 관하여 연구하였으며, 이동 통신 시스템에 사용할 수 있는 대역 통과 필터를 얻기 위해서, 스테르브를 부가한 링 공진기로 2 GHz 대역 필터를 종래의 $\lambda/4$ 선로를 기본으로 하는 설계법에서 탈피하여 $\lambda/8$ 선로를 기본으로 설계하였다. 3단 광대역 BPF(Band Pass Filter)는 스테르브를 부가한 링 공진기를 이용하여 설계되었으며, 연속적인 3단 링 공진기를 사용함으로써 원하는 기본 통과 대역의 특성을 향상시켰다. 또한 각각의 $\lambda/8$ 선로의 특성 임피던스 값을 다르게 함으로서 특성을 개선시켰으며, 회로 구성요소의 특성 임피던스 값은 보다 정확하고 좋은 특성을 얻을 수 있는 특성 임피던스 값을 얻기 위하여 Powell의 미분을 필요로 하지 않는 최소자승법에 의해 구함으로써 최적 설계하였다. Powell의 최소자승법을 사용한 계산결과와 정확도를 보기 위하여 시뮬레이션 툴인 ADS(Advanced Design System)를 사용하여 비교하였다.

본 논문은 $\lambda/8$ 선로를 기본으로 특성임피던스가 다른 각각의 선로들을 이용하여 제작 설계하고, 최적 설계법을 제안한 링 공진기용 필터에 관한 논문이다.

제 2 장 종래 Ring Filter의 해석

2.1 종래 Ring Filter의 수식 이론

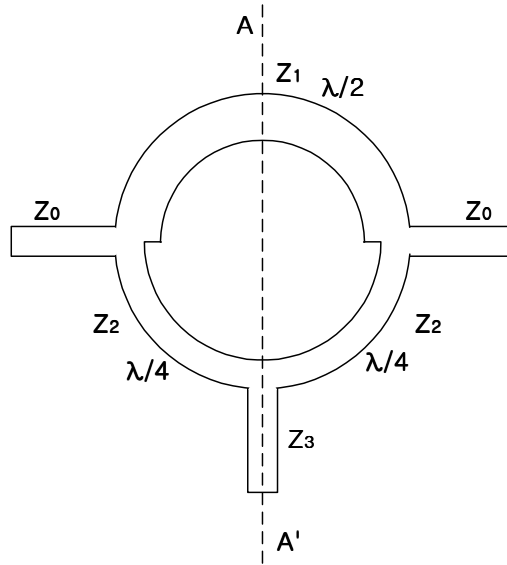


그림 2.1 종래의 링 필터
Fig. 2.1 Conventional ring filter.

그림 2.1은 종래의 링 필터 회로도이며, AA'축을 중심으로 구조적으로 1축 대칭이며, 가역적인 소자이다. Port 1이 입력(Input), Port 2는 출력(Output)포트이다. 그림에서와 같이 $\lambda/4$ 선로를 기본으로 하고 있으며, Z_3 는 스테브이다. 그림 2.1의 링 필터를 even, odd-mode법을 사용하여 다음의 그림 2.2와 그림 2.3에서와 같이 등가회로로 나타내어 해석할 수 있다.

(1) Even-mode 해석

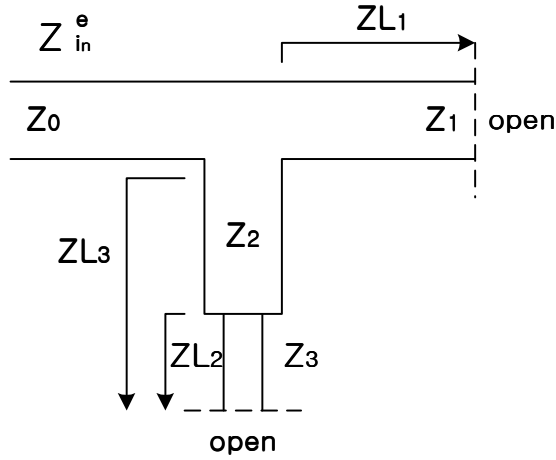


그림 2.2 Even 모드 등가회로
Fig. 2.2 Even-mode equivalent.

$$f_n = \frac{f}{f_0} \quad (2-1)$$

식 (2-1)에서 f_n 은 정규화 된 주파수(normalized frequency)이며 f_0 는 중심 주파수(center frequency)이다.

먼저 even-mode인 경우로, even-mode의 입력임피던스 Z_{in}^e 를 구하기 위해 ZL_1 을 먼저 구하고 차례대로 ZL_2 , ZL_3 를 구할 수 있다. 식은 다음과 같다.

$$ZL_1 = Z_1 / j \tan\left(\frac{\pi}{2} f_n\right) \quad (2-2)$$

$$ZL_2 = 2Z_3 / j \tan\left(\frac{\pi}{2} f_n\right) \quad (2-3)$$

$$ZL_3 = Z_2 \frac{ZL_2 + jZ_2 \tan\left(\frac{\pi}{2} f_n\right)}{Z_2 + jZL_2 \tan\left(\frac{\pi}{2} f_n\right)} \quad (2-4)$$

$$Z_{in}^e = \frac{ZL_1 \cdot ZL_3}{ZL_1 + ZL_3} \quad (2-5)$$

$$\Gamma_e = \frac{Z_{in}^e - Z_0}{Z_{in}^e + Z_0} \quad (2-6)$$

(2) Odd-mode 해석

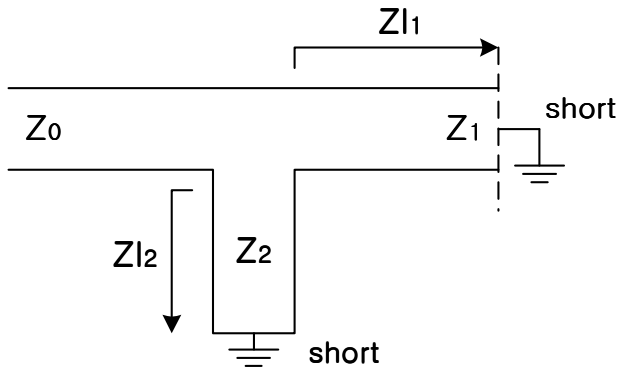


그림 2.3 Odd 모드 등가회로
Fig. 2.3 Odd-mode equivalent.

다음으로 odd-mode의 입력임피던스 Z_{in}^o 를 구하기 위해 Z_{l1} 과 Z_{l2} 를 구할 수 있다. 식은 다음과 같다.

$$Z_{l1} = jZ_1 \tan\left(\frac{\pi}{2} f_n\right) \quad (2-7)$$

$$Z_{l2} = jZ_2 \tan\left(\frac{\pi}{2} f_n\right) \quad (2-8)$$

$$Z_{in}^o = \frac{Zl_1 \cdot Zl_2}{Zl_1 + Zl_2} \quad (2-9)$$

$$\Gamma_o = \frac{Z_{in}^o - Z_0}{Z_{in}^o + Z_0} \quad (2-10)$$

odd-mode의 입력임피던스를 이용하여 위의 식과 같이 odd-mode의 반사계수를 구할 수 있다. 식 (2-6)과 식 (2-10)의 반사계수를 사용하여 다음과 같이 S-parameter를 구할 수 있다.

(3) S-parameter 계산

$$S_{11} = \frac{\Gamma_e + \Gamma_o}{2} \quad (2-11)$$

$$S_{21} = \frac{\Gamma_e - \Gamma_o}{2} \quad (2-12)$$

$$S_{11, dB} = 20 \log_{10} |S_{11}| \quad (2-13)$$

$$S_{21, dB} = 20 \log_{10} |S_{21}| \quad (2-14)$$

2.2 종래 Ring Filter의 주파수 특성

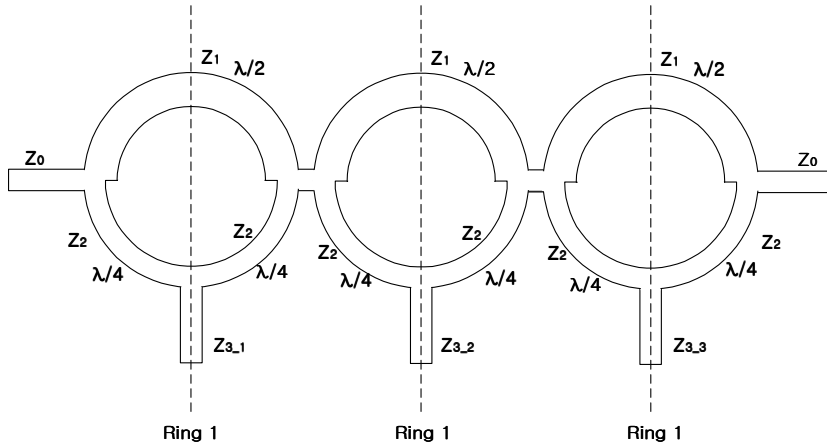


그림 2.4 종래의 3단 링 필터
Fig. 2.4 Conventional 3-stage ring filter.

그림 2.4는 2.1절에서 설명한 1단 링 필터를 기본으로 한 종래의 3단 링 필터의 회로도이다. 본 논문에서 제작한 3단 링 필터와 종래의 것을 비교해 보기 위하여 계산 결과를 그림 2.5에 나타내었다. 그림 2.5는 종래의 논문에서 사용한 특성임피던스 $Z_1=50 \Omega$, $Z_2=131.8 \Omega$, $Z_{3,1}=50 \Omega$, $Z_{3,2}=40 \Omega$, $Z_{3,3}=24.6 \Omega$ 로 하여 계산 한 결과이다. 그림 2.5에서 나타낸 계산 결과 S_{11} 이 $1.75 GHz$ 대역과 $2.25 GHz$ 대역 부분에서 $-15 dB$ 정도의 반사계수 값을 가지며, S_{21} 은 전 대역에 걸쳐 비교적 양호한 특성임을 볼 수 있다.

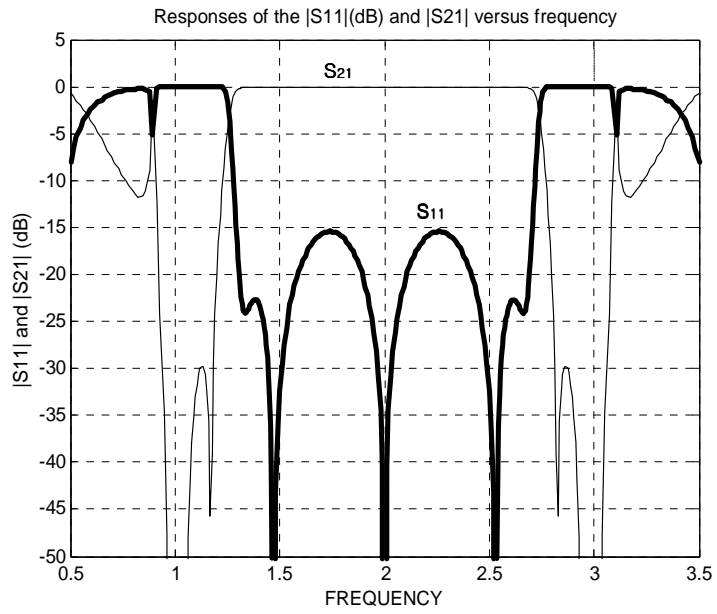


그림 2.5 종래 회로에 대한 S_{21} 및 S_{11} 의 계산 결과

Fig. 2.5 Calculated results of S_{21} and S_{11} for conventional Ring Filter.

제 3 장 본 연구에서 제안한 Ring Filter의 해석

3.1 본 연구에서 제안한 Ring Filter의 수식이론

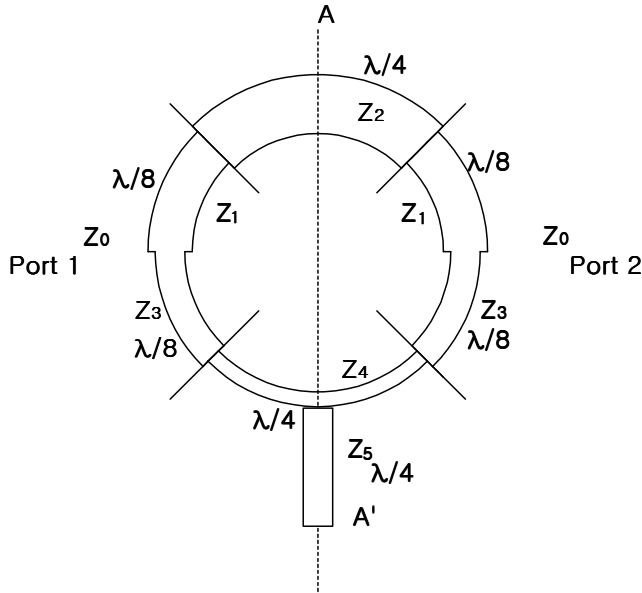


그림 3.1 링 필터
Fig. 3.1 Ring filter.

그림 3.1은 링 형의 필터의 구조로 AA'축을 중심으로 구조적으로 1축 대칭이며, 가역적인 소자이다. Port 1이 입력(Input), Port 2는 출력(Output)포트이다. 그림 3.2와 그림 3.3에서는 even, odd-mode의 등가회로를 나타내고 있으며 even, odd-mode법을 이용하여 회로의 1/2만 해석하여 중첩의 원리를 이용하면 전체회로에 대해 해석을 할 수 있다.

여기서, Z_{in}^e 는 even-mode 입력임피던스, Z_{in}^o 는 odd-mode 입력임피던스를 나타내고 있다.

(1) Even-mode 해석

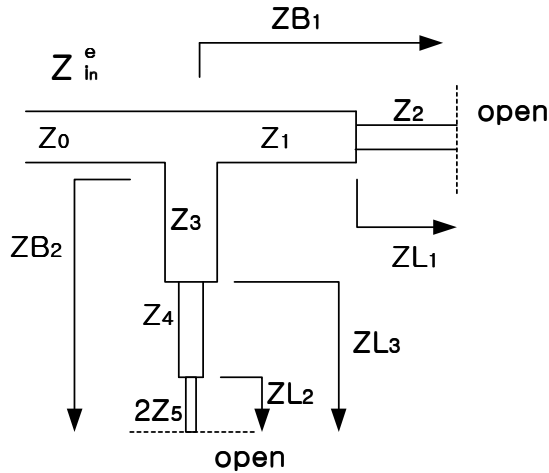


그림 3.2 Even 모드 등가회로
Fig. 3.2 Even-mode equivalent circuit.

그림 3.2는 링 필터의 Even 모드 등가회로를 나타내고 있다.

$$f_n = \frac{f}{f_0} \quad (3-1)$$

식 (3-1)에서 f_n 은 정규화 된 주파수(normalized frequency)이며 f_0 는 중심 주파수(center frequency)이다.

먼저 even-mode인 경우로, 입력임피던스 Z_{in}^e 에서는 개방회로(open circuit)이며, even-mode의 입력임피던스 Z_{in}^e 를 구하기 위해 ZL_1 을 먼저 구하고 차례대로 ZB_1 , ZL_2 , ZL_3 , ZB_2 를 구할 수 있다. 식은 다음과 같다.

$$ZL_1 = Z_2 / j \tan\left(\frac{\pi}{4} \beta\right) \quad (3-2)$$

$$ZB_1 = Z_1 \frac{ZL_1 + jZ_1 \tan\left(\frac{\pi}{4} \theta\right)}{Z_1 + jZL_1 \tan\left(\frac{\pi}{4} \theta\right)} \quad (3-3)$$

$$ZL_2 = 2Z_5 / j \tan\left(\frac{\pi}{4} \theta\right) \quad (3-4)$$

$$ZL_3 = Z_4 \frac{ZL_2 + jZ_4 \tan\left(\frac{\pi}{4} \theta\right)}{Z_4 + jZL_2 \tan\left(\frac{\pi}{4} \theta\right)} \quad (3-5)$$

$$ZB_2 = Z_3 \frac{ZL_3 + jZ_3 \tan\left(\frac{\pi}{4} \theta\right)}{Z_3 + jZL_3 \tan\left(\frac{\pi}{4} \theta\right)} \quad (3-6)$$

$$Z_{in}^e = \frac{ZB_1 \cdot ZB_2}{ZB_1 + ZB_2} \quad (3-7)$$

위의 식 (3-7)에 의해 even-mode의 입력임피던스를 이용하여 다음 식 (3-8)과 같이 even-mode의 반사계수를 구할 수 있다.

$$\Gamma_e = \frac{Z_{in}^e - Z_0}{Z_{in}^e + Z_0} \quad (3-8)$$

(2) Odd-mode

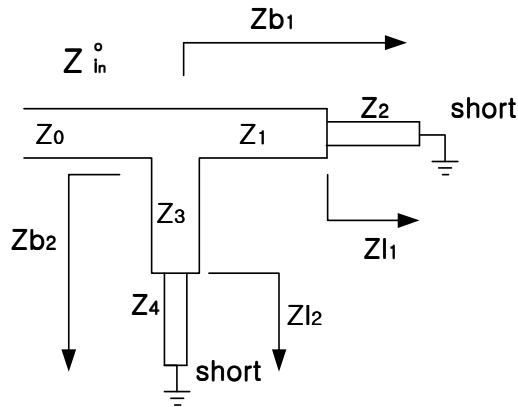


그림 3.3 Odd 모드 등가회로
Fig. 3.3 Odd-mode equivalent circuit.

$$f_n = \frac{f}{f_0} \quad (3-9)$$

위의 even-mode에서와 마찬가지로 f_n 은 정규화 된 주파수 (normalized frequency)이며 f_0 는 중심 주파수(center frequency)이다.

odd-mode에서 입력임피던스 Z_{in}^o 에서는 단락회로(short circuit)이며, odd-mode의 입력임피던스 Z_{in}^o 를 구하기 위해 Z_{l1} 을 먼저 구하고 차례대로 Z_{b1} , Z_{l2} , Z_{l3} , Z_{b2} 를 구할 수 있다. 식은 다음과 같다.

$$Z_{l1} = jZ_2 \tan\left(\frac{\pi}{4} f_n\right) \quad (3-10)$$

$$Z_{b1} = Z_1 \frac{Z_{l1} + jZ_1 \tan\left(\frac{\pi}{4} f_n\right)}{Z_1 + jZ_{l1} \tan\left(\frac{\pi}{4} f_n\right)} \quad (3-11)$$

$$Zl_2 = jZ_4 \tan\left(\frac{\pi}{4} f_n\right) \quad (3-12)$$

$$Zb_2 = Z_3 \frac{Zl_2 + jZ_3 \tan\left(\frac{\pi}{4} f_n\right)}{Z_3 + jZl_2 \tan\left(\frac{\pi}{4} f_n\right)} \quad (3-13)$$

$$Z_{in}^o = \frac{Zb_1 \cdot Zb_2}{Zb_1 + Zb_2} \quad (3-14)$$

$$\Gamma_o = \frac{Z_{in}^o - Z_0}{Z_{in}^o + Z_0} \quad (3-15)$$

위의 식 (3-14)에 의해 odd-mode의 입력임피던스를 이용하여 다음 식 (3-15)과 같이 odd-mode의 반사계수를 구할 수 있다. 식 (3-8)과 식 (3-15)의 반사계수를 사용하여 다음과 같이 S-parameter를 구할 수 있다.

(3) S-parameter 계산

$$S_{11} = \frac{\Gamma_e + \Gamma_o}{2} \quad (3-16)$$

$$S_{21} = \frac{\Gamma_e - \Gamma_o}{2} \quad (3-17)$$

$$S_{11} = S_{22} \text{ (대칭성)} \quad (3-18)$$

$$S_{21} = S_{12} \text{ (가역성)} \quad (3-19)$$

식 (3-16)과 식 (3-17)에서와 같이 S-parameter를 구할 수 있으

여 식 (3-18)과 식 (2-19)는 링 필터의 대칭성과 가역성을 가지는 회로임을 나타내고 있다. S_{11} 과 S_{21} 은 다음과 같이 데시벨(dB)로 표현할 수 있다.

$$S_{11, dB} = 20 \log_{10} |S_{11}| \quad (3-20)$$

$$S_{21, dB} = 20 \log_{10} |S_{21}| \quad (3-21)$$

3.2 3단 Ring Filter의 회로 해석

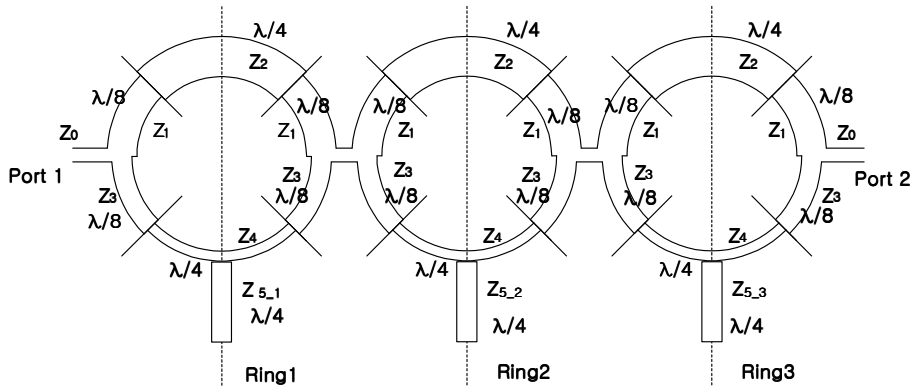


그림 3.4 3단 링 필터
Fig. 3.4 3-stage ring filter.

위의 그림 3.4는 3.1절에서 설명한 1단 링 필터 3개를 연결한 3단 링 필터이다. 3단 링 필터 역시 3.1절에서 해석한 바와 같이 even, odd-mode 해석을 하여 회로의 1/2만 해석한 것을 중첩의 원리를 이용하면 전체회로에 대해 해석을 할 수 있다. Ring1, Ring2, Ring3의 순서로 등가회로를 이용하여 수식을 해석한 후 전체 회로를 전달 파라미터들을 이용하여 해석할 수 있다. 다음의 Transfer Parameter들을 이용하여 식 (3-26)과 같이 Transfer matrix를 구할 수 있으며, Transfer matrix를 이용하여 3단 링 필터

의 전체 S_{11} 과 S_{21} 을 구할 수 있다.

다음의 식 (3-22)부터 식 (3-25)까지의 식은 Transfer Parameter 들을 나타내고 있다.

$$T_{11} = S_{12} - \frac{S_{11} \cdot S_{22}}{S_{21}} \quad (3-22)$$

$$T_{12} = \frac{S_{11}}{S_{21}} \quad (3-23)$$

$$T_{21} = -\frac{S_{22}}{S_{21}} \quad (3-24)$$

$$T_{22} = \frac{1}{S_{21}} \quad (3-25)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (3-26)$$

3단 링 필터의 전체 S_{11} 과 S_{21} 을 구하기 위해 Cascade Transfer Matrix로 전체 전달함수를 구할 수 있다. 다음의 식 (3-27)은 전체 전달함수를 구하기 위한 식으로 식 (3-26)을 이용하여 전체 전달함수를 구할 수 있다. 각각의 T_1 , T_2 , T_3 은 각각의 ring1, ring2, ring3의 전달함수 이다.

$$T = T_1 \times T_2 \times T_3 \quad (3-27)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (3-28)$$

식 (3-28)과 같이 전체 전달함수를 4개의 파라미터의 matrix로

표현할 수 있으며 각각의 전달 파라미터들을 이용하여 식 (3-29)부터 (3-32)까지의 수식과 같이 $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$ 를 구할 수 있다.

$$S_{11} = \frac{T_{12}}{T_{22}} \quad (3-29)$$

$$S_{12} = T_{11} - \frac{T_{12} \cdot T_{21}}{T_{22}} \quad (3-30)$$

$$S_{21} = \frac{1}{T_{22}} \quad (3-31)$$

$$S_{22} = -\frac{T_{21}}{T_{22}} \quad (3-32)$$

각각의 S 파라미터 $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$ 를 데시벨(dB)로 표현하면 다음과 같다.

$$S_{11, dB} = 20 \log_{10} |S_{11}| \quad (3-33)$$

$$S_{12, dB} = 20 \log_{10} |S_{12}| \quad (3-34)$$

$$S_{21, dB} = 20 \log_{10} |S_{21}| \quad (3-35)$$

$$S_{22, dB} = 20 \log_{10} |S_{22}| \quad (3-36)$$

제 4 장 최적 설계 및 계산 결과

4.1 Powell's Least Square Method를 이용한 최적 설계

Powell's Least Square Method는 미분을 하지 않고 극치를 찾을 수 있는 최소자승법으로서, 주어진 평가함수(parity function)를 최소로 하는 파라미터를 수치 계산적으로 구하여 이를 최적 파라미터로 하는 방법이다[7]. 링 필터에 요구되는 최적파라미터는 식 (4-1)과 식 (4-2)의 같은 평가함수를 써서 계산하였다.

즉 $f = 1.15 \sim 2.85 \text{ GHz}$ 의 pass band ($f_{56} \sim f_{226}$)에서는

$$F_2(Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, f_i) = \sum_{i=56}^{226} \{ |S_{11}|^2 + (|S_{21}| - 1)^2 \}_{f_i} \quad (4-1)$$

$f = 0.6 \sim 1.15 \text{ GHz}$ ($f_1 \sim f_{55}$), $f = 2.85 \sim 3.4 \text{ GHz}$ ($f_{227} \sim f_{281}$)의 stop band에서는

$$F_1(Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, f_i) = \sum_{i=1}^{55} \{ (|S_{11}| - 1)^2 + |S_{21}|^2 \}_{f_i}, \quad (4-2)$$

$$F_3(Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, f_i) = \sum_{i=227}^{281} \{ (|S_{11}| - 1)^2 + |S_{21}|^2 \}_{f_i} \quad (4-3)$$

로 하여 $F = F_1 + F_2 + F_3$ 라 놓고 $F(Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, f_i)$ 를 Minimum으로 하는 $Z_1 \sim Z_5$ 를 Powell's Least Square Method를 써서 구하였으며 f_i 의 값은 표 4.1과 같다.

표 4.1 Powell's Square Method에서 사용한 sampling point
 Table 4.1 Sampling point using in Powell's Square Method.

f_n	sampling point										
$f_1 \sim f_{55}$	0.60	0.61	0.62	0.63	0.64	...	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14
$f_{56} \sim f_{226}$	1.15	1.16	1.17	1.18	1.19	...	2.81	2.82	2.83	2.84	2.85
$f_{227} \sim f_{281}$	2.86	2.87	2.88	2.89	2.90	...	3.36	3.37	3.38	3.39	3.40

4.2 최적 파라미터를 이용한 계산 결과

위의 Powell's Least Square Method의 수식을 사용하여 계산한 결과 회로 파라미터는 표 4.2와 같으며, 표 4.2의 특성임피던스는 종래의 $\lambda/4$ 선로를 기본으로 하는 설계법에서 탈피하여 $\lambda/8$ 선로를 기본으로 하여 계산한 값이다.

표 4.2 Powell's Least Square Method에 의해 구해진 파라미터
 Table 4.2 Parameters obtained by Powell's Least Square Method.

	특성임피던스	두께	l
Z_1	55.0685 Ω	1.329 mm	11.468 mm($\lambda_g/8$)
Z_2	54.8630 Ω	1.383 mm	22.901 mm($\lambda_g/4$)
Z_3	132.2052 Ω	0.185 mm	12.138 mm($\lambda_g/8$)
Z_4	132.2731 Ω	0.179 mm	24.291 mm($\lambda_g/4$)
Z_{5-1}	24.2429 Ω	1.695 mm	22.732 mm($\lambda_g/4$)
Z_{5-2}	39.6429 Ω	2.332 mm	22.403 mm($\lambda_g/4$)
Z_{5-3}	49.6429 Ω	4.664 mm	21.731 mm($\lambda_g/4$)

그림 4.1은 표 4.2의 파라미터들을 사용하여 S_{21} 과 S_{11} 의 주파수 특성을 계산한 결과이다. $\lambda/4$ 의 선로를 기본으로 하고 Powell's Least Square Method의 수식을 사용하여 계산한 회로 파

라미터들을 사용하여 계산한 결과이며 계산 결과 S_{21} 이 $1.17\text{ GHz} \sim 2.8\text{ GHz}$ 대역에 걸쳐 좋은 특성을 보이고 있으며, S_{11} 역시 $1.3\text{ GHz} \sim 2.7\text{ GHz}$ 대역에 걸쳐 -20 dB 이상의 좋은 특성을 보이고 있다.

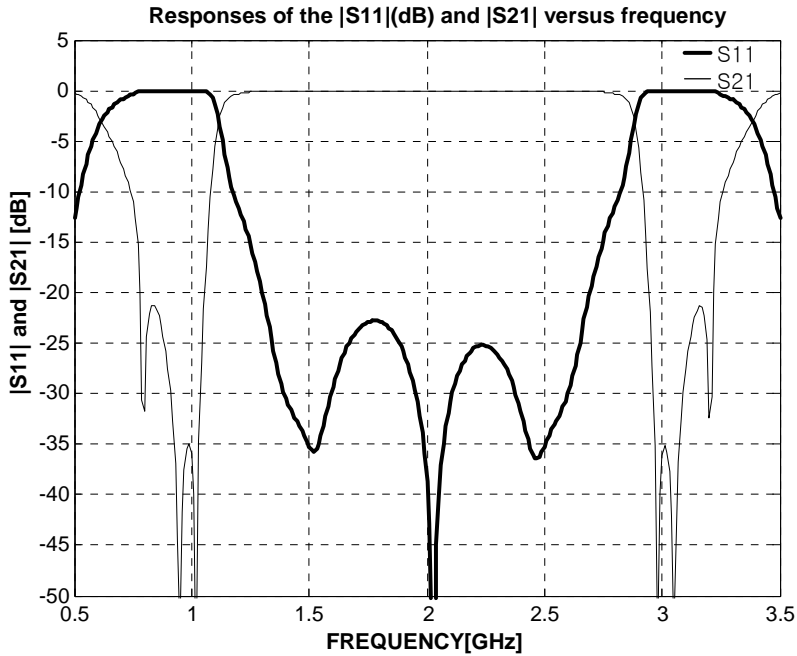


그림 4.1 최적 파라미터를 사용한 링 필터의 S_{21} 및 S_{11} 의 계산 결과
 Fig. 4.1 Calculated results of S_{21} and S_{11} by using optimized parameter.

본 논문에서 제안한 방법에 의해 계산한 결과와 위의 2.2절에서 보인 종래의 링 필터 결과인 그림 2.5와 비교해 보겠다. 그림 2.5는 3단 링 필터의 선로의 폭을 달리 하지 않은, 종래의 $\lambda/4$ 의 선로를 기본으로 하여 특성 임피던스를 $Z_1=Z_2=50$, $Z_3=Z_4=131.8$, $Z_{5,1}=50$, $Z_{5,2}=40$, $Z_{5,3}=24.6$ 으로 계산한 결과이다. 즉, $Z_1=Z_2$, $Z_3=Z_4$ 로 하였을 때의 S_{21} 과 S_{11} 주파수 특성을 나타내었다. $1.3\text{ GHz} \sim 2.7\text{ GHz}$ 대역에 걸쳐 위의 Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5

의 값을 다르게 하여 선로의 폭을 다르게 계산 한 경우와 비교를 하였을 때, 그림에서와 같이 1.45 GHz 정도의 대역에서와 2.45 GHz 대역에서의 S_{11} 주파수 특성이 -15 dB 에 못 미치는 좋지 않은 결과를 볼 수 있다. 종래의 링 필터의 경우 S_{21} 은 비교적 양호한 특성을 보이고 있으나 본 논문에서 제작한 링 필터의 S_{21} 계산 결과 특성이 개선됨을 알 수 있다.

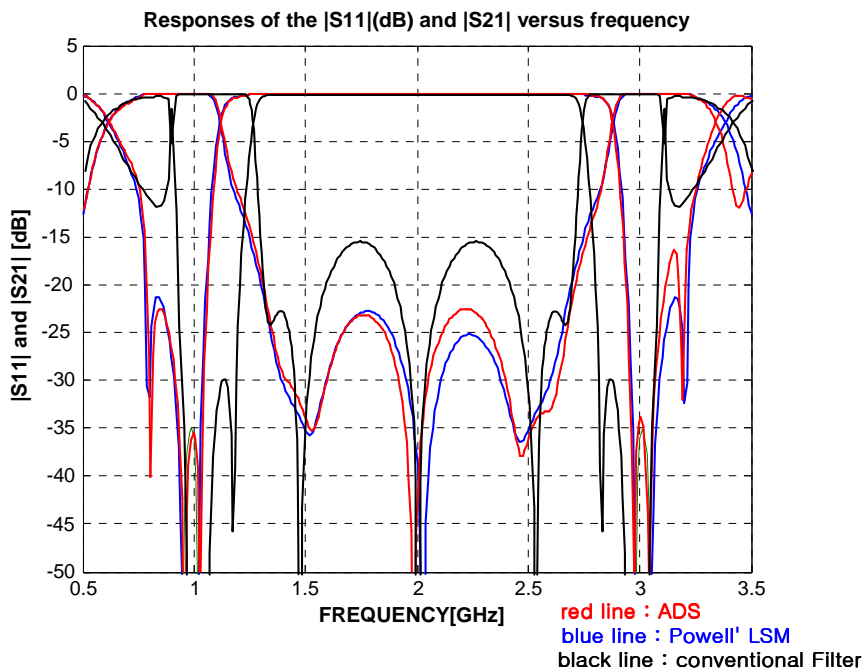


그림 4.2 최적 파라미터를 사용한 링 필터와 기존의 링 필터의 계산결과와 ADS를 사용한 시뮬레이션 결과

Fig. 4.2 Calculated results by using optimized parameter and conventional Ring Filter simulation results by using ADS.

그림 4.2는 본 논문에서 제안한 Powell's Least Square Method의 수식을 사용하여 계산한 결과와 기존의 링 필터의 계산결과 그리고 ADS 시뮬레이션 결과이다. 비교한 결과 그림에서와 같이 최적 파라미터를 사용한 링 필터와 ADS 시뮬레이션 결과와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

제 5 장 링 공진기를 사용한 대역통과필터의 제작 및 측정

다음의 그림 5.1은 본 논문에서 직접 제작한 3단 링 필터를 보이고 있다.

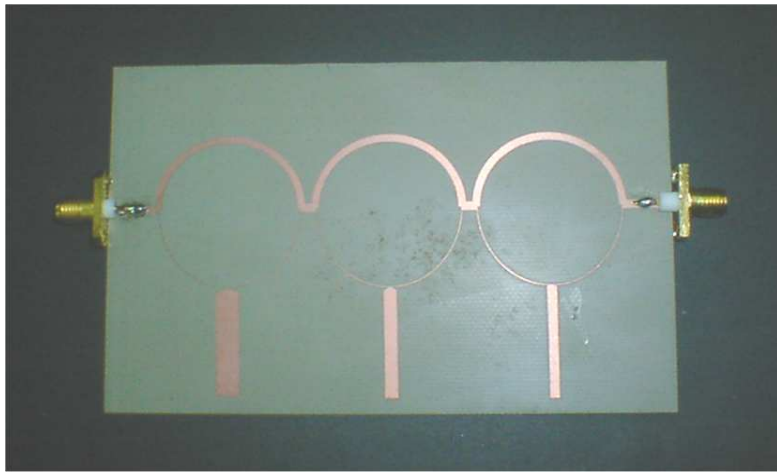


그림 5.1 제작한 3단 링 필터
Fig. 5.1 Manufactured 3 stage ring filter.

직접 제작한 3단 링 필터를 네트워크 아날라이저로 측정한 결과를 그림 5.2와 5.3에 보이고 있다. 그림 5.2는 S_{21} 을 나타내고 있으며 그림 5.3은 S_{11} 의 측정 결과를 나타내고 있다. 위의 계산 결과와 비교하였을 때 S_{21} 는 $1.21\text{ GHz} \sim 2.658\text{ GHz}$ 대역에 걸쳐 매우 흡사한 특성임을 알 수 있으며 S_{11} 역시 계산 결과와 흡사한 특성임을 보이고 있다.

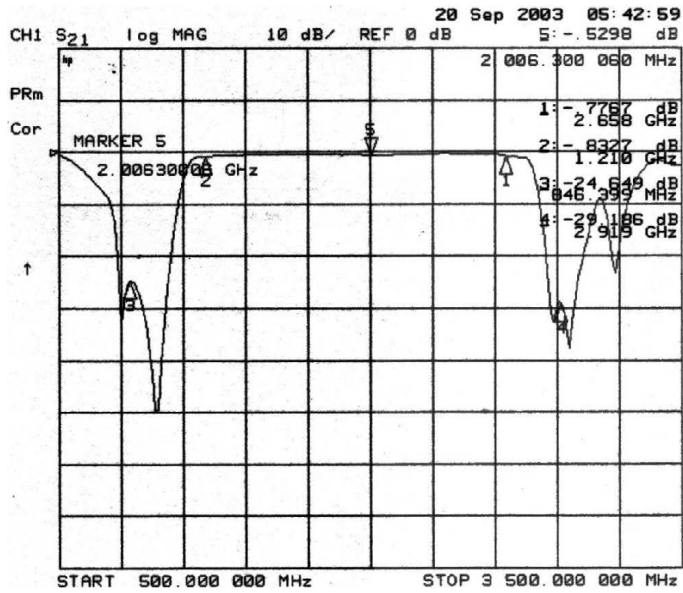


그림 5.2 S_{21} 의 측정결과

Fig. 5.2 measured result of S_{21} .

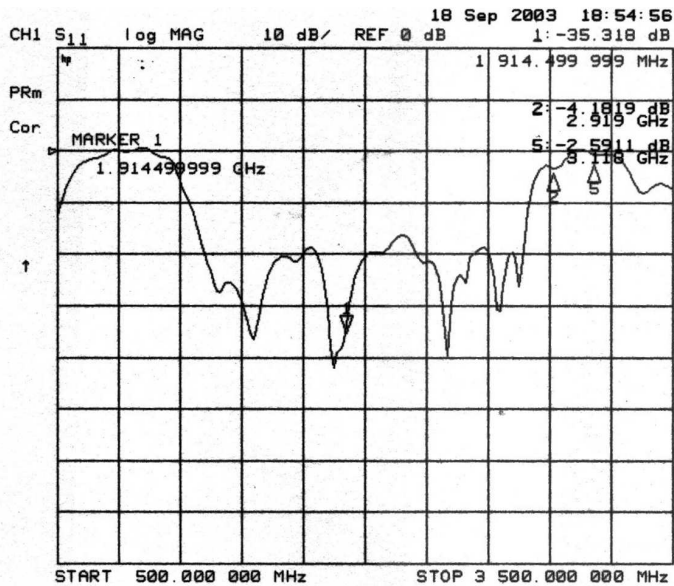


그림 5.3 S_{11} 의 측정결과

Fig. 5.3 measured result of S_{11} .

제 6 장 결 론

본 논문에서는 필터의 소형화를 위해서 링 공진기를 사용하였으며 링 공진기와 외부 스테브를 조밀하게 결합해서 고조파를 없애기 위한 필터를 개발하였다. Powell의 미분을 필요로 하지 않는 최소자승법으로 구한 수치로 최적화하여 3단 링 필터를 설계하였으며, 파라미터 Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5 의 선로의 폭을 다르게 하여 제작, 측정하였다. 종래의 논문에서는 $\lambda/4$ 선로를 기본으로 사용하여 링 공진기 대역통과 필터의 가능성을 증명하였으나 이동통신시스템에서 사용되기 위해서는 특성의 개선이 필요로 하였다. 본 논문에서는 위의 문제점을 해결하기 위하여 종래의 $\lambda/4$ 선로를 기본으로 하는 설계법에서 탈피하여 $\lambda/8$ 선로를 기본으로 하는 2 GHz 대역필터를 설계하였고 그 특성이 개선됨을 증명하였다. 계산 결과 파라미터 Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5 의 선로 폭을 다르게 하지 않고 $Z_1 = Z_2, Z_3 = Z_4$ 로 하였을 때 S_{21} 은 1.45 GHz 정도의 대역에서와 2.45 GHz 대역에서의 S_{11} 주파수 특성이 -15 dB 에 못 미치는 좋지 않은 결과를 볼 수 있었다. 파라미터 Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5 의 두께를 다르게 하여 계산한 결과 S_{21} 이 $1.17\text{ GHz} \sim 2.8\text{ GHz}$ 대역에 걸쳐 좋은 특성을 보이고 있었으며, S_{11} 역시 $1.3\text{ GHz} \sim 2.7\text{ GHz}$ 대역에 걸쳐 -20 dB 이상의 좋은 특성을 보이고 있어 두께를 다르게 하지 않은 필터보다 더 좋은 특성을 가짐을 알 수 있었다.

각각의 특성임피던스 값을 다르게 하기 위해 선로의 폭을 다르게 하여 3단 링 필터를 제작하여 측정한 결과 $1\text{ GHz} \sim 3.1\text{ GHz}$ 대역에 걸쳐 계산 결과와 측정치가 잘 일치하였다. Powell의 최소자승법을 사용한 계산결과의 정확도를 보기 위하여 시뮬레이션 툴인 ADS(Advanced Design System)를 사용하여 비교하였으며, 비교한 결과 거의 흡사한 특성을 가짐을 확인하였다.

본 논문에서는 $\lambda/8$ 선로를 기본으로 하여 각각의 $\lambda/8$ 선로의 특성임피던스 값을 다르게 하여 링 공진기 필터의 특성을 개선시켰다. 본 논문은 폭이 서로 다른 $\lambda/8$ 선로를 이용하여 3단 링 필터를 제작 설계하고, 최적 설계법을 제안하였다.

참 고 문 헌

- [1] 김동일, 한경수, 이연혜, “2단 결합선로형 광대역 방향성 결합기의 설계” '98 한국전자파학회 영남지부 학술대회 논문집 pp. 101-105, 1998. 7. 4.
- [2] Hitoshi Ishida, Takao Nakagawa and Kiyomichi Araki, "Design and analysis of Band Pass Filter with Ring Resonator," TECHNICAL REPORT OF IEICE, MW 2003-32, pp,59-63, May 2003.
- [3] J. Helszajn, *Passive and Active Microwave Circuits*, Department of Electrical and Electronic Engineering Heriot-Watt University Edinburgh, United Kingdom, pp.18, 19, 47-50. 1979.
- [4] David M. Pozar, *초고주파공학*, 대영사, Mar. 1994.
- [5] Dong Il Kim, Yoshiyuki Naito, "Broad-Band Design of Improved Hybrid-Ring 3-dB Directional Couplers," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques vol.30, No.11, Nov. 1982.
- [6] J. A. G. Malherbe, *Microwave Transmission Line Couplers*, Artech House, INC., 1988.
- [7] M. J. D. Powell, "A method for minimizing a sum of squares of non-linear functions without calculating derivatives," Computer J., vol. 7, pp.303-307, 1965

부록 Powell's LSM program

◆ Powell's method

```
clear all;
global Z S
%
%   itmax = maximum number of iterations
%   N     = number of design variables
%
itmax = 10;
N = 5; % various
%
%   initial guess for vector of design variables
z0 = [55 55 132 132 50]';
Z = z0;
%
%   initial set of search directions grouped into a
%   matrix (each column is a search direction). For
%   Powell's method this matrix is the identity matrix
%
H = eye(N);
%
n = N;
%
%   main iteration loop (n minimizations plus minimization
%   along new conjugate direction)
%
for iter = 1:1:itmax
    iter
    %
    %   perform n unidimensional minimizations
    %
    S_new = zeros(n,1);
    H
    for k=1:1:n
        k
        S = H(:,k)
        alpha_star = fminbnd('fun2', -0.05,0.05);
        F = fun2(alpha_star);
        Z = Z + alpha_star*S;
```

```

        S_new = S_new + alpha_star*S;
    end
    %
    %     generate new search direction, and minimize along it
    %
    S = S_new;
    alpha_star = fminbnd('fun2', -0.1, 0.1);
    F = fun2(alpha_star)
    Z = Z +alpha_star*S
    %
    %     substitute one of the initial directions with the new one
    %
    for ic=1:1:n-1
        H(:,ic) = H(:,ic+1);
    end
    H(:,n) = S_new;
end

```

◆ fun2

```

function y = fun2(alpha)
global Z S
Z1 = Z(1) + alpha*S(1);
Z2 = Z(2) + alpha*S(2);
Z3 = Z(3) + alpha*S(3);
Z4 = Z(4) + alpha*S(4);
Z5 = Z(5) + alpha*S(5);

```

% This is the objective function F to be minimized

```
sigma1 = 0;
```

```
for f = 0.6:0.01:1.14
```

```
    s11
```

```

        1/2*(Z1*(-i*Z2/tan(1/8*pi*f)+i*Z1*tan(1/8*pi*f))/(Z1+Z2)*Z3*(Z4*(-2*i*Z5/tan(1/8*
        pi*f)+i*Z4*tan(1/8*pi*f))/(Z4+2*Z5)+i*Z3*tan(1/8*pi*f))/(Z3+i*Z4*(-2*i*Z5/tan(1/8*
        pi*f)+i*Z4*tan(1/8*pi*f))/(Z4+2*Z5)*tan(1/8*pi*f))/(Z1*(-i*Z2/tan(1/8*pi*f)+i*Z1*tan
        (1/8*pi*f))/(Z1+Z2)+Z3*(Z4*(-2*i*Z5/tan(1/8*pi*f)+i*Z4*tan(1/8*pi*f))/(Z4+2*Z5)+i*
        Z3*tan(1/8*pi*f))/(Z3+i*Z4*(-2*i*Z5/tan(1/8*pi*f)+i*Z4*tan(1/8*pi*f))/(Z4+2*Z5)*ta
        n(1/8*pi*f))-50)/(Z1*(-i*Z2/tan(1/8*pi*f)+i*Z1*tan(1/8*pi*f))/(Z1+Z2)*Z3*(Z4*(-2*
        i*Z5/tan(1/8*pi*f)+i*Z4*tan(1/8*pi*f))/(Z4+2*Z5)+i*Z3*tan(1/8*pi*f))/(Z3+i*Z4*(-2*i
        *Z5/tan(1/8*pi*f)+i*Z4*tan(1/8*pi*f))/(Z4+2*Z5)*tan(1/8*pi*f))/(Z1*(-i*Z2/tan(1/8*
        pi*f)+i*Z1*tan(1/8*pi*f))/(Z1+Z2)+Z3*(Z4*(-2*i*Z5/tan(1/8*pi*f)+i*Z4*tan(1/8*pi*f))
    
```


$$\begin{aligned} & *Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f))/(Z4+2*Z5)*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1*(-i*Z2/\tan(1/8* \\ & \pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1+Z2)+Z3*(Z4*(-2*i*Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f)) \\ & /(Z4+2*Z5)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3+i*Z4*(-2*i*Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f)) \\ & /(Z4+2*Z5)*\tan(1/8*\pi*f))+50)+1/2*(Z1*(i*Z2*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1 \\ & -Z2*\tan(1/8*\pi*f)^2)*Z3*(i*Z4*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3-Z4*\tan(1/8*\pi* \\ & f)^2)/(Z1*(i*Z2*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1-Z2*\tan(1/8*\pi*f)^2)+Z3*(i*Z4* \\ & \tan(1/8*\pi*f)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3-Z4*\tan(1/8*\pi*f)^2)-50)/(Z1*(i*Z2*\tan(1/8*\pi \\ & *f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1-Z2*\tan(1/8*\pi*f)^2)*Z3*(i*Z4*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z3*\tan(1/8 \\ & *\pi*f))/(Z3-Z4*\tan(1/8*\pi*f)^2)/(Z1*(i*Z2*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1-Z2* \\ & \tan(1/8*\pi*f)^2)+Z3*(i*Z4*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3-Z4*\tan(1/8*\pi*f)^2) \\ &)+50); \end{aligned}$$

$$s21 =$$

$$\begin{aligned} & 1/2*(Z1*(-i*Z2/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1+Z2)*Z3*(Z4*(-2*i*Z5/\tan(1/8* \\ & \pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f))/(Z4+2*Z5)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3+i*Z4*(-2*i*Z5/\tan(1/8* \\ & \pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f))/(Z4+2*Z5)*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1*(-i*Z2/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z1*\tan \\ & (1/8*\pi*f))/(Z1+Z2)+Z3*(Z4*(-2*i*Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f))/(Z4+2*Z5)+i* \\ & Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3+i*Z4*(-2*i*Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f))/(Z4+2*Z5)*\tan \\ & (1/8*\pi*f))-50)/(Z1*(-i*Z2/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1+Z2)*Z3*(Z4*(-2* \\ & i*Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f))/(Z4+2*Z5)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3+i*Z4*(-2*i \\ & *Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f))/(Z4+2*Z5)*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1*(-i*Z2/\tan(1/8* \\ & \pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1+Z2)+Z3*(Z4*(-2*i*Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f)) \\ & /(Z4+2*Z5)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3+i*Z4*(-2*i*Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f)) \\ & /(Z4+2*Z5)*\tan(1/8*\pi*f))+50)-1/2*(Z1*(i*Z2*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1 \\ & -Z2*\tan(1/8*\pi*f)^2)*Z3*(i*Z4*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3-Z4*\tan(1/8*\pi* \\ & f)^2)/(Z1*(i*Z2*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1-Z2*\tan(1/8*\pi*f)^2)+Z3*(i*Z4* \\ & \tan(1/8*\pi*f)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3-Z4*\tan(1/8*\pi*f)^2)-50)/(Z1*(i*Z2*\tan(1/8*\pi \\ & *f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1-Z2*\tan(1/8*\pi*f)^2)*Z3*(i*Z4*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z3*\tan(1/8 \\ & *\pi*f))/(Z3-Z4*\tan(1/8*\pi*f)^2)/(Z1*(i*Z2*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1-Z2* \\ & \tan(1/8*\pi*f)^2)+Z3*(i*Z4*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3-Z4*\tan(1/8*\pi*f)^2) \\ &)+50); \end{aligned}$$

$$\text{sigma2} = \text{sigma2} + (1 - \text{abs}(s21)) + (\text{abs}(s11));$$

end

$$\text{sigma3} = 0;$$

for f = 2.86:0.01:3.4

$$s11 =$$

$$\begin{aligned} & 1/2*(Z1*(-i*Z2/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1+Z2)*Z3*(Z4*(-2*i*Z5/\tan(1/8* \\ & \pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f))/(Z4+2*Z5)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3+i*Z4*(-2*i*Z5/\tan(1/8* \\ & \pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f))/(Z4+2*Z5)*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1*(-i*Z2/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z1*\tan \\ & (1/8*\pi*f))/(Z1+Z2)+Z3*(Z4*(-2*i*Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f))/(Z4+2*Z5)+i* \\ & Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3+i*Z4*(-2*i*Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f))/(Z4+2*Z5)*\tan \\ & (1/8*\pi*f))-50)/(Z1*(-i*Z2/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1+Z2)*Z3*(Z4*(-2* \\ & i*Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f))/(Z4+2*Z5)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3+i*Z4*(-2*i \\ & *Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f))/(Z4+2*Z5)*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1*(-i*Z2/\tan(1/8* \\ & \pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1+Z2)+Z3*(Z4*(-2* \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& i*Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f))/(Z4+2*Z5)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3+i*Z4*(-2*i \\
& *Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f))/(Z4+2*Z5)*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1*(-i*Z2/\tan(1/8* \\
& \pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1+Z2)+Z3*(Z4*(-2*i*Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f)) \\
& /(Z4+2*Z5)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3+i*Z4*(-2*i*Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f)) \\
& /(Z4+2*Z5)*\tan(1/8*\pi*f))+50)+1/2*(Z1*(i*Z2*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1 \\
& -Z2*\tan(1/8*\pi*f)^2)*Z3*(i*Z4*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3-Z4*\tan(1/8*\pi \\
& f)^2)/(Z1*(i*Z2*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1-Z2*\tan(1/8*\pi*f)^2)+Z3*(i*Z4* \\
& \tan(1/8*\pi*f)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3-Z4*\tan(1/8*\pi*f)^2))-50)/(Z1*(i*Z2*\tan(1/8*\pi \\
& *f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1-Z2*\tan(1/8*\pi*f)^2)*Z3*(i*Z4*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z3*\tan(1/8 \\
& *pi*f))/(Z3-Z4*\tan(1/8*\pi*f)^2)/(Z1*(i*Z2*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1-Z2* \\
& \tan(1/8*\pi*f)^2)+Z3*(i*Z4*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3-Z4*\tan(1/8*\pi*f)^2) \\
&)+50);
\end{aligned}$$

s21

=

$$\begin{aligned}
& 1/2*(Z1*(-i*Z2/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1+Z2)*Z3*(Z4*(-2*i*Z5/\tan(1/8* \\
& \pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f))/(Z4+2*Z5)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3+i*Z4*(-2*i*Z5/\tan(1/8* \\
& \pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f))/(Z4+2*Z5)*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1*(-i*Z2/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z1*\tan \\
& (1/8*\pi*f))/(Z1+Z2)+Z3*(Z4*(-2*i*Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f))/(Z4+2*Z5)+i* \\
& Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3+i*Z4*(-2*i*Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f))/(Z4+2*Z5)*\tan \\
& (1/8*\pi*f))-50)/(Z1*(-i*Z2/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1+Z2)*Z3*(Z4*(-2* \\
& i*Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f))/(Z4+2*Z5)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3+i*Z4*(-2*i \\
& *Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f))/(Z4+2*Z5)*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1*(-i*Z2/\tan(1/8* \\
& \pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1+Z2)+Z3*(Z4*(-2*i*Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f)) \\
& /(Z4+2*Z5)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3+i*Z4*(-2*i*Z5/\tan(1/8*\pi*f)+i*Z4*\tan(1/8*\pi*f)) \\
& /(Z4+2*Z5)*\tan(1/8*\pi*f))+50)-1/2*(Z1*(i*Z2*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1 \\
& -Z2*\tan(1/8*\pi*f)^2)*Z3*(i*Z4*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3-Z4*\tan(1/8*\pi \\
& f)^2)/(Z1*(i*Z2*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1-Z2*\tan(1/8*\pi*f)^2)+Z3*(i*Z4* \\
& \tan(1/8*\pi*f)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3-Z4*\tan(1/8*\pi*f)^2))-50)/(Z1*(i*Z2*\tan(1/8*\pi \\
& *f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1-Z2*\tan(1/8*\pi*f)^2)*Z3*(i*Z4*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z3*\tan(1/8 \\
& *pi*f))/(Z3-Z4*\tan(1/8*\pi*f)^2)/(Z1*(i*Z2*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z1*\tan(1/8*\pi*f))/(Z1-Z2* \\
& \tan(1/8*\pi*f)^2)+Z3*(i*Z4*\tan(1/8*\pi*f)+i*Z3*\tan(1/8*\pi*f))/(Z3-Z4*\tan(1/8*\pi*f)^2) \\
&)+50);
\end{aligned}$$

segma3 = segma3 +(abs(s21))+(1-abs(s11));

end

y = segma1+segma2+segma3;

◆ Ring Filter

```

%%%%%%%%%% Ring Filter-1 %%%%%%%%%%

clear;
Z0=50;
Z1=55.0685;
Z2=54.8630;
Z3=132.2052;
Z4=132.2731;

SS1=[];SS2=[];SS3=[];SS4=[];f0=2.0;SSdB=[];SSnum=[];

for f=0.5:0.01:3.5

%%%%%%%%%% Z5_1=24.6 %%%%%%%%%%
Z5_1=24.2429;
%% Even-mode %%

ZL1_1=Z2/(j*tan((pi/4)*(f/f0)));
ZB1_1=Z1*(ZL1_1+j*Z1*tan((pi/4)*(f/f0)))/(Z1+j*ZL1_1*tan((pi/4)*(f/f0)));
ZL2_1=2*Z5_1/(j*tan((pi/2)*(f/f0)));
ZL3_1=Z4*(ZL2_1+j*Z4*tan((pi/4)*(f/f0)))/(Z4+j*ZL2_1*tan((pi/4)*(f/f0)));
ZB2_1=Z3*(ZL3_1+j*Z3*tan((pi/4)*(f/f0)))/(Z3+j*ZL3_1*tan((pi/4)*(f/f0)));
Zine_1=(ZB1_1*ZB2_1)/(ZB1_1+ZB2_1);
Se_1=(Zine_1-Z0)/(Zine_1+Z0);

%% Odd-mode %%

Zl1_1=j*Z2*tan((pi/4)*(f/f0));
Zb1_1=Z1*(Zl1_1+j*Z1*tan((pi/4)*(f/f0)))/(Z1+j*Zl1_1*tan((pi/4)*(f/f0)));
Zl2_1=j*Z4*tan((pi/4)*(f/f0));
Zb2_1=Z3*(Zl2_1+j*Z3*tan((pi/4)*(f/f0)))/(Z3+j*Zl2_1*tan((pi/4)*(f/f0)));
Zino_1=(Zb1_1*Zb2_1)/(Zb1_1+Zb2_1);
So_1=(Zino_1-Z0)/(Zino_1+Z0);

%% Rflection coefficient %%

s11_1=(Se_1+So_1)/2;
s12_1=(Se_1-So_1)/2;
s21_1=(Se_1-So_1)/2;
s22_1=(Se_1+So_1)/2;

```

```

T11_1=s12_1-s11_1*s22_1/s21_1;
T12_1=s11_1/s21_1;
T21_1=-s22_1/s21_1;
T22_1=1/s21_1;
T1=[T11_1,T12_1;T21_1,T22_1];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Z5_2=40 %%%%%%%%%
Z5_2=39.6429;
%% Even-mode %%

ZL1_2=Z2/(j*tan((pi/4)*(f/f0)));
ZB1_2=Z1*(ZL1_2+j*Z1*tan((pi/4)*(f/f0)))/(Z1+j*ZL1_2*tan((pi/4)*(f/f0)));
ZL2_2=2*Z5_2/(j*tan((pi/2)*(f/f0)));
ZL3_2=Z4*(ZL2_2+j*Z4*tan((pi/4)*(f/f0)))/(Z4+j*ZL2_2*tan((pi/4)*(f/f0)));
ZB2_2=Z3*(ZL3_2+j*Z3*tan((pi/4)*(f/f0)))/(Z3+j*ZL3_2*tan((pi/4)*(f/f0)));
Zine_2=(ZB1_2*ZB2_2)/(ZB1_2+ZB2_2);
Se_2=(Zine_2-Z0)/(Zine_2+Z0);

%% Odd-mode %%

Zl1_2=j*Z2*tan((pi/4)*(f/f0));
Zb1_2=Z1*(Zl1_2+j*Z1*tan((pi/4)*(f/f0)))/(Z1+j*Zl1_2*tan((pi/4)*(f/f0)));
Zl2_2=j*Z4*tan((pi/4)*(f/f0));
Zb2_2=Z3*(Zl2_2+j*Z3*tan((pi/4)*(f/f0)))/(Z3+j*Zl2_2*tan((pi/4)*(f/f0)));
Zino_2=(Zb1_2*Zb2_2)/(Zb1_2+Zb2_2);
So_2=(Zino_2-Z0)/(Zino_2+Z0);

%% Rflection coefficent %%

s11_2=(Se_2+So_2)/2;
s12_2=(Se_2-So_2)/2;
s21_2=(Se_2-So_2)/2;
s22_2=(Se_2+So_2)/2;

T11_2=s12_2-s11_2*s22_2/s21_2;
T12_2=s11_2/s21_2;
T21_2=-s22_2/s21_2;
T22_2=1/s21_2;
T2=[T11_2,T12_2;T21_2,T22_2];

```

```

%% Z5_3=50
Z5_3=49.6429;
%% Even-mode %%

```

```

ZL1_3=Z2/(j*tan((pi/4)*(f/f0)));
ZB1_3=Z1*(ZL1_3+j*Z1*tan((pi/4)*(f/f0)))/(Z1+j*ZL1_3*tan((pi/4)*(f/f0)));
ZL2_3=2*Z5_3/(j*tan((pi/2)*(f/f0)));
ZL3_3=Z4*(ZL2_3+j*Z4*tan((pi/4)*(f/f0)))/(Z4+j*ZL2_3*tan((pi/4)*(f/f0)));
ZB2_3=Z3*(ZL3_3+j*Z3*tan((pi/4)*(f/f0)))/(Z3+j*ZL3_3*tan((pi/4)*(f/f0)));
Zine_3=(ZB1_3*ZB2_3)/(ZB1_3+ZB2_3);
Se_3=(Zine_3-Z0)/(Zine_3+Z0);

```

```

%% Odd-mode %%

```

```

Zl1_3=j*Z2*tan((pi/4)*(f/f0));
Zb1_3=Z1*(Zl1_3+j*Z1*tan((pi/4)*(f/f0)))/(Z1+j*Zl1_3*tan((pi/4)*(f/f0)));
Zl2_3=j*Z4*tan((pi/4)*(f/f0));
Zb2_3=Z3*(Zl2_3+j*Z3*tan((pi/4)*(f/f0)))/(Z3+j*Zl2_3*tan((pi/4)*(f/f0)));
Zino_3=(Zb1_3*Zb2_3)/(Zb1_3+Zb2_3);
So_3=(Zino_3-Z0)/(Zino_3+Z0);

```

```

%% Rflection coefficient %%

```

```

s11_3=(Se_3+So_3)/2;
s12_3=(Se_3-So_3)/2;
s21_3=(Se_3-So_3)/2;
s22_3=(Se_3+So_3)/2;

```

```

T11_3=s12_3-s11_3*s22_3/s21_3;
T12_3=s11_3/s21_3;
T21_3=-s22_3/s21_3;
T22_3=1/s21_3;
T3=[T11_3,T12_3;T21_3,T22_3];

```

```

%% cascade transfer matrix %%

```

```

T=T1*T2*T3;

```

```

T11=T(1,1);
T12=T(1,2);
T21=T(2,1);
T22=T(2,2);

```

```

%%%%%%%%% Reflection parameter %%%%%%%%%

s11=T12/T22;
s12=T11-T21*T12/T22;
s21=1/T22;
s22=-T21/T22;
s=(abs(s11))^2+(abs(s21))^2;

S11=20*log10(abs(s11));
S12=20*log10(abs(s12));
S21=20*log10(abs(s21));
S22=20*log10(abs(s22));
%S=20*log10(abs(s));

SS1=[SS1:S11];
SS2=[SS2:S12];
SS3=[SS3:S21];
SS4=[SS4:S22];
%SSdB=[SSdB:S];
%SSnum=[SSnum;s];

end

figure(1)
clf;
x=0.5:0.01:3.5;
plot(x,SS1,x,SS2);
axis([0.5 3.5 -50 5]);
legend('S11,S21')
grid on
xlabel('FREQUENCY');
ylabel('|S11| and |S21| (dB)')
title('Responses of the |S11|(dB) and |S21| versus frequency')

```

감사의 글

어느덧 2003년도 마지막 한 자락을 잡고서 이렇게 감사의 글을 적고 있는 제 자신을 돌아보면 신기하기도 하고 스스로 놀랍기도 합니다. 석사 2년 동안 힘든 일도 많았고 즐거운 일도 많았고... 정말 많은 일들이 제게 있었습니다. 자만심만 가득했던 저에게는 제 인생에서 무엇보다도 바꿀 수 없는 소중한 경험을 했다고 생각합니다. 제 논문이 있기까지 저의 부족함에도 항상 끊임없는 인내심으로 저를 살피주신 김동일 교수님께 정말 감사한 마음과 교수님 기대에 미치지 못한 것 같아 죄송한 마음뿐입니다. 그리고 세심한 도움 주신 윤영 교수님과 민경식 교수님, 언제나 저의 편에서 힘이 되어주시고 딸처럼 돌봐주신 원영수 교수님 정말 감사합니다. 많은 관심과 지도주신 전파공학과 교수님들께도 감사드립니다.

힘들 때마다 옆에서 많은 조언을 아끼지 않았던 연구실 사람들, 정말 제게는 가족 같은 연구실 오빠들, 동기들 그리고 상미... 모두 잊지 못할 소중한 보물입니다. 제 옆에서 든든한 버팀목이 되어주고 많은 도움을 준 Rui! 고마워요. 연구실의 아빠 준영오빠, 연구실 엄마 동한오빠, 고생 많은 승재오빠랑 상현오빠, 연구실 귀염둥이 상욱이 다들 많이 보고 싶을 거예요. 그리고 우리 동기들... 내 옆에서 많은 충고와 위로해준 승민이, 남자도 친구가 가능한걸 알았다. 나의 동거녀, 묵묵히 옆자리를 지켜준 은정이, 옆집에서 나 이빠해주고 고민 들어준 순영이, 땡깡쟁이 도연오빠 다들 알지? 내가 많이 좋아하는 거~

내가 힘들 때마다 내 투정 다 받아주고 많은 힘이 되어준 규니... 정말 고마워요. 누가 뭐라 해도 나의 정신적 지주 우리 아빠, 엄마! 사랑해요!

영주에서 나 졸업하기만을 기다리는 내 친구들...

2년 동안 저는 작은 것 하나도 쉽게 얻어지지 않음을 알게 되었습니다. 또한 작은 것 하나라도 모든 정성을 다해야만 보통이 될 수 있다는 것도 알았습니다. 언제 어디서든 2년 동안 배우고 깨달은 것을 잊지 않고 보다 성숙한 모습으로 살아갈 것입니다. 이 모든 것을 깨닫고 한층 성숙할 수 있었던 것은 저 혼자만이 아닌 제 옆에 많은 분들이 있었기에 가능했을 것입니다. 이제부터 저는 2년 동안의 경험을 발판 삼아 새로운 삶에 뛰어 들어 모두에게 떳떳할 수 있는 어른이 되겠습니다.