

개선된 특성을 갖는 진폭 등화기의 설계와 응용

Design of Amplitude Equalizers with Improved Characteristics and Their Applications

이 송 이 · 윤 상 원

Song-Yi Lee · Sang-Won Yun

요 약

본 논문에서는 고차 대역 통과 여파기의 평탄도를 개선하기 위해 증폭기, 옴폭한 상보형 여파기, 감쇠기로 구성된 진폭 등화기를 설계하였다. 상보형 여파기는 2n차 체비셰프 원형의 극점 위치를 조절하여 체비셰프 다항식을 수정하고 회로망 합성법을 통하여 원형 소자 값을 계산하였다. 대역 통과 여파기에서 발생하는 손실을 보상하고 반사 특성을 개선할 수 있는 증폭기와 진폭 등화기의 이득 크기를 조절하기 위한 감쇠기를 계산된 원형 소자 값을 사용하여 설계한 4차 상보형 여파기에 연결하여 진폭 등화기를 구현하였다. 제안한 진폭 등화기를 사용하여 2.3 GHz 휴대 인터넷 대역(WiBro)의 13차 대역 통과 여파기의 평탄도 특성을 6 dB 개선하였다.

Abstract

In this paper, we designed amplitude equalizer which is composed of amplifier, complementary shaping filter and attenuator in order to improve flatness of high order bandpass filter. We modified Chebyshev polynomial and calculated the prototype elements for complementary shaping filters by network synthesis. The amplitude equalizer is realized that it connects the 4th order complementary shaping filter designed by using calculated the prototype elements to the amplifier compensating for insertion loss and improving return loss, and with the attenuator for gain control. Using proposed amplitude equalizer, We certificated improvement in flatness of 13th order bandpass filter at WiBro band.

Key words : Amplitude Equalizer, Complementary Shaping Filter, Bandpass Filter, Flatness, WiBro

I. 서 론

이동 통신 시스템의 수요가 급증하면서 한정된 주파수 자원을 효율적으로 나누기 위하여 선택도가 우수한 여파기가 요구되고 있다. 여파기의 스퀘트 특성을 향상시키는데 가장 손쉬운 방법은 여파기의 차수를 늘리는 것이다. 설계 규격을 맞추기 위하여 차수를 크게 늘릴 경우에 스퀘트 특성은 향상되나, 공진기의 유한한 품질계수(Quality Factor: Q)에 의해 통과대역 내 삽입 손실이 커지고 진폭 평탄도(am-

plitude flatness)가 훼손된다. 대역 내 전력 분포가 중요시 되는 시스템에서 채널 간 큰 전력 차이는 시스템의 성능을 저하시키므로 평탄도를 보상해 줄 회로가 필요하다.

평탄도를 개선하기 위해 제안된 방법으로는 도파관 측면에 연결된 반파장 공진기를 여파기의 기울기와 반대가 되도록 조절하는 진폭 등화기(amplitude equalizer)와^[1], 2차 체비셰프 여파기의 리플을 키운 상보형 여파기(complementary shaping filter)를 이용하는 방법이 있다^[2]. 이후 6차 체비셰프 여파기의

「이 연구는 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터(MINT)를 통한 한국과학재단 우수연구센터의 지원으로 연구되었음.」
서강대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Sogang University)

· 논문 번호 : 20051105-02S

· 수정완료일자 : 2006년 1월 2일

극점을 적절히 옮겨 진폭 등화기를 설계하는 방법이 소개되었으나^[3], 체계적인 설계 방법이 제시되지 않았다.

본 논문에서는 상보형 여파기의 체계적인 설계를 위하여 짝수 차수 체비셰프 저역 통과 원형 여파기 (lowpass prototype filter)의 극점을 옮겨 상보형 여파기의 저역 통과 원형 여파기의 소자 값을 계산하였다. 동축형 유전체 공진기(coaxial dielectric resonator)를 이용해 2.3 GHz 휴대 인터넷(WiBro) 대역의 대역 통과 여파기와 진폭 등화기를 설계, 제작하여 통과 대역 내 평탄도를 개선하였다.

II. 본 론

2-1 진폭 등화기 설계 이론

고차의 대역 통과 여파기를 제작하면 공진기의 유한한 Q 에 의해 중심 부분이 불룩하게 되는데 이러한 진폭의 왜곡을 보상해 주기 위한 회로가 진폭 등화기이다. 그림 1과 같이 진폭 등화기는 일종의 여파기로 중심 부분에서 오목한 모양을 가지며, 대역 통과 여파기 뒤에 놓여 불룩한 부분을 상쇄시킨다^[2].

이때 리플은 통과 대역 내 이득의 최대/최소값의 차이를 말하며, 체비셰프 원형 여파기의 이상적인 리플 크기인 L_{Ar} 로 제작하여 얻은 리플의 크기는 R 이다. 통과 대역 내에서 대역 통과 여파기와 반대되는 기울기의 주파수 응답을 보이는 진폭 등화기의 여파기를 상보형 여파기라 하며, 대역폭은 최대값을 갖는 두 개의 공진점 사이의 주파수 차이로 하고 대역폭 내의 최대/최소값의 차이인 리플의 크기는 R_s 라고 한다.

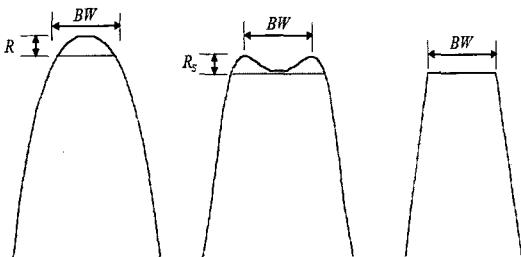


그림 1. 진폭 등화기의 원리
Fig. 1. Concept of amplitude equalizer.

2-1-1 2차 상보형 여파기

2차 상보형 여파기의 경우 2차 대역 통과 여파기와 같이 기대할 수 있는 리플의 크기가 한정된다. 그림 2는 fractional 대역폭 W 가 1일 때, 2차 체비셰프 원형 리플 크기(L_{Ar})와 2차 상보형 여파기의 결합계수 k , 리플 R_s 의 관계를 함께 도식한 것이다.

그림 2에서 알 수 있듯이 설계 리플 크기 L_{Ar} 이 커질수록 여파기의 결합계수 크기가 감소하며 리플의 크기가 증가한다. 그러나 결합계수의 변화량이 점점 줄어 제작에 한계가 있으며, 초단과 중단의 결합이 매우 작아 모든 주파수 대역에서 정합이 어렵고 삽입 손실이 매우 크다. 따라서 제작에 유리한 큰 결합계수로 원하는 리플 크기를 얻을 수 있는 고차 상보형 여파기의 설계가 필요하다.

2-1-2 고차 상보형 여파기

원형 소자 값을 이용하면 일반적인 대역 통과 여파기 설계 방법으로 고차 상보형 여파기를 설계할 수 있다. 원하는 특성을 갖도록 극점을 이동시켜 얻은 전달함수에 회로망 합성법을 적용하여 원형 소자 값을 계산한다. 극점은 각주파수 성분 ω 와 손실 성분 σ 로 구성되어 있다. 체비셰프 여파기의 스킵트 특성을 유지하도록 극점의 σ 는 고정하고 각주파수 성분 ω 만을 최외곽으로 옮겼다.

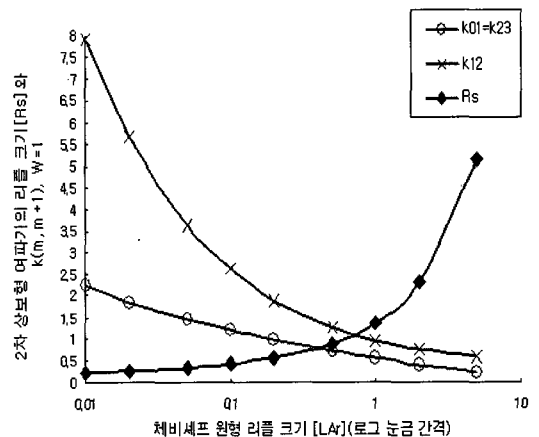


그림 2. 2차 상보형 여파기의 결합계수와 리플 크기
Fig. 2. Coupling coefficients and ripple of 2th order complementary shaping filter.

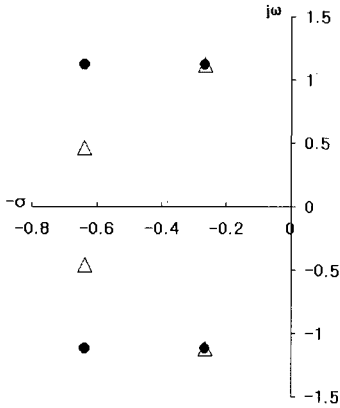


그림 3. 통과대역 극점의 이동(●: 0.1 dB 리플 4차 상보형 여파기의 극점, ▲: 0.1 dB 리플 4차 체비셰프 여파기의 극점)

Fig. 3. Rearrangement of passband poles(●: poles of 0.1 dB ripple 4th order complementary shaping filter, ▲: poles of 0.1 dB ripple 4th order Chebyshev filter).

$$\sigma_k = \sin \frac{(2k-1)\pi}{2n} \sin h(v), k=1, 2, \dots, n$$

$$\omega_k = \cos \frac{\pi}{2n} \cos h(v) \quad (1)$$

$$T_2(\omega) = 2\omega^2 - 2\omega_k^2$$

$$T_4(\omega) = 8\omega^4 - 16\omega^2\omega_k^2 + 8\omega_k^4$$

$$T_6(\omega) = 32\omega^6 - 96\omega^4\omega_k^2 + 96\omega^2\omega_k^4 - 32\omega_k^6$$

$$T_n(\omega) = 2^{(n-1)}(\omega + \omega_k)^{n/2}(\omega - \omega_k)^{n/2} \quad (2)$$

식 (1)과 같이 옮겨진 극점으로 체비셰프 다항식을 수정하면 식 (2)와 같다. 옮겨진 극점의 전달함수를 제 1 카우어형으로 합성하기 위하여 분자와 분모를 내림차순으로 정리한 후 연분수로 전개하여 상보형 여파기의 저역 통과 원형 소자 값을 계산한다^[4]. 표 1은 수정된 체비셰프 다항식으로부터 회로망 합성법을 통해 계산된 4차 상보형 여파기의 원형 소자 값이다.

계산된 원형 소자 값을 사상 함수를 이용한 일반적인 대역통과 여파기 설계 방법에 대입하여 상보형 여파기를 설계할 수 있다. 대역 통과 여파기와 진폭 등화기를 연결하였을 때 원하는 평탄도와 대역폭을 얻기 위하여 상보형 여파기의 리플 크기와 대역폭은 대역 통과 여파기 리플 크기의 약 0.7배^[5], 대역폭은

표 1. 4차 상보형 여파기의 원형 소자 값

Table 1. Prototype element values for 4th order complementary shaping filter.

($g_0=1, \omega_c=1$)

L_{Ar}	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
0.01	0.7128	0.4972	3.1253	0.1134	6.2858
0.02	0.8053	0.5184	3.7486	0.1114	7.2315
0.05	0.9587	0.5372	4.9715	0.1036	9.2537
0.1	1.1088	0.5410	6.4331	0.0932	11.8904
0.2	1.3028	0.5320	8.7850	0.0789	16.5123
0.5	1.6703	0.4939	14.9713	0.0551	30.3078
1	2.0990	0.4409	25.7583	0.0359	58.4212

1.4배 정도로 유지한다.

결합계수 k 는 공진기 간의 결합을 정량적으로 표시해 주는 여파기의 중요한 설계 인자로 아래의 식과 같이 정의되며 여파기의 중심 주파수, 대역폭, 리플의 크기와 차수에 의해 결정된다^[6].

$$k_{m, m+1} = \frac{W}{\sqrt{g_m g_{m+1}}} \quad (3)$$

$m, m+1$ 번째 공진기 간의 결합계수 $k_{m, m+1}$ 은 $g_m g_{m+1}$ 의 제곱근에 반비례하며, g 는 여파기의 차수 n 과 설계 리플의 크기 L_{Ar} 에 따라 달라진다. 차수와 리플이 결정되면 $g_0 g_1$ 값은 고정된다. m 이 0보다 클 때, 체비셰프 여파기의 $g_m g_{m+1}$ 크기는 중심 값을 축으로 증감하는 데 비해 극점의 위치를 옮겨 상보형 여파기로 합성할 경우에는 $g_{2m-1} g_{2m}$ 은 작아지고 $g_{2m} g_{2m+1}$ 은 커져 톱니모양으로 변화한다. 이것은 2차 상보형 여파기가 적절한 결합에 의해 연결된 것으로 볼 수 있다.

변형된 원형 소자 값으로 상보형 여파기를 설계하였을 때 얻을 수 있는 리플 크기는 그림 4와 같이 증가한다. 이를 통해 원하는 리플 크기를 선택하여 상보형 여파기를 설계할 수 있다.

2-2 진폭 등화기의 구성

진폭 등화기의 오목한 통과 대역 특성에 의해 반사 손실이 매우 크므로 그림 5와 같이 상보형 여파기 전후에 증폭기나 감쇠기를 연결한다^[2].

본 논문에서는 그림 5(2)의 구조를 선택하여 제작하였다. 증폭기의 이득으로 대역 통과 여파기와 상

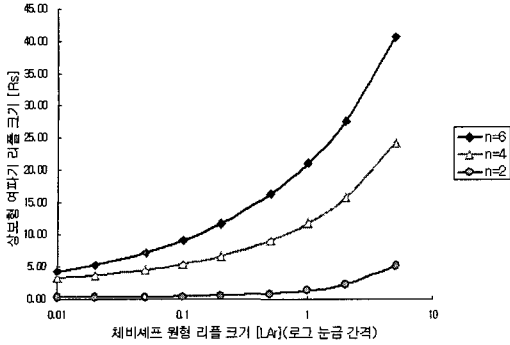


그림 4. 상보형 여파기의 리플 크기
Fig. 4. Ripple of complementary shaping filter.

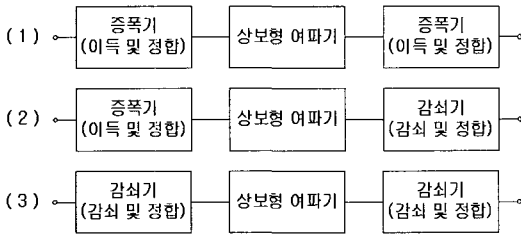


그림 5. 진폭 등화기의 구조
Fig. 5. Structures of amplitude equalizer.

보형 여파기에서 발생하는 손실을 보상하고 증폭기의 정합을 통해 상보형 여파기의 반사 특성을 개선시킬 수 있다. 또한 감쇠기를 연결하여 진폭 등화기의 이득 크기를 조정하였다.

2-3 설계 및 제작

대역 통과 여파기와 그림 5(2) 구조의 진폭 등화기를 연결하여 중심 주파수 2,345 MHz에서 27 MHz의 대역폭(1.15 %)을 가지는 휴대 인터넷 대역 통과 여파기를 비유전율 19.5, 품질계수 560인 사각 동축형 유전체 공진기(ϕ 2.35, 6×6 mm)를 사용하여 설계, 제작하였다.

대역 통과 여파기는 전계 결합형의 J 인버터를 이용하여 콤팩트 구조의 0.1 dB 13차 체비세프 여파기로 설계하였다. 정확도를 높이기 위하여 결합계수를 측정하여 제작하였다. 제작된 여파기의 주파수 응답 특성과 군지연 특성은 그림 6, 그림 7과 같다.

그림 6에서 통과 대역 내 리플 크기가 11 dB로 평탄도가 매우 크게 훼손된 것을 확인할 수 있다.

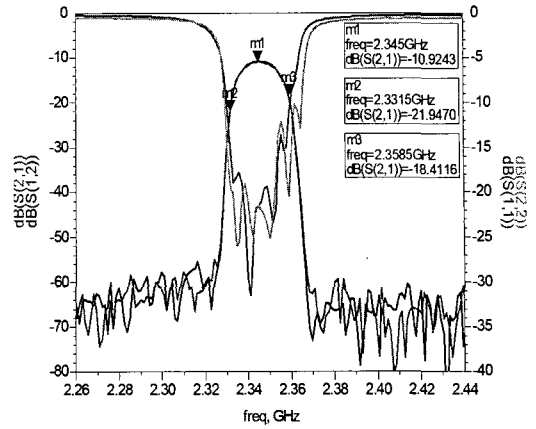


그림 6. 대역 통과 여파기의 주파수 응답 측정 결과
Fig. 6. Measured frequency response of the bandpass filter.

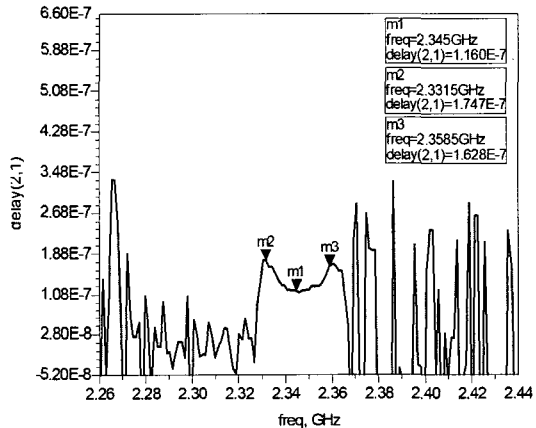


그림 7. 대역 통과 여파기의 군지연 측정 결과
Fig. 7. Measured group delay of the bandpass filter.

대역 통과 여파기의 제작 결과를 토대로 4차 상보형 여파기를 제작하고 Agilent사의 ABA- 54563을 사용하여 23 dB의 이득을 갖는 증폭기와 저항을 이용한 π 형 3 dB 감쇠기를 연결하여 진폭 등화기를 구성하였다. 그림 8과 그림 9는 제작한 진폭 등화기의 측정 결과이다.

진폭 등화기의 중심 주파수는, 2,346 MHz이다. 대역 통과 여파기의 1.3 배인 34 MHz의 통과 대역폭을 가지고 리플의 크기는 7 dB로 대역 통과 여파기 리플의 0.6배이다.

대역 통과 여파기와 진폭 등화기를 연결한 여파기는 그림 10과 같으며, 주파수 응답과 군지연 측정 결과는 그림 11, 그림 12에 나타내었다.

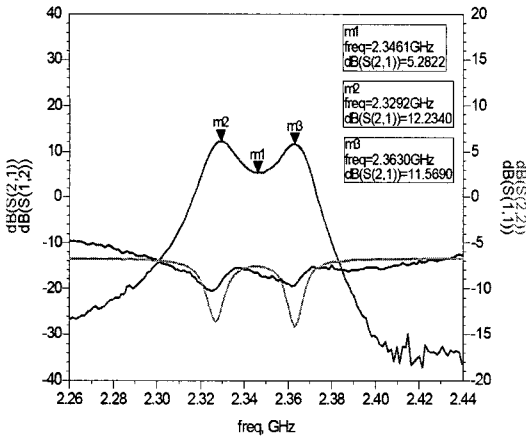


그림 8. 진폭 등화기의 주파수 응답 측정 결과
Fig. 8. Measured frequency response of the amplitude equalizer.

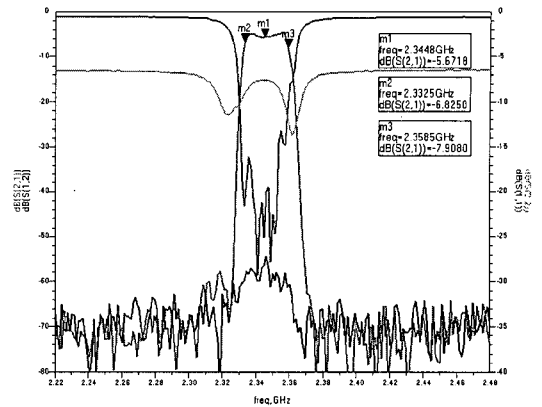


그림 11. 개선된 대역 통과 여파기의 주파수 응답 측정 결과
Fig. 11. Measured frequency response of the bandpass filter compensated by amplitude equalizer.

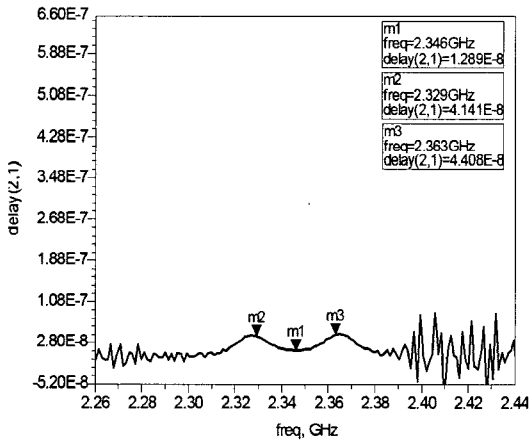


그림 9. 진폭 등화기의 군지연 측정 결과
Fig. 9. Measured group delay of the amplitude equalizer.

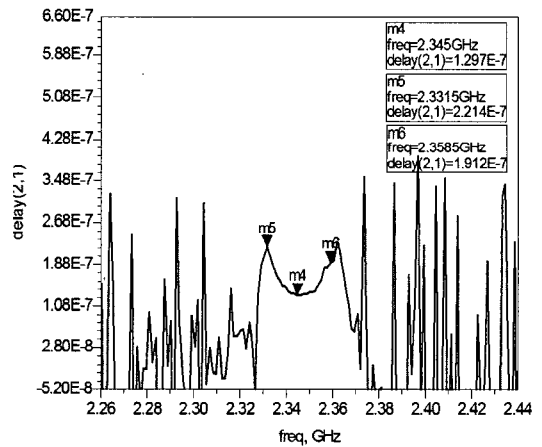


그림 12. 개선된 대역 통과 여파기의 군지연 측정 결과
Fig. 12. Measured group delay of the bandpass filter compensated by amplitude equalizer.

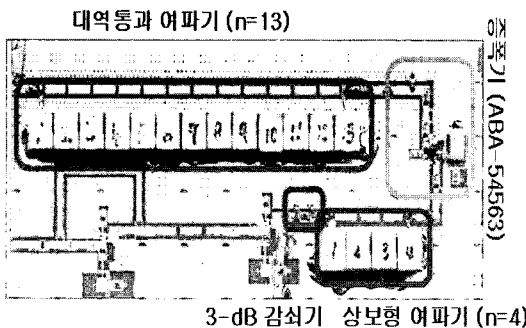


그림 10. 평탄도가 개선된 대역 통과 여파기
Fig. 10. The bandpass filter compensated by amplitude equalizer.

진폭 등화기의 증폭기에 의해 삽입 손실이 감소하였으며 통과 대역 내 리플이 11 dB에서 2.4 dB로 개선되었다. 군지연 특성의 경우에는 상보형 여파기에 의해 늘어난 차수에 의해 통과 대역 내 변화량이 증가하였다.

III. 결론

본 논문에서는 짝수 차수의 체비셰프 다항식을 수정하여 계산한 원형 소자 값을 통하여 설계한 상보형 여파기와 증폭기, 감쇠기로 구성된 진폭 등화

기를 연결하여 2.3 GHz 휴대 인터넷 대역에서 통과 대역 내 평탄도를 개선한 유전체 공진기 여파기를 설계, 제작하였다.

제작한 대역 통과 여파기는 중심 주파수 2,345 MHz에서 대역폭이 27 MHz로, 0.1 dB 리플의 13차 대역 통과 여파기와 리플 1 dB인 4차 상보형 여파기를 포함하는 진폭 등화기로 구성하였으며, 통과 대역 내 평탄도는 ± 1.2 dB로 진폭 등화기를 연결하지 않은 여파기에 비해 8.6 dB 개선되었다.

본 논문에서 제시한 상보형 여파기의 원형 소자 값은 다양한 리플 크기의 진폭 등화기 설계에 적용이 가능하다.

참 고 문 헌

[1] 윤영중, 이재현, 박광량, 김재명, "Ku-Band 위성 중계기용 진폭 등화기 설계에 관한 연구", 대한전자공학회 추계종합학술대회 논문집, 15(2), pp. 85-89, 1992년 11월.

[2] H. -Y. Hwang, J. -S. Chung, and S. -W. Yun, "A new type of amplitude equalizer for in-band flatness improvement", *Microwave Journal*, vol. 45, no. 2, Feb. 2002.

[3] B. W. Kim, D. I. Yun, and S. W. Yun, "A varactor-tuned RF tunable bandpass filter with improved passband flatness", *Journal of KEES*, vol. 2, no. 2, pp. 124-127, Nov. 2002.

[4] G. C. Temes, J. W. LaPatra, *Introduction to Circuit Synthesis and Design*, McGraw-Hall, pp. 164-531, 1977.

[5] 문수덕, 최경, 황희용, "통과대역 평탄도를 개선한 대역통과 필터에 관한 연구", 춘계 마이크로파 및 전파전파 학술대회 논문집, 28(1), pp. 295-298, 2005년 5월.

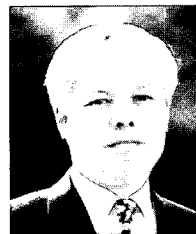
[6] G. L. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks and Coupling Structures*, Artech House, 1980.

이 송 이



2004년 2월: 한국항공대학교 전자 및 항공전자공학과 (공학사)
 2004년 3월~현재: 서강대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 초고주파 회로설계

윤 상 원



1977년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1979년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 1984년 2월: University of Texas at Austin (공학박사)
 1988년 1월~12월: University of Texas at Austin 방문교수
 1984년 9월~현재: 서강대학교 전자공학과 교수
 [주 관심분야] 초고주파 및 밀리미터파 회로 설계, RF 시스템