

논문 2009-46TC-9-7

고 효율 인덕터를 이용한 우수한 고조파 억압 특성을 갖는 저역 통과 필터 합성 및 설계

(A Synthesis and Design of the LPF with Novel Spurious Suppression
Characteristics Using High Efficiency Inductor)

김 유 선**, 안 재 민**, 표 현 성**, 이 혜 선**, 임 영 석*

(Yuseon Kim, Jaemin An, Hyunseong Pyo, Hyesun Lee, and Yeongseog Lim)

요 약

본 논문에서는 고 효율 인덕터 특성이 저역 통과 필터의 고조파 성분 억제에 미치는 정량적인 영향에 관한 새로운 접근 방안을 제안한다. 적용될 고 효율 인덕터의 정확한 소자 값을 추출하기 위해 신뢰성 있는 De-embedding 과정을 적용 하였다. 게다가, 이들의 효과적인 적용 및 비교를 위해, 같은 스펙을 갖는 다양한 계단 임피던스 저역 통과 필터들을 각각 설계하였다. 제안된 과정은 전체 필터 성능을 제어하고 정해진 스펙으로부터 합성되는 등가 회로를 구성하기 위해 효과적으로 응용될 것이라 기대된다.

Abstract

This paper propose the new approach of the quantity effect by high efficiency inductor characteristic to the harmonic suppression of the lowpass filter. We applied the reliable de-embedding process in order to extract the precise elements values. Moreover, for the effective its application and comparison, the variable stepped impedance low pass filters with a same specification are designed. The proposed procedure is expected to handle the overall filter performance and to construct a synthesized equivalent circuit from its determined specification.

Keywords : Microwave passive element, Inductor, Low pass filter

I. 서 론

현대의 무선통신 시스템에서 저역 통과 필터는 하모닉 성분 제어를 통한 전자 회로의 안정성 확보를 위해서 필수적인 요소이다. 중간 주파수 영역(IF)에서 주로 PLL 부분에 삽입되는 저역 통과 필터 설계는 주파수 파장에 비해 선로의 길이가 매우 짧기 때문에, 상용화된 집중 소자들을 이용하여 각각을 연결하여도 크게 문제가 되지 않지만^[1], 주파수 상향된 Front-End Module의 고주파 영역에서는 주파수 파장에 비해 선로의 길이

를 무시하기 어렵고, 다 차 모드 발생, 표피 효과에 의한 삽입 손실 등과 같은 효과들로 인해, 상용화된 집중 소자들의 패키징을 위해서 추가되는 변수들을 고려해야만 한다^[2]. 더욱이, 주기성을 갖는 선로 특성은 상측 대역에서 규칙적인 하모닉 성분을 발생시키게 되고, 이러한 하모닉 성분이 전체 회로에 미치는 영향에 대한 연구들은 현재까지 거시적인 접근이 선호되고 있다. 즉, 반복적인 관찰과 직관에 의존한 파라미터 변화에 따른 필터 특성에 대한 연구들은 소자의 정확한 주파수 특성을 예측하기 어렵게 하고, 반사 특성만을 최적화하여 시스템 레벨에 적용하기 때문에 최적화 과정을 반복적으로 수행하여야 한다. 특히, 능동 회로와 Cascade 연결 시에는 예측하지 못한 하모닉 성분들이 종종 발생하

* 평생회원, ** 학생회원, 전남대학교 전자컴퓨터공학과
(Dept. of Electronics and Computer Engineering,
Chonnam Nat.University)

접수일자: 2009년5월21일, 수정완료일: 2009년9월14일

게 되고, 이에 따르는 불확실성을 제거하기 위해서는 반사 특성뿐만 아니라 임피던스 특성 또한 예측가능 해야 할 것이다. 필터의 정확한 임피던스 특성 추출을 위해서는 필터를 구성하는 소자들이 주파수에 독립적으로 작동해야 하고, 손실 성분 또한 제어되어야 한다. 고주파 영역의 기존의 저역 통과 필터 설계에 있어서 손쉬운 방법은 버터워스, 체비세프 함수의 Pole과 Zero로부터 계산된 전달함수를 주기적 배열하여 초기 프로토타입을 얻어내고 이를 원하는 필터 특성에 맞게 스케일링하여 등가회로를 구성하고, 리차드 변환법이나 계단 임피던스로 구현하는 방법이 있다^[2]. 하지만, 이는 전송선로의 주기적 특성으로 인하여 필연적인 고조파 성분이 발생하게 되는 단점이 있다. 이에 대한 구조적인 해결 방법으로 아령 형태의 결합 접지 구조를 이용하여 차단 대역에 전송 영점 발생^[3-5], 접지 면 사이의 간격을 규칙성 있게 배열함으로써, 그 결과를 관찰하여 특성 개선을 해왔었다^[6]. 본 논문에서는 이와는 다른 관점으로 인덕터 내부 소량의 커패시터 성분에 의해 전송 영점을 발생 시키지 않더라도 높은 자기 공진 특성과 차단 대역에서의 낮은 품질 계수로 인하여 고조파가 억제될 수 있을 것이라 가정하였다. 또한 분산 소자 내부의 기생 성분을 억제하고 집중 소자들로 이루어진 소자 값들을 추출함으로써, 이를 저역 통과 필터에 적용 시, 회로의 임피던스 특성을 임의의 대역에서 예측 가능하도록 설계하는 것에 그 목표를 둔다.

앞선 목표를 달성하기 위해 각 부분 별로 de-embedding 한 결과와 계단 임피던스 계산식과 비교하여 이를 검증한 후에 라이브러리를 만들고 이를 7차 체비세프 저역 통과 필터 설계에 적용하였다.

II. 소자 값 추출 및 라이브러리

1. 소자 값 추출

본 논문에서는 단위 길이에 대한 인덕터 효율이 우수하다고 알려진 결합 접지 구조를 이용하여 시뮬레이션 및 실험을 통해 소자 값들을 추출하고 검증 하였다. 결합 접지 면을 갖는 microstrip 선로는 커패시턴스 값들이 매우 적으므로 원하는 인덕턴스 값을 갖는 인덕터 구현 시에 짧은 길이만을 필요로 하고, 그 결과 적은 기생 커패시턴스 값과 적은 도체 손실, 유전체 손실을 갖는다^[3-7]. 즉, 특정한 인덕터 설계 시에 다른 구조에 비해 방사 손실이 microstrip 선로에 비해 많은 양이 발생

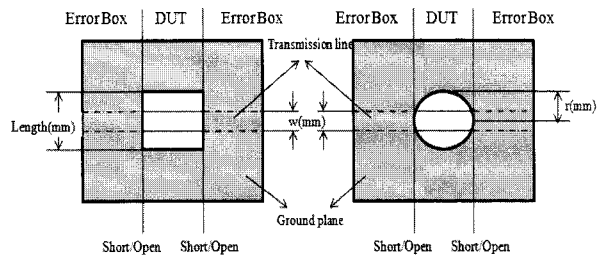


그림 1. 소자 값 추출 위한 참조 면
Fig. 1. Reference plane for parameter extraction.

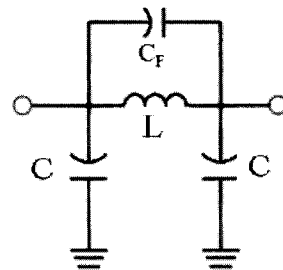


그림 2. 등가 회로
Fig. 2. Equivalent Circuit.

할 것이라 예상 될 수 있지만, 적절한 결합 접지 면적을 사용할 경우 높은 자기 공진 주파수 (SRF)와 공진 주파수 내에서 높은 품질 계수(Q)를 갖는다^[7]. 결합 면이 충분히 넓을 경우, 그림 2의 신호 도체와 그라운드 사이의 전위차로 인한 커패시턴스인 C는 무시할 수 있을 정도로 미소한 크기를 갖는다. 하지만, TEM 모드로 해석하기 어려운 상층 주파수에서는 불안정한 전계 형성에 따른 전력 누설로 인하여 특정 모드에서 불요 방사될 수 있음에 유의해야 한다. 한편, 특성 임피던스가 주어지고, 길이가 주파수 파장에 $\lambda_g/8$ 이하일 경우에는 아래와 같이 정리될 수 있다.

$$L = (Z_0 \sqrt{\epsilon_e} l) / c_0, l \leq \lambda_g / 8$$

$$= Z_0 \tan(\beta l) / (2\pi f), l > \lambda_g / 8$$
(1)

$$C = (\sqrt{\epsilon_e} l) / Z_0 c_0, l \leq \lambda_g / 8$$

$$= \tan(\beta l) / (Z_0 2\pi f), l > \lambda_g / 8$$
(2)

여기서 ϵ_e 는 실효 유전율이고, c_0 는 자유 공간에서의 전파 속도이다. 그림 3은 식 (1)~(2)로부터 계산된 수식과 de-embedding 과정을 이용하여 추출한 라이브러리 값을 같이 도시한 것이다. 계산과 de-embedding의 결과가 서로 매우 잘 일치 하는 것을 보인다. 탄젠트 함수 특성에 의해서 $\lambda_g/8$ 주변에서는 미소한 오차를 보

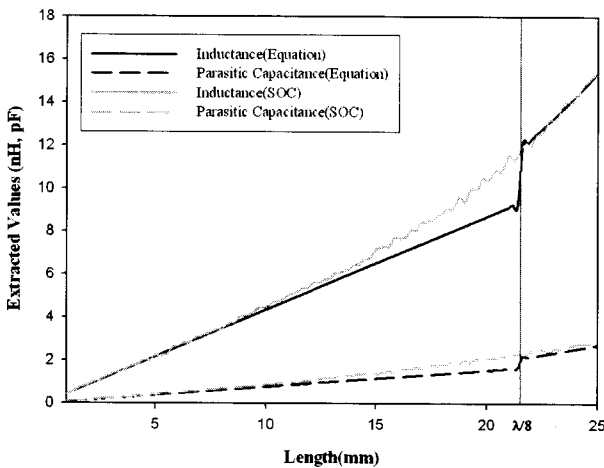


그림 3. 75 ohm 마이크로 스트립 선로로부터 추출된 인덕턴스와 커패시턴스

Fig. 3. Extracted inductances and capacitances from the 75 ohm micro stripline.

이다.

한편, Error box의 영향이 제거된 A, B, C, D의 행렬 값과 그림 2의 소자들 간의 관계는 다음과 같다^[8].

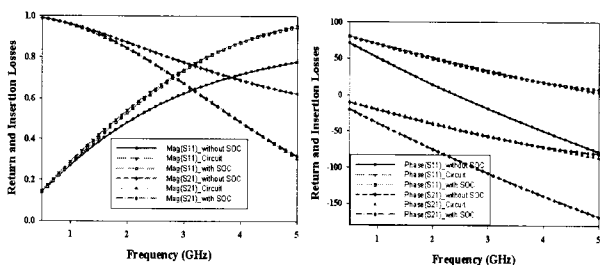
$$A = 1 + (j\omega C)/(j\omega C_F + 1/j\omega L) \quad (3)$$

$$B = 1/(j\omega C_F + 1/j\omega L) \quad (4)$$

$$C = j2\omega C + (j\omega C)^2/(j\omega C_F + 1/j\omega L) \quad (5)$$

$$D = 1 + (j\omega C)/(j\omega C_F + 1/j\omega L) \quad (6)$$

그림 4는 그림 1에서 Length = 5.6 mm, W = 0.4 mm 이고 비유전율 4.2, 높이 0.6mm 인 물리적 변수가 주어졌을 때, 보정과정을 행한 것과, 행하지 않은 결과와 de-embedding된 A, B, C, D 값을 식 (3)~(6)을 각 소자에 대한 값으로 정리하여 추출한 값인 L=5.077 nH, C_F=



(a) Magnitude

(b) Phase

그림 4. DGS의 산란 파라미터들의 비교.

Fig. 4. The comparisons of scattering parameters of the DGS.

0.102 pF, C=0.082 pF을 그림 2의 등가회로에 대입하여 회로 해석한 것의 산란 파라미터들의 크기와 위상을 비교 도시한 것이다. 추출된 값을 적용한 회로 해석 결과와 보정된 결과가 매우 잘 일치함을 보였다. 또한 그림 1의 정사각형 모양의 결합 접지 면과의 크기와 위상을 de-embedding을 적용했을 경우와 적용 하지 않았을 경우도 함께 비교 도시하였다.

2. 라이브러리

DGS 구조의 경우 물리적인 접지가 불가능 하므로 식 (3)~(6)과 아래의 입력 임피던스 계산식을 이용하여 가상의 접지를 하였다.

$$Z_{IN} = \frac{A \cdot Z_L + B}{C \cdot Z_L + D} \quad (7)$$

Z_L = 0 이므로, 단락 시의 입력 임피던스는 B/D 로 표현 된다. 즉, 한 쪽 방향의 커패시턴스 값이 사라지게 되고, 피드백 커패시턴스와 다른 쪽 방향의 커패시터는 서로 더해지게 된다. 결과적으로, 인덕터 내부의 전체 기생 커패시터 량을 유추할 수 있다^[7].

이와 같은 과정의 반복을 통해 개구 면의 크기를 0.2 mm 단위로 증가 시키며 라이브러리를 형성한 예를 그림 5에 도시하였다. 결합 접지 면을 갖는 선로는 microstrip 선로에 비해 길이 변수 증가에 따른 인덕터 효율이 매우 우수함을 보인다. 하지만, 개구 면적이 지나치게 넓어지게 되면 방사 손실 또한 증가하게 되어 인덕턴스 크기에 대한 SRF 수치는 개선되지만, 주파수에 대한 품질 계수 (Q) 값의 최대 점은 600MHz 아래로

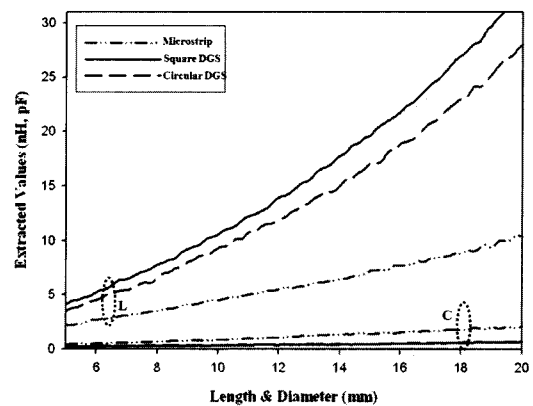
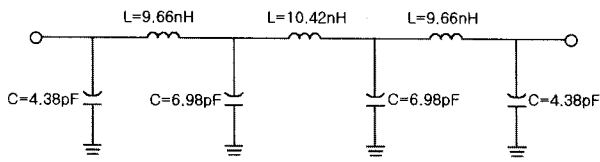
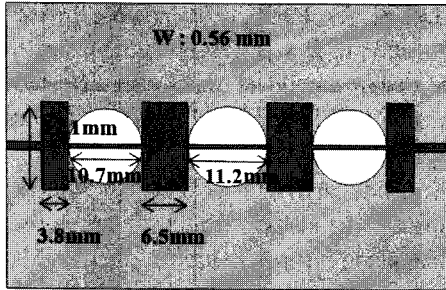


그림 5. 결합 접지 구조들과 Microstrip 선로의 추출된 값

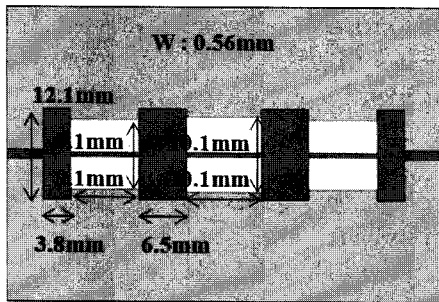
Fig. 5. The extracted values of Defected ground structures and microstrip line.



(a) 7차 LPF의 등가 회로



(b) 원형 DGS 인덕터가 적용된 구조도



(c) 정사각형 DGS가 적용된 구조도

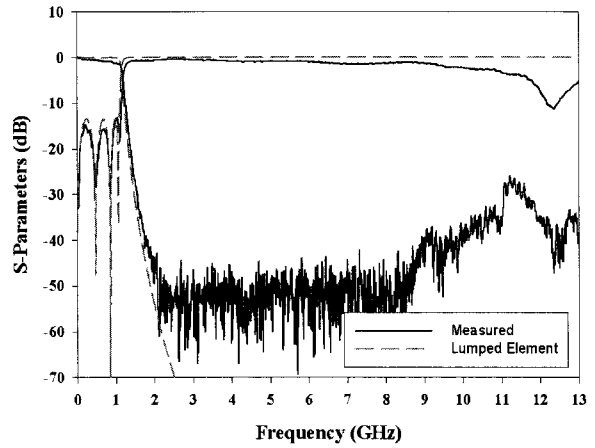
그림 6. 필터 합성 및 설계

Fig. 6. Filter synthesis and design.

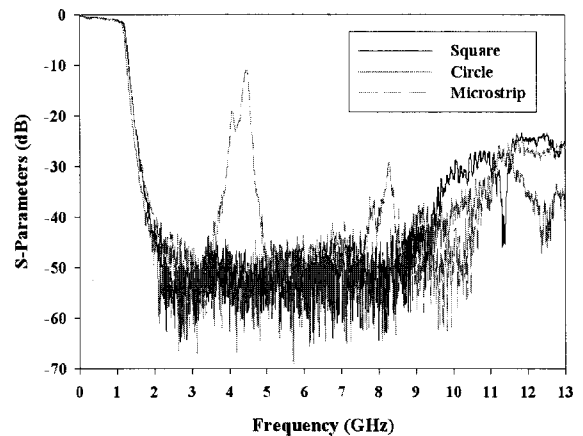
내려가게 되므로 반복적인 라이브러리 구성을 통해 효율적인 SRF 수치와 Q 값을 갖는 결합 면적에 대한 선택으로 폭을 고려하였다^[7].

III. 저역 통과 필터에의 응용 및 검증

본 논문에서는 앞 절의 결합 접지 구조의 특성을 고려하여 3 dB 차단 주파수가 1.2 GHz 이고, 통과 대역 리플이 0.2 dB 인 7차 체비세프 저역 통과 필터의 등가 회로를 합성하고 필요한 소자 값 구현을 위해 그림 5의 데이터를 이용하였다. 리플 계수는 통과 대역에서의 평탄 특성과 효율이 높고 구현 가능한 소자 범위 안에서 선택 하였다. 구조로 구현할 7차 저역 통과와 등가회로와 소자 값들은 그림 6(a)에 도시 및 표기하였다. 그림 6(b)와 6(c) 는 정해진 필터 특성에 따라 정사각형 DGS와 원형 DGS 라이브러리와 커패시터 라이브러리가 적용된 저역 통과 필터의 구조 변수를 나타내었다. 정사



(a) 원형 DGS 인덕터를 이용한 결과



(b) S21 특성 비교

그림 7. 회로 해석과 측정 결과

Fig. 7. The circuit analysis and measurement.

각형 DGS를 이용한 인덕터 설계가 원형 DGS를 이용한 설계에 비해 소형화 관점에서 고 효율을 보인다. 그림 7(a)에는 그림 6(a)의 회로 해석 결과와 그림 6(b)의 구조 해석 결과를 비교도시 하였다. 0.2 GHz에서 10 GHz 사이의 회로 해석 결과와 측정 결과 간의 산란파라미터의 크기 오차는 0.5 % 이내로 관찰되었다. 또한, 통과 대역 내에서 높은 Q값을 갖고 높은 SRF를 갖는 인덕터를 라이브러리에서 선택함으로써, PCB는 도체 손실과 유전체 손실이 적지 않음에도 불구하고, 통과 대역에서 0.9 dB 이하의 저 손실 특성과 등가 회로 해석 결과와 일치하는 특성을 얻을 수 있었다. Cut-off 주파수에서부터 10GHz 사이는 낮은 Q 값과 높은 SRF의 인덕터 특성, 분포 정수 회로 소자의 주기적 특성, microstrip 선로로 구현된 커패시터의 주파수 의존적인 특성 등을 고려하여 효과적으로 고조파를 억제하였다.

하지만, 10GHz 이후에서는 결합 면을 통한 방사에 의한 손실이 발생함을 보인다.

그림 7(b)에는 기존의 microstrip Stepped Impedance 필터와 DGS Stepped Impedance 필터 특성을 비교 도시하였다. 기존의 microstrip 구조를 이용한 인덕터는 그림 5와 그림 6(a)를 참고하여 20 mm 근방의 라이브러리를 사용하였고, 커패시터는 비교를 위해 DGS 구조와 같은 구조를 적용하였다^[2]. 그림 7(b)를 참고하여, microstrip의 경우 그림 5의 기생 커패시터와 Stepped Impedance의 주파수 의존적인 특성의 결합에 의해서 4GHz 근방에서 1고조파와 8GHz 근방에서 2고조파가 형성된다. 하지만, loss tangent 0.02인 PCB의 높은 손실 특성으로 인한 낮은 Q 값 형성으로 인해 -10dB 이하의 고조파 성분이 관찰 되었다. 한편, DGS 구조들은 그림 5를 참고하여, 낮은 기생 커패시턴스에 인한 높은 자기 공진의 결과로 9GHz 이후에서 1 고조파가 발생함을 관찰하였다. 게다가, 차단 대역에서의 낮은 Q값들(표피 효과에 의한 도체손실, 커패시터 삽입에 따른 유전체 손실, DGS 구조와 커패시터 구조에 기인한 방사 손실)로 인해, 차단 대역에서 평균적으로 -50dB 이하의 매우 우수한 차단 특성과 고조파 억압 특성을 보인다.

IV. 결 론

본 논문의 고효율 인덕터 특성을 이용한 저역 통과 필터 합성 및 설계는 인덕터 내부의 자기 공진 특성, 품질 계수에 의한 영향 등을 라이브러리로 정리하고 인덕터 특성이 필터 특성에 미치는 영향 등을 고찰하였다. 측정 구조의 영향이 제거된 정량적인 라이브러리가 적용된 필터의 측정치는 집중 소자들로 구성된 등가 회로 해석 결과와 잘 일치하였다. 게다가 통과 대역 내에서 품질 계수 값들이 최대 점을 갖는 소자들을 선택하고, 차단 대역에서의 낮은 품질 계수를 갖는 소자 특성, microstrip 선로로 구성된 병렬 커패시터의 주파수 의존적인 특성과 높은 SRF 특성을 갖는 인덕터의 특성의 조합을 효과적으로 필터 설계에 반영되도록 함으로써, 우수한 삽입 손실 특성과 차단 특성을 얻을 수 있었다. 본 논문에서 제시한 과정은 DGS 구조를 이용한 LPF 설계뿐만 아니라 타 구조에도 효과적으로 적용될 수 있을 거라 기대된다.

참 고 문 헌

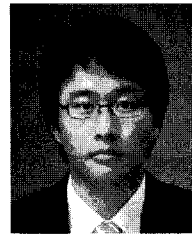
- [1] Simon Haykin, "Communication systems." 4th edition, Wiley, 2001.
- [2] David M. Pozar, "Microwave Engineering." second edition, Wiley, Chapter 2, 4, 8, 1998.
- [3] A. Dal, J. S. Park, C. S. Kim, J. Kim, Y. X. Qian, and T. Itoh, : 'A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure'. IEEE Trans Microwave Theory Tech., Vol. 49, No.1 pp. 86-93, May. 2001.
- [4] J. Y. Kim and H. Y. Lee, : 'Wideband and compact bandstop filter structure using double-plane superposition'. IEEE Microwave Wireless Components Lett., Vol. 13, No.7 pp. 279 - 280, July. 2003.
- [5] J. K. Park, J. P. Kim and S. W. Nam, : 'Design of a novel harmonic-suppressed microstrip low-pass filter'. IEEE Microwave Wireless Components Lett., Vol. 17, No.6 pp. 424 - 426, June. 2007.
- [6] N. C. Karmakar and M. N. Mollah, : "Investigation into nonuniform photonic-bandgap microstripline low-pass filters". IEEE Trans Microwave Theory Tech., Vol. 52, pp. 564-572, Feb. 2003.
- [7] 김유선, 남 훈, 정진우, 임영석, "개구 접지 면과 적층 PCB를 이용한 우수한 민감도를 갖는 미앤더 선로 인덕터 설계" 대한전자공학회 논문지, 제 43 권 TC편 제 12호, pp. 75-82, 2006년 12월.
- [8] 김유선, 남훈, 임영석 "단락 개방 Calibration 방법을 이용한 분포 정수 소자의 기생 소자 추출 및 대역 통과 필터에의 응용", 한국전자과학회논문지, Vol. 20, No. 2, pp. 115-123, 2009년 02월.

저 자 소 개



김 유 선(학생회원)
2004년 2월 전남대학교
전자공학과 (공학사)
2006년 2월 전남대학교
전자공학과 (공학석사)
2006년 2월~현재 전남대학교
전자공학과 박사과정

<주관심분야 : 초고주파 회로 설계 및 해석, RF 소자 설계, 안테나>



안 재 민(학생회원)
2009년 2월 전남대학교 전자
컴퓨터정보통신공학부
(공학사)
2009년 2월~현재 전남대학교
전자컴퓨터공학과
석사과정

<주관심분야 : 초고주파 회로 설계 및 해석, RF 소자 설계>



표 현 성(학생회원)
2009년 2월 전남대학교 전자
컴퓨터정보통신공학부
(공학사)
2009년 2월~현재 전남대학교
전자컴퓨터공학과
석사과정

<주관심분야 : 초고주파 회로 설계 및 해석, RF 소자 설계>



임 영 석(평생회원)
1980년 2월 서울대학교
전자공학과(공학사)
1982년 2월 서울대학교
전자공학과(공학석사)
1989년 2월 전북대학교
전자공학과(공학박사)

1984년 9월~현재 전남대학교 전자공학과 교수
<주관심분야 : 전자파 수치 해석, 초고주파 회로 설계 및 해석, RF 소자 설계, 안테나>



이 혜 선(학생회원)
2009년 2월 전남대학교 전자
컴퓨터정보통신공학부
(공학사)
2009년 2월~현재 전남대학교
전자컴퓨터공학과
석사과정

<주관심분야 : 초고주파 회로 설계 및 해석, RF 소자 설계>