진폭과 위상 특성을 개선한 링 하이브리드 결합기를 사용한 평형 주파수 체배기 회로

Ring Hybrid Balun with Good Amplitude and Phase Balance and Its Application to a Balanced Frequency Doubler

나 원 · 이 문 규

Won Na · Moon Que Lee

요 약

본 논문에서는 두 개의 $\lambda/4$ 단락 스터브를 사용하여 진폭과 위상 평형 특성을 개선한 링 하이브리드(ring hybrid) 회로를 제안하였다. 제안한 회로는 기존 링 하이브리드 결합기에 존재하는 위상과 진폭 비 평형 특성을 $\lambda/4$ 단락 스터브를 통해 보정한 회로이다. 제안한 링 하이브리드 결합기의 성능을 검증하기 위하여 평형 다이오드 주파수 2 체배기 회로를 설계 및 측정하였다. 실험 결과 1.6~2.35 GHz의 대역 내에서 최저 12.3 dB의 변환 손실과 30 dB 이상의 기본 주파수 격리도를 보였다.

Abstract

A modified broad-band ring hybrid balun with additional two shorted $\lambda/4$ stubs is proposed. The proposed balun is a modified version which has additional two shorted $\lambda/4$ stubs to compensate phase and amplitude imbalances of conventional ring hybrid coupler. To demonstrate the validity of the proposed balun, a balanced Schottky-diode frequency doubler is designed and measured. Measurement data show that the proposed frequency doubler has around 10 dB conversion loss and more than 30 dB fundamental suppression over an input range of 1.6~2.35 GHz.

Key words : Balun, Ring Hybrid Coupler, Frequency Doubler

Ⅰ. 서 론

링 하이브리드(ring hybrid) 결합기는 평형 주파수 혼합기 회로, 위상 천이기, 안테나 급전 회로 등에 사용되는 기본적인 마이크로웨이브 소자이다. 그러나 위상 및 진폭 평형 특성 측면에서는 중심 주파수에서만 같은 출력 진폭과 180도 위상 차이를 갖기 때문에 발룬의 용도로 쓰기 위해서는 협대역 특성을 개선해야 한다. 실제 이 협대역 특성을 개선하기 위한 여러 방법이 이전부터 제시되어 왔다[1]~[5].

본 논문에서는 기존 링 하이브리드의 위상 및 진폭 특성을 $\lambda/4$ 스터브를 추가하여 개선한 새로운 링 하이브리드 발룬 구조를 제시하고, 이를 이용한 주파수 체배기 회로를 제작하여 그 성능을 검증하였다. 먼저 링 하이브리드의 협대역 특성을 개선하기 위한 방법을 제시한 후, 발룬을 설계하기 위한 최적화 과정을 기술하였다. 이후 쇼트키 다이오드를 사용한 광대역 평형 주파수 2체배기 회로를 설계 및 제작하였다.

Ⅱ. 본 론

2-1 위상 특성을 보상한 링 하이브리드 발룬

기존의 링 하이브리드 구조는 각 출력으로 $\lambda/4$

서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부(School of ECE, University of Seoul)

· 논 문 번 호 : 20080222-021

· 수정완료일자 : 2008년 6월 23일

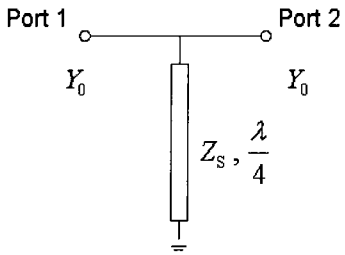


그림 1. $\lambda/4$단락 스터브를 사용한 위상 보정 회로
Fig. 1. Phase compensation circuit using a shorted $\lambda/4$ stub.

전송 선로와 3 $\lambda/4$ 전송 선로가 각각 이어져 있다. 즉, 이 두 경로 사이의 $\lambda/2$의 길이 차에 의해 중심 주파수 이외의 대역에서는 출력의 위상 평형 특성이 나빠지게 된다. 본 논문에서는 이를 보상하기 위하여 그림 1과 같은 위상 보정 회로를 사용하였다.

위의 회로는 중심 주파수에서는 $\lambda/4$ 스터브가 개방된 것으로 보여 출력에 영향을 미치지 않지만, 이외의 주파수 대역에서는 단자 1과 단자 2 사이의 위상을 지연시킨다. 이를 수식적으로 표현하면 다음과 같다. 먼저 단자 1과 2 사이의 S-파라미터를 구해보면 다음과 같다.

$$S_{21}=\frac{2Y_0}{2Y_0+\left[jZ_S\tan\left(\frac{f}{f_{center}}\times 90^\circ\right)\right]^{-1}} \quad (1)$$

여기서 Y_0는 기준 어드미턴스이며, Z_S는 스터브의 특성 임피던스이다. 스터브의 전기적 길이를 수식적으로 나타내기 위해 동작 주파수를 f, 중심 주파수를 f_{center}로 나타내었다. 식 (1)을 살펴보면, 병렬 단락 스터브는 중심 주파수 근처에서 위상의 변화율을 변화시킴을 알 수 있다. 식 (1)의 중심 주파수에서의 위상 변화율은 다음과 같다.

$$\frac{d\angle S_{21}}{df}=-\frac{1}{2Z_S\times Y_0}\times\frac{90^\circ}{f_{center}} \quad (2)$$

위 수식에서 위상의 변화율은 $\lambda/4$ 스터브의 특성 임피던스에 의해 정해짐을 알 수 있다. 그림 2는 스터브의 특성 임피던스 값에 따른 S_{21}의 위상 차이를 보여주고 있다.

그림 3(a)는 일반적인 링 하이브리드의 레이아웃을 보여주고 있다. 앞에서 언급하였듯이 $\lambda/4$ 라인과

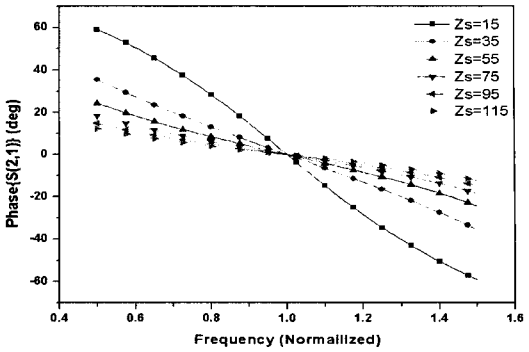
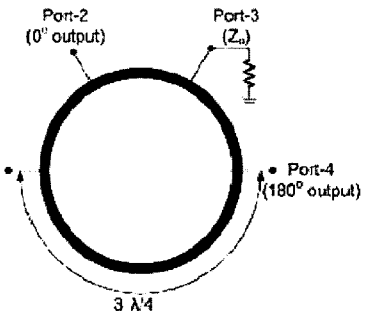
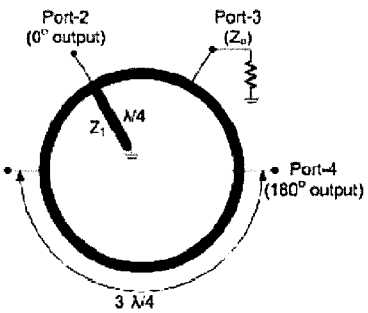


그림 2. 스터브의 특성 임피던스 Z_S에 대한 S_{21}의 위상
Fig. 2. Phase of S_{21} of a shorted $\lambda/4$ stub over its characteristic impedance.



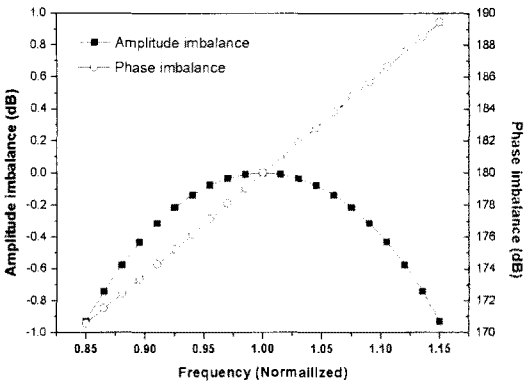
(a) 기존 링 하이브리드
(a) Conventional ring hybrid



(b) 제안된 링 하이브리드(위상 보정된 링 하이브리드)
(b) Proposed ring hybrid(Phase compensated)

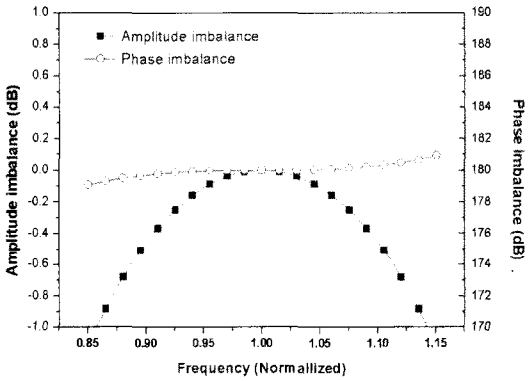
그림 3. 기존의 링 하이브리드와 제안된 위상 보정 링 하이브리드의 모식도
Fig. 3. Structure of proposed and conventional ring hybrid.

3 $\lambda/4$ 라인의 길이 차이로 인하여 중심 주파수 외 대역에서 양 출력 간 위상과 진폭에 차이가 생기게 된다. 그림 4(a)는 Matlab으로 계산한 양 출력의 위상과 진폭 차이를 보여주고 있다. 특히, 위상의 차이가 주



(a) 일반 링 하이브리드의 발룬 특성

(a) Balun characteristic of the conventional ring-hybrid



(b) 제안한 링 하이브리드의 발룬 특성

(b) Balun characteristic of the proposed ring-hybrid

그림 4. 기존 구조와 제안한 구조의 위상 및 진폭 평형 특성

Fig. 4. Phase and amplitude imbalance of conventional ring hybrid and proposed ring hybrid.

파수에 따른 일차 함수 형태임을 보여준다. 따라서, 기존 링 하이브리드에서 발생되는 위상 차이를 보상하기 위해 식 (2)에 의해 정해지는 특성 임피던스 Z_S의 값을 갖는 $\lambda/4$ 스터브를 링 하이브리드 출력에 부착함으로써 중심 주파수 근처에서 위상의 변화율을 상쇄시킬 수 있다. 실제 링 하이브리드 회로의 위상 변화율을 구하기 위해 참고논문 [6]을 참고하였다. 먼저 주파수를 변수로 놓은 후 링 하이브리드 회로를 우모드-기모드 분석하면 주파수의 함수로 양 출력의 S-파라미터가 나오게 된다. 이 S-파라미터의 위상을 주파수로 미분한 뒤 중심 주파수에서 양 출력의 차이를 구하면 0.0318°/MHz로 계산되며, 이를 보상할 수 있는 특성 임피던스의 값은 식 (2)에 의해 35.38 Ω이 된다[6].

그림 3(b)는 $\lambda/4$ 스터브를 통하여 위상이 보정된 링 하이브리드의 모습을 보여주고 있다. 단자 2의 출력에 제안한 위상 보정 회로를 부착하였다. 그림 4(b)는 위상 특성을 보상한 링 하이브리드 회로의 위상과 진폭 특성을 나타낸다. 30 % f/f_{center} 대역폭을 기준으로 1° 이하의 위상 차이를 가짐을 볼 수 있다.

2-2 $\lambda/4$ 스터브를 사용한 진폭 보정 및 링 하이브리드 발룬 설계

앞에서는 기존 링 하이브리드의 위상 특성을 개선하기 위해 출력에 $\lambda/4$ 스터브를 부착하였다. 그러나 $\lambda/4$ 스터브를 부착함으로써 진폭 평형 특성은 중심 주파수의 30% 대역에서 최대 0.9 dB 정도로 0.2 dB 가량 더 악화된다. 결국 진폭 보상을 하기 위하여 본 논문에서는 회로의 나머지 단자에 추가적인 $\lambda/4$ 스터브를 직렬 저항을 통해 부착하였다. 그림 5는 추가적인 진폭 보정 회로가 부착된 제안한 링 하이브리드 발룬의 모식도를 보여주고 있다. 모의 실험을 통해 분석해 본 결과, 제안한 회로가 30 % 대역폭에서 0.4 dB 아래의 진폭 평형 특성을 가지며, 이는 기존 구조에 비해 0.54 dB 향상된 것이다.

이때 단자 4에 부착한 진폭 보정 스터브는 저항 성분과 리액턴스 성분을 동시에 가지게 된다. 즉, 추가적인 위상의 변화가 생기므로 앞장에서 계산한 방법으로는 설계 변수의 값을 정할 수 없다. 즉, 최종적인 설계 변수는 스터브의 특성 임피던스 Z_1, Z_2와

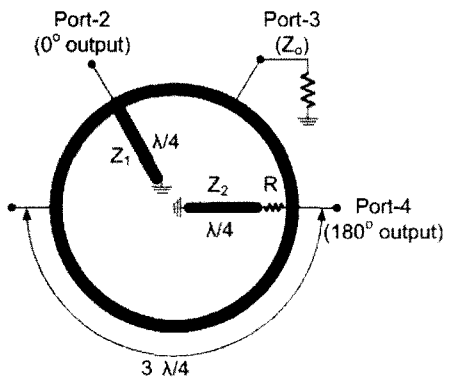


그림 5. 진폭 보정 회로를 포함한 링 하이브리드

Fig. 5. Structure of proposed ring hybrid balun.

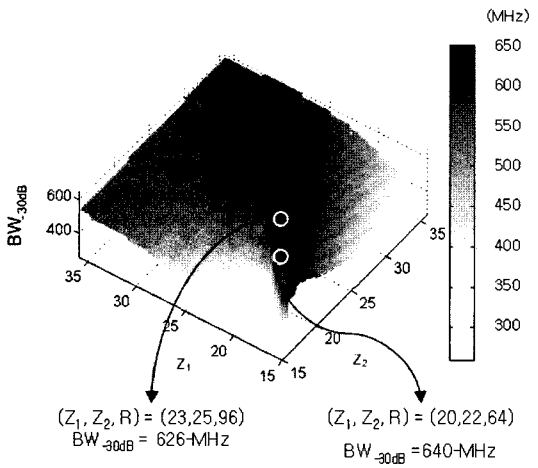


그림 6. 스터브의 특성 임피던스 Z_1, Z_2에 대한 최적화된 30 dB 대역폭

Fig. 6. Optimized $BW_{-30\ dB}$ of the proposed balun vs. characteristic impedance of stub Z_1, Z_2.

직렬 저항 R의 3가지로 수식을 통해 풀 수 없으므로 최적화 과정을 통하여 설계하여야 한다.

설계 목표인 광대역 발룬 회로를 제작하기 위해, 본 논문에서는 주파수 체배기의 특성 중 하나인 기본 주파수 성분의 제거율이 30 dB보다 큰 대역폭을 설계 목표로 하고 이를 최대가 되도록 설계하였다. 이때 링 하이브리드 발룬의 출력에서 기본 주파수 성분 제거율은 다음과 같은 수식으로 정의된다.

$$I = -10\log\left(\frac{1-2\sqrt{G}\cos\phi+G}{1+2\sqrt{G}\cos\phi+G}\right) \quad (3)$$

G는 진폭 오차이며 ϕ는 180도를 기준으로 한 위상의 오차를 나타낸다.

최적화 과정은 다음과 같다. 먼저 스터브의 특성 임피던스 Z_1과 Z_2를 사용하고자 하는 범위 내에서 선택한다. 이후 (Z_1, Z_2)의 각 점에 대해 R값을 최대 대역폭을 갖도록 수치 해석을 통하여 결정한다. 그림 6은 최적화 결과를 3차원 그래프를 통해 보여주고 있다. 이때 (Z_1, Z_2, R)=(23, 25, 96), (20, 22, 64) 인 경우가 최대 대역폭을 가짐을 확인할 수 있다.

Ⅲ. 광대역 평형 주파수 2 체배기

그림 7는 제안한 링 하이브리드 발룬을 사용한 광대역 주파수 체배기 회로의 실제 레이아웃을 나타낸 그림이다. 제안한 주파수 체배기 회로는 제안된 링

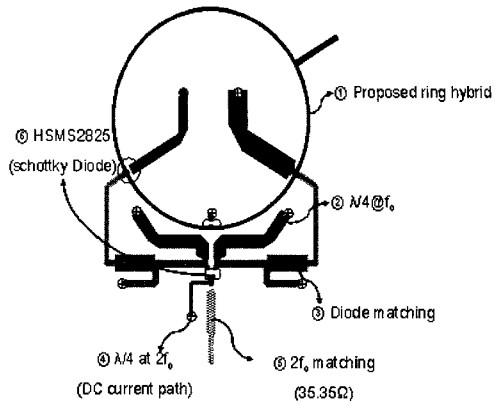


그림 7. 제안한 광대역 주파수 2체배기

Fig. 7. Layout of the proposed wideband resistive frequency doubler.

하이브리드 발룬 회로와 두 개의 Schottky 다이오드, 기본 주파수에서 구성된 다이오드 매칭 회로, 2차 하모닉 주파수에서 구성된 출력 매칭 회로로 구성된다.

평형 주파수 2 체배기 회로는 발룬의 특성으로 인하여 2개의 다이오드 사이가 가상적인 그라운드가 된다. 즉, 기본 주파수의 제거율의 수식에서 보이듯이 발룬 회로의 진폭 평형 특성과 위상 평형 특성이 기본 주파수 제거율을 결정한다. 여기서는 기본 주파수 제거율을 30 dB를 목표로 설계하였다. 모의 실험 결과, 1.7~2.3 GHz 대역에서 기본 주파수 제거율이 30 dB 이하였고, 변환 손실은 최저 12 dB였다.

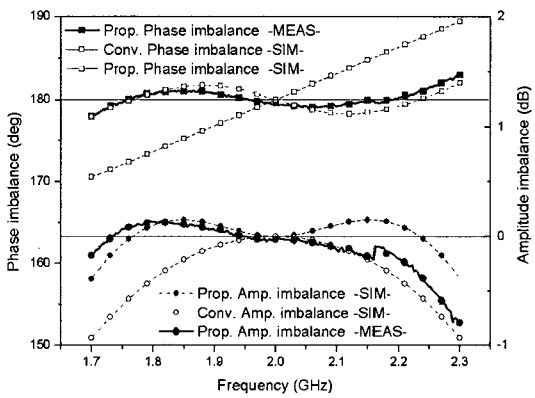


그림 8. 기존의 링 하이브리드 및 링 하이브리드 발룬의 진폭 및 위상 평형 특성

Fig. 8. The phase and amplitude balance of proposed circuit and conventional one.

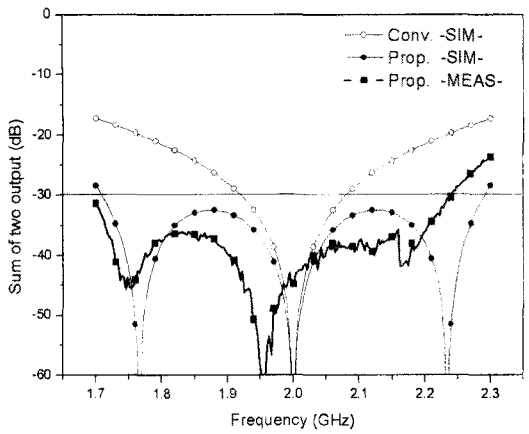


그림 9. 기존의 링 하이브리드 및 링 하이브리드 발룬의 기본 주파수 제거율

Fig. 9. The fundamental frequency rejection ratio of proposed circuit and conventional one.

Ⅳ. 제작 및 측정 결과

기존의 링 하이브리드와 이를 이용한 주파수 2체배기 회로 및 제안한 구조의 링 하이브리드 발룬과 주파수 체배기 회로를 테플론 0.5 mm 두께의 기판을 사용하여 제작하였다.

먼저 제작된 링 하이브리드 결합기의 위상 및 진폭 특성을 Advantest R3767CH 네트워크 분석기를 사용하여 측정하였다. 그림 8은 그 결과의 그래프이다. 기존의 링 하이브리드 결합기에 비해 위상 및 진폭의 차이가 적음을 확인할 수 있다. 또한, 측정된 결과를 식 (3)을 통하여 주파수 체배기의 기본 주파수 제거율로 바꾼 결과가 그림 9이다. 1.7~2.25 GHz 대역 내에서 30 dB 이하의 기본 주파수 제거율을 가짐을 확인할 수 있다.

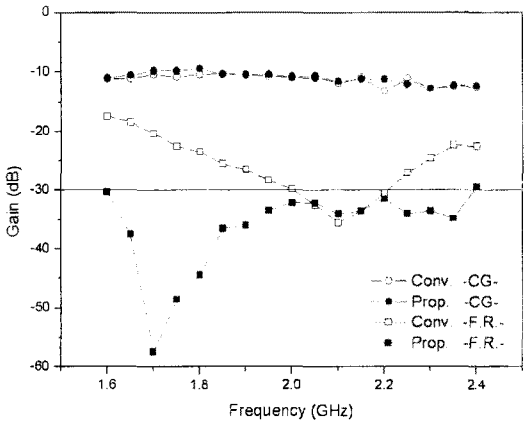


그림 10. 제안된 회로(Prop.)와 기존 회로(Conv.)의 변환 이득(CG) 및 기본 주파수 제거율(F.R.) (P_{in}=+ 8.5 dBm)

Fig. 10. Measured conversion gain(CG) and fundamental frequency rejection ratio(F.R.) is plotted both proposed(Prop.) and conventional(Conv.) when P_{in}=+8.5 dBm.

다음으로 주파수 체배기를 측정하기 위해 HP 8341B 주파수 합성기를 입력 신호로 하고 기본 주파수 및 하모닉 주파수를 Advantest R3272 스펙트럼 분석기를 사용하여 측정하였다. 실험에서 입력 신호의 크기는 체배기의 포화가 시작되는 +8.5 dBm으로 선정하였다. 그림 10은 측정된 주파수 체배기의 변환 손실 및 기본 주파수 제거율을 나타낸 그래프이다. 측정 결과 1.6~2.35 GHz 대역에서 9.4~12.3 dB의 변환 손실과 30 dB 이상의 기본 주파수 제거율을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

Ⅴ. 결 론

기존 링 하이브리드의 위상 및 진폭 특성을 $\lambda/4$ 스터브를 사용하여 개선한 새로운 구조를 제안하였다. 모의 실험 결과, 제안한 구조는 2 GHz 중심 주파수에서 600 MHz 이상의 대역폭을 가지며, 이는 기존 구조에 비해 3.79배 이상 향상된 것이다. 제안한 구조를 사용하여 주파수 2체배기 회로를 제작한 결과, 1.6~2.35 GHz 대역에서 30 dB 이상의 기본 주파수 제거율을 보였다. 기존 링 하이브리드를 사용한 구조와 비교하면 5배 향상된 결과이다.

참 고 문 헌

[1] Chun-Hsiang Chi, Chi-Yang Chang, "A new class of wideband multisection 180° hybrid rings using vertically installed planar couplers", *IEEE MTT-S Int. Microwave. Symp. Dig.*, vol. 54, no. 6, Jun. 2006.

[2] Hirosi Okabe, Christophe Caloz, and Tausuo Itoh, "A compact enhanced-bandwidth hybrid ring using an artificial lumped-element left-handed transmission-line section", *IEEE MTT-S Int. Microwave. Symp. Dig.*, vol. 52, no. 3, Mar. 2004.

[3] Ting Ting Mo, Quan Xue, and Chi Hou Chan, "A broadband compact microstrip rat-race hybrid using a novel CPW inverter", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techiques*, vol. 55, no. 1, Jan. 2007.

[4] Tong qing Wang, Ke Wu, "Size-reduction and band-broadening design technique of uniplanar hybrid ring coupler using phase inverter for M(H)MIC's", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techiques*, vol. 47, no. 2, Feb. 1999.

[5] Chun-Hsiang Chi, Chi Yang Chang, "A compact wideband 180° hybrid ring coupler using a novel interdigital CPS inverter", *2007 Proceedings of 37th European Microwave Conference*, pp. 548-551.

[6] Won Na, Jun Song, Il-Hyun Cho, Keun-Kwan Ryu, and Moon-Que Lee, "Ring hybrid balun with good amplitude and phase balance", *2007 IEEE International Microwave Symposium Digest*, pp. 1769-1772.

[7] Stephen A. Maas, *The RF and Microwave Circuit Design Cookbook*, Artech House, Inc., 1998.

나 원

2006년 8월: 서울시립대학교 물리학과 (이학사)
2006년 9월~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 석사과정
[주 관심분야] 초고주파 회로설계

이 문 규

1992년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
1994년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1999년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)
2002년 2월: 한국전자통신연구원 선임연구원
2002년 3월~현재: 서울시립대학교 공과대학 전자전기컴퓨터공학부 부교수
[주 관심분야] 마이크로파 시스템 및 부품 설계, RFIC