

논문 2010-47TC-12-11

# 메타구조의 CRLH를 이용한 이중대역 전력증폭기 설계

(Design of Dual-band Power Amplifier using CRLH of Metamaterials)

고승기\*, 서철현\*\*

(Seungki Ko and Chulhun Seo)

## 요약

본 논문에서는 메타구조를 이용하여 하나의 RF GaN HEMT로 새로운 이중대역에 전력증폭기를 구현하였다. CRLH 전송 선로는 이중 대역 조절 특성을 갖는 메타물질 전송 선로를 만들 수 있다. CRLH 전송 선로의 이중 대역 동작은 전력증폭기의 정합 회로를 구현을 위하여 주파수 오프셋과 CRLH 전송 선로의 비선형 위상 기울기에 의해 얻을 수 있다. 이중대역에서 CRLH 전송 선로를 이용하여 이중대역에서 오직 2차, 3차 고조파 성분만을 조절하였다. 또한, 제안된 전력증폭기의 효율을 향상 시키기 위하여 출력 정합 회로뿐만 아니라 입력 정합회로도 고조파 조절 회로를 이용하여 구현하였다. 두 동작 주파수는 900MHz와 2140MHz로 정하였다. 전력증폭기의 측정된 출력 전력은 각각 900MHz에서 39.37dBm, 2140MHz에서 38.87 dB이다. 이 지점에서 얻은 전력효율 및 IMD는 900MHz에서 PAE 60.2%, IMD는 -23.17dBc, 2140MHz에서 PAE 67.3%, IMD -25.67dBc이다.

## Abstract

In this paper, a novel dual-band power amplifier has been realized with one RF GaN HEMT diffusion metal-oxide-semiconductor field effect transistor. The CRLH TL can lead to metamaterial transmission line with the dual-band tuning capability. The dual-band operation of the CRLH TL is achieved by the frequency offset and the nonlinear phase slope of the CRLH TL for the matching network of the power amplifier. We have managed only the second- and third-harmonics to obtain the high efficiency with the CRLH TL in dual-band. Also, the proposed power amplifier has been realized by using the harmonic control circuit for not only the output matching network, but also the input matching network for better efficiency. Two operating frequencies are chosen at 900 MHz and 2140 MHz in this work. The measured results show that the output power of 39.83 dBm and 35.17 dBm was obtained at 900 MHz and 2140 MHz, respectively. At this point, we have obtained the power-added efficiency (PAE) and IMD of 60.2 %, -23.17dBc and 67.3 %, -25.67dBc at two operation frequencies, respectively.

**Keywords :** Power Amplifier, Dual-Band, GaN HEMT, CRLH(Composite Right/Left-Handed Transmission Line), High Efficiency

## I. 서 론

최근 RF 장비는 전 세계적으로 사용하고 있는 서로 다른 무선 통신 표준에서 고르게 동작하도록 요구되고

\* 학생회원, \*\* 정회원, 숭실대학교 정보통신전자공학부 (Information and Telecommunication Engineering, Soongsil University)

※ 본 연구는 지식경제부, 방송통신위원회 및 한국산업 기술평가관리원의 산업원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행하였음.[KI002071, 메타전자파구조를 이용한 전파(RF)스펙트럼 특성 개선 기술 연구 접수일자: 2010년12월7일, 수정완료일: 2010년12월10일]

있다. 동작 특성이 무선 환경에서 손실 없이 변화 될 수 있는 적응형 RF 회로들이 이러한 요구를 충족시키기 위하여 필요하다. 다중 대역 동작 특성의 구현을 위하여 다양한 노력들이 최근 이루어지고 있는데 그중 전력증폭기는 송신기 단에 가장 핵심적인 부분으로서 전체 효율에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다. 전력증폭기의 효율이 증가하게 되면 기지국 및 중계기 측면에서 냉각 시스템의 사용으로 인한 추가 비용을 감소시킬 수 있고, 또한 단말기 측면에서 배터리의 수명을 증가시킬 수 있다. 그러므로 전력증폭기의 효율은 설계 시 고려해야 할 중요한 요소 중 하나라고 할 수 있다. 특히 이

중 대역에서 고효율 동작이 가능한 전력증폭기의 구현은 두 개의 주파수 대역을 갖는 현대 무선 통신 시스템에서 회로의 수를 줄일 수 있다<sup>[1]</sup>.

오랫동안 전력증폭기의 효율 증대를 위한 연구가 활발하게 진행되어온 가운데 고주파에서도 높은 효율을 얻을 수 있는 대표적인 방법으로 Class-F 전력증폭기가 있다. Class-F 전력증폭기는 전력 밀도가 높고 외부 회로만으로 고조파 성분을 조절하여 효율을 높이기 때문에 쉽게 접근할 수 있다. 하지만 일반적인 방법으로 이중 대역에서 동작하는 Class-F 전력증폭기를 구현하는 일은 어렵다. 이중 대역에서 동작하는 Class-F 전력증폭기의 정합 회로 구현을 위하여 전송 선로를 기반으로 한 메타물질의 이중 대역 특성을 이용하였다<sup>[2]</sup>.

최근에는 Left-Handed Material (LHM)은 마이크로파분야에서 큰 관심을 받고 있다. LHM은 위상 속도와 그룹 속도를 평행하지 않게 하는 전계, 자계, 파장 백터에 의해 형성된 LH 삼원소 때문에 그렇게 명명된다. LHM의 개념이 1968년 Veselago에 의해 최초로 제안된 이후로 Shelby가 split-ring 공진기들(SRRs)과 선을 이용하여 음의 유효 투자율과 유전율을 동시에 갖는 주기적인 구조를 제안했던 2001년 까지 어떠한 LHM의 구현이 이루어지지 않았다. LHM을 구현하기 위한 또 다른 제안은 CRLH 전송 선로 구조를 기반으로 이루어지는데, LHM보다 더 적은 손실과 더 광대역의 주파수 특성을 나타냈다. CRLH 전송 선로는 직렬 캐패시턴스와 병렬 인덕턴스로 이루어진 단위 셀의 주기적인 반복으로 구성된 전송 선로로 직렬 캐패시턴스와 병렬 인덕턴스 뿐만 아니라 직렬 인덕턴스와 병렬 캐패시턴스로 이루어진 단위 셀의 주기적인 반복으로 구성되어진 전송 선로이다. 직렬 캐패시턴스와 병렬 인덕턴스는 저주파에서 완손 법칙을 따르지만, 직렬 인덕턴스와 병렬 캐패시턴스는 고주파에서 오른손 법칙을 따른다<sup>[3~4]</sup>.

이론적으로 class-F 전력증폭기는 모든 고조파 성분을 조절하여 100%의 효율을 얻을 수 있지만, 본 논문에서는 CRLH 전송 선로를 이용한 이중 대역 동작 특성 구현으로 인한 회로의 복잡성을 줄이기 위하여 2차, 3차 고조파 성분만을 조절하여 회로를 단순화 시키면서 고효율 및 이중 대역 특성을 얻도록 설계되었다. 또한, 더 좋은 효율을 특성을 위하여 출력 정합 회로뿐만 아니라, 입력 정합 회로에도 CRLH 전송 선로를 이용하여 이중 대역에서 고조파 특성을 조절하도록 구현하였다.

## II. $\lambda/4$ CRLH 전송 선로

그림 1은 RH 전송 선로와 LH 전송 선로의 인위의 집중 정수 소자 구현을 위한 단위 셀들을 보여준다.  $C_R$ 과  $L_R$ 은 각각 RH 전송 선로의 등가 집중 정수 소자 모델의 단위 셀에서의 인덕턴스와 캐패시턴스이다.  $L_L$ 과  $C_L$ 은 각각 LH 전송 선로의 등가 집중 정수 소자 모델의 단위 셀에서의 인덕턴스와 캐패시턴스이다. 인위의 전송 선로들은 만약 무한소 근사 가정이 적용되면서 단위 셀에 의해 발생된 위상 편이가 보다 훨씬 작다면 N개의 단위 셀들을 연속으로 연결함으로써 얻어진다. LH 전송 선로는 인덕터와 캐패시터의 위치가 서로 바뀐 점에서 RH 전송 선로의 전기적인 쌍대관계이다. 각 단위 셀의 전체 인덕턴스와 캐패시턴스는 같다. 그림 1에서 인위의 RH 전송 선로와 LH 전송 선로의 두 단위 셀의 위상 응답은 다음과 같다.

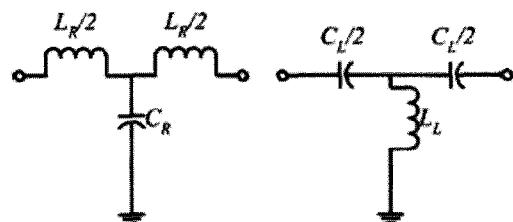
$$\phi_{Runit} = -\arctan \left[ \frac{\omega \left( C_R Z_{OR} + \frac{L_R}{Z_{OR}} + \omega^2 \frac{C_R L_R^2}{4 Z_{OR}} \right)}{(2 - \omega^2 C_R L_R)} \right] < 0 \quad (1)$$

$$\phi_{Lunit} = -\arctan \left[ \frac{\omega \left( C_L Z_{OL} + \frac{L_L}{Z_{OL}} - \frac{1}{\omega^2 4 C_L Z_{OL}} \right)}{(1 - 2\omega^2 C_L L_L)} \right] > 0 \quad (2)$$

여기서 R과 L은 각각 RH와 LH를 나타내며  $Z_{OR}$ 과  $Z_{OL}$ 은 다음과 같이 정의되는 특성 임피던스를 나타낸다.

$$Z_{OL} = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} \quad Z_{OR} = \sqrt{\frac{L_R}{C_R}} \quad (3)$$

인위의 전송 선로의 위상 응답은 다음과 같다.



(a) RH 전송 선로      (b) LH 전송 선로

그림 1. 인공 RH와 LH 전송 선로의 T-형태 단위 셀  
Fig. 1. T-type unit cells of artificial RH and LH TLs.  
(a) RH TL, (b) LH TL

$$\phi_R = N_{\phi R \text{unit}} \quad (4)$$

$$\phi_L = N_{\phi L \text{unit}} \quad (5)$$

RH 전송 선로는 음의 위상응답을 갖는 반면, LH 전송 선로는 양의 위상 응답을 갖는다.

이상적인 CRLH 전송 선로는 이상적인 LH 전송 선로와 RH 전송 선로의 직렬 결합으로 이루어지며 차단 주파수를 갖지 않고, 다음과 같은 위상 응답을 갖는다.

$$\phi_C = \phi_R + \phi_L \quad (6)$$

여기서 C는 CRLH를 나타낸다.

이상적인 CRLH 전송 선로의 위상 응답은 그림 2에서 보여주며 이상적인 LH 전송 선로와 이상적인 RH 전송 선로의 중첩이다. 저주파에서 CRLH 전송 선로의 위상 곡선은 이미티스  $L_R$ 과  $C_R$ 이 무시될 수 있기 때문에 LH 전송 선로의 위상 곡선에 근접하며, 위상 곡선은 식 (1)에 따라 양의 위상 응답에 대응된다.

고주파에서 CRLH 전송 선로의 위상 곡선은 이미티스  $L_R$ 과  $C_R$ 이 무시될 수 있기 때문에 RH 전송 선로의 위상 곡선에 근접하며, 위상 곡선은 식 (2)에 따라 음의 위상 응답에 대응된다. 결론적으로, CRLH 전송 선로의 위상 곡선은  $0^\circ$ 의 위상을 갖는 축(전기적 길이가 0)에서 LH와 RH 범위 사이의 천이 주파수에서의 오프셋을 두고 교차한다. 주파수가 0Hz인 지점에서부터 오프셋은 RH 전송 선로 측면에서 추가적인 자유로운 변화를 제공하며, 오직 위상의 기울기가 조절될 수 있다. 그러므로 CRLH 전송 선로 위상 곡선은 이중 대역

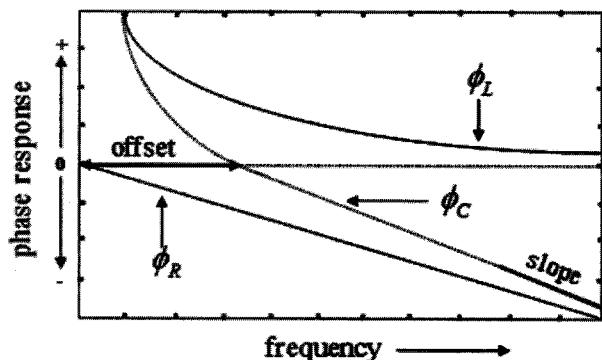


그림 2. 이상적인 RH 전송선, LH전송선, CRLH전송 선로의 위상응답

Fig. 2. Typical Phase responses of an ideal RH TL, LH TL, and CRLH.

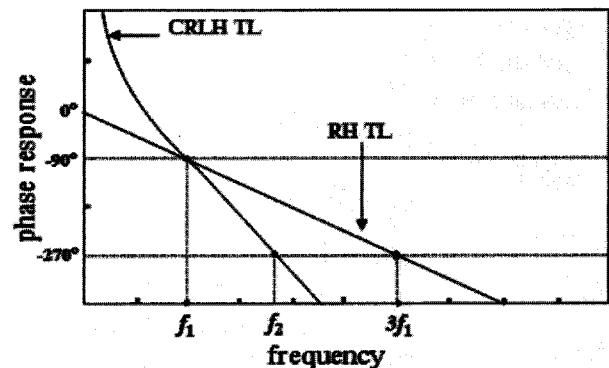


그림 3.  $f_1$ 에서  $90^\circ$ 의 전기적 길이를 갖는 RH 전송선로와 CRLH 전송 선로의 위상 응답

Fig. 3. Phase responses of the RH TL and CRLH TL, which both have electrical lengths of  $90^\circ$  at  $f_1$ .

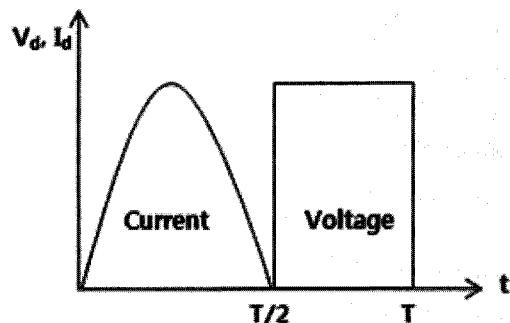


그림 4. 이상적인 Class-F 전력증폭기의 전압 전류 파형

Fig. 4. Ideal current and voltage waveform for class-F power amplifier.

동작을 위하여 임의의 한 쌍의 주파수들에서 원하는 한 쌍의 위상을 얻을 수 있다.

그림 3은 RH 전송 선로와 CRLH 전송 선로의 위상 응답을 보여준다.  $\pi/4$  RH 전송 선로 위상 곡선은 0Hz 주파수에서부터  $f_1$ 까지 직선이며,  $-90^\circ$ 에서의 동작 주파수  $f_1$ 은  $-270^\circ$ 에서의 다음 이용 가능한 주파수가  $3f_1$ 이라는 것을 의미한다. 반면,  $\pi/4$  CRLH 전송 선로는 주파수 오프셋과 위상 기울기가 자유롭게 조절될 수 있으므로 두 가지의 임의의 동작 주파수들에서  $\pi/4$ 와  $3\pi/4$ 의 전기적 길이를 갖는다<sup>[3~5]</sup>.

### III. 제안된 전력증폭기

Class F 전력 증폭기는 그림 4에서 보는 바와 같이 전압과 전류 파형이 신호 주기 동안 overlap이 없이 동작한다. 전압의 홀수 고조파 임피던스를 조율하여 능동

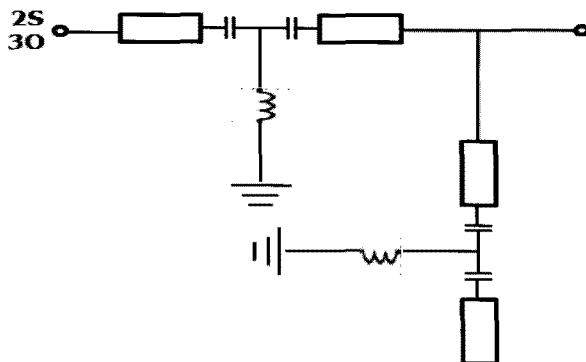


그림 5. 이중대역 고조파 조절 회로의 구현을 위하여 이용한 CRLH 전송 선로 구조

Fig. 5. CRLH TL structure using for the implementation of the dual-band harmonic control circuit.

소자의 출력단에서 구형파의 전압파형이 되도록 하고, 전류의 파형은 전도각이  $180^\circ$  와 같거나 작은 정현파 형태를 나타내도록 하여 전압과 전류가 겹치게 되는 부분을 최소화 시킨다. 따라서 소자에서 소모되는 순간 DC 전력은 0이되어 이상적인 경우  $100^\circ$  의 효율을 얻을 수 있다. Class F 전력증폭기의 그림 4와 같은 출력파형을 얻기 위해 고조파 제어 회로를 증폭기의 출력 정합단에 추가하여 짹수 고조파 성분에서는 단락, 훌수 고조파 성분에서는 개방 형태로 동작하도록 한다. 또한, 이중대역에서 임의의 동작 주파수에서 이중 대역 동작이 가능한 CRLH 전송 선로를 이용하여 정합 회로의 고조파 조절 회로를 구현하였다. 회로의 복잡도를 줄이기 위해 2차, 3차 고조파만을 제어하여 설계 하였다. 효율 특성을 더욱 개선시키기 위해서 출력 정합회로 뿐만 아니라 입력 정합 회로도 CRLH 전송 선로를 이용하여 이중 대역에서 고조파 조절 특성을 갖도록 구현하였다. 그림 5는 전력증폭기의 입·출력 정합 회로를 구성하는 이중 대역 고조파 조절 회로의 구현을 위한 CRLH 전송 선로의 구조를 보여준다. 그림에서 보듯이, 마이크로 스트립의 길이와 집중 정수 소자의 캐페시턴스와 인덕턴스의 조절을 통하여 임의의 동작 주파수를 조절할 수 있다<sup>[6]</sup>.

#### IV. 구현 및 측정결과

이중 대역 전력증폭기는 CREE사의 10-W 금 GaN HEMT를 이용하여 구현되었다. 또한 3.2의 유전율과 31 mils의 두께를 갖는 Taconic TLC기판을 이용하여 제작하였다. 설계에 사용된 simulator는 Agilent사의

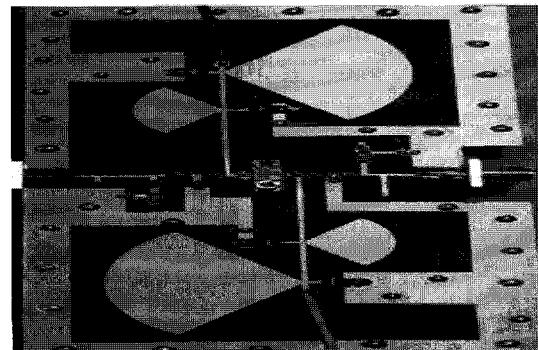


그림 6. 메타구조의 CRLH를 이용한 이중대역 전력증폭기 구현 모습

Fig. 6. Fabrication of the proposed dual-band power amplifier using CRLH of metamaterials.

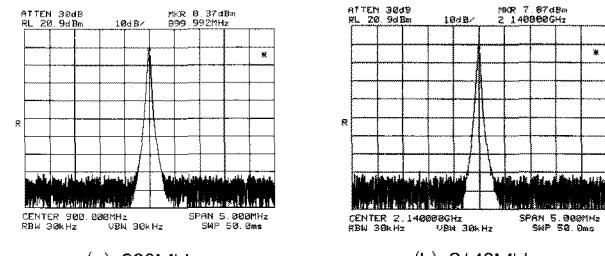


그림 7. 제안된 이중 대역 전력증폭기의 출력 전력

Fig. 7. Output power of the proposed dual-band power amplifier.

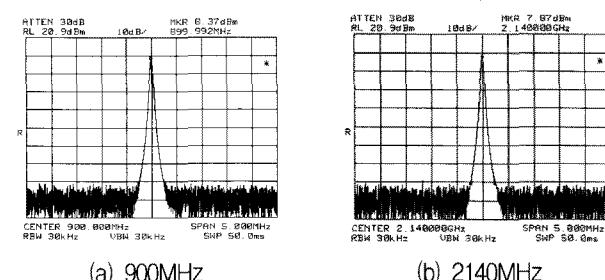


그림 8. 제안된 이중 대역 전력증폭기의 IMD

Fig. 8. Output power of the proposed dual-band power amplifier.

Advanced Designed System(ADS)이다.

그림 6은 제안된 이중 대역 전력증폭기의 구현 모습을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이, 정합회로는 그림 5에 나와 있는 형태의 CRLH 전송 선로를 이용하여 구현되었다. 또한, 출력 정합 회로뿐만 아니라 입력 정합 회로도 동일한 방법으로 이중대역에서 동작하도록 구현하여 제안된 전력증폭기의 효율 특성을 개선하였다.

제안된 전력증폭기의 측정 결과 입력 전력 25dBm 기준에서 900MHz 대역에서 39.37dBm의 출력 전력, 60.2%의 효율 및 -23.17dBc의 IMD를 보였으며 2140 MHz 대역에서 38.87dBm의 출력 전력, 67.3%의 효율

표 1. 제안된 이중대역 전력증폭기의 측정 결과  
Table 1. Measured results of the proposed dual-band power amplifier.

	Units	Measurement Results	
Fundamental Frequency	MHz	900	2140
Output Power	dBm	39.37	38.87
Gain	dB	14.37	13.87
3rd IMD	dBc	-23.17	-25.67
PAE	%	60.2	67.3

및 -25.67dBc의 IMD를 보여주고 있다. 집중 소자를 사용하여 정합단을 구현함으로써 시뮬레이션과 실제 제작 측정 결과 사이에 주파수 천이 현상이 발생하였다. 이는 설계 과정에서 주파수 천이 현상을 예상하고 미리 보상하여 원하는 대역에서 동작 가능하도록 수정하였다. 또한 시뮬레이션 결과와 측정결과를 비교하였을 때 완벽하게 같은 결과는 나오지 않았지만 제작 및 측정 시 발생하는 Loss로 인하여 같은 나오지 않았다. 지금 까지 설계된 이중대역 전력증폭기의 제작 및 측정을 통하여 CRLH 전송 선로의 다중대역 설계가 유용함을 확인하였다.

제안된 전력증폭기와의 특성 비교를 위하여 일반적인 이중 대역 전력증폭기를 제작하였다. 제안된 전력증폭기와 비교할 경우 4~5% 정도 효율 및 IMD가 개선되었다. 표 1은 제안된 이중 대역 전력증폭기의 측정 결과를 나타낸다.

## V. 결 론

본 논문은 900MHz대역과 2140MHz 대역간의 신호를 증폭하기 위한 이중대역 전력증폭기에 대해 연구 및 제작하였다. 기존의 서로 다른 대역용 전력증폭기를 설계하여 이를 결합하는 형태를 벗어나 하나의 트랜지스터를 사용하여 각각의 대역에서 무선 통신 신호가 전력증폭기에 입력되어졌을 때 최대 효율을 얻을 수 있도록 설계하였다. 주파수 오프셋과 비선형 위상 기울기 특성을 통해 임의로 다중 대역의 정합이 가능한 CRLH 전송선을 사용함으로써 크기 문제와 다중밴드 정합의 제약을 해소하도록 하였다. 또한 더 높은 효율을 얻기 위하여 출력 정합단 뿐만 아니라 입력 정합단에도 고조파 조절

회로를 사용하여 구현하였다. 두 동작주파수는 900MHz 와 2140 MHz이며 전력증폭기의 측정된 출력전력은 각각 900MHz에서 39.37dBm, 2140MHz에서 38.87dBm이다. 이 지점에서 얻은 전력효율 PAE 및 IMD는 900 MHz에서 60.2%, -23.17dBc, 2140MHz에서 67.3%, -25.67dBc이다.

결과로 집중 정수 소자를 사용한 정합단 구현으로 인해 주파수 천이 현상이 나타났지만 CRLH 전송 선로를 이용하여 다중대역 전력 증폭기를 구현하는 것이 용이하며, 복잡한 정합단을 줄임으로써 크기 및 효율 개선에 기여할 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. Ji, G. Hwang, C. Cho, J. W. Lee, and J. Kim, "836 MHz/1.95 GHz dual-band class-E power amplifier using composite right/left-handed transmission lines", European Microwave Conference, pp. 356-359, September 2006.
- [2] A. V. Grebennikov, "Circuit design technique for high efficiency class-F amplifier", IEEE MTT-S International Microwave Symposium, vol. 2, pp. 771-774, June 2000.
- [3] A. Lai, C. Caloz, and T. Itoh, "Composite right/left-handed transmission line metamaterials," IEEE Microwave Magazine, vol. 5, pp. 34-50, September 2004.
- [4] I-Hsiang Lin, M. DeVincentis, and C. Caloz, and T. Itoh, "Arbitrary dual-band composite using composite right/left-handed transmission lines," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 52, no. 4, pp. 1142-1149, April 2004.
- [5] X. Q. Lin, R. P. Liu, X. M. Yang, J. X. Chen, X. X. Yin, Q. Cheng, and T. J. Cui, "Arbitrarily dual-band components using simplified structures of conventional CRLH TLs," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 54, no. 7, pp. 2902-2909, July 2006.
- [6] S. C. Cripps, RF Power Amplifiers for Wireless Communications, MA: Artech House, 1999.

---

저 자 소 개

---



고 승 기(학생회원)  
 2009년 2월 송실대학교 정보통신  
 전자공학부 학사 졸업.  
 2009년 2월~현재 송실대학교  
 전자공학과 석사과정.  
 <주관심분야 : 초고주파 회로 설  
 계, RF Power Amplifier, RFIC,  
 VCO>



서 철 현(정회원)  
 1983년 3월 서울대학교  
 전자공학과(공학사)  
 1985년 3월 서울대학교  
 전자공학과(공학석  
 사)  
 1993년 3월 서울대학교  
 전자공학과(공학박사)  
 1993년~1995년 MIT 연구원  
 1993년~1997년 송실대학교 정보통신학과 조교수  
 1999년 8월~2001년 1월 MIT 방문교수  
 1997년~2004년 송실대학교 정보통신 전자공학부  
 부교수  
 2005년~현재 송실대학교 정보통신전자공학부  
 교수  
 <주관심분야 : 이동 및 위성통신 Microwave 부  
 품 및 시스템, PBG를 이용한 RF 부품>