

논문 2008-45TC-8-8

# Composite Right/Left-Handed 전송 선로를 이용한 이중 대역 고효율 class-F 전력증폭기

(Dual-Band High-Efficiency Class-F Power Amplifier using Composite  
Right/Left-Handed Transmission Line)

최 재 원\*, 서 철 현\*\*

(Jaewon Choi and Chulhun Seo)

## 요 약

본 논문에서는 composite right/left-handed (CRLH) 전송 선로를 이용하여 하나의 RF Si LDMOSFET으로 새로운 이중 대역 고효율 class-F 전력증폭기를 구현하였다. CRLH 전송 선로는 이중 대역 조절 특성을 갖는 메타물질 전송 선로를 만들 수 있다. CRLH 전송 선로의 이중 대역 동작은 전력증폭기의 정합 회로 구현을 위하여 주파수 오프셋과 CRLH 전송 선로의 비선형 위상 기술기에 의해서 얻을 수 있다. 이중 대역에서 모든 고조파 성분을 조절하는 것은 매우 어렵기 때문에, CRLH 전송 선로를 이용하여 이중 대역에서 고효율 특성을 얻도록 오직 2차, 3차 고조파 성분만을 조절하였다. 또한, 제안된 전력증폭기의 효율을 더욱 더 향상시키기 위하여 출력 정합 회로뿐만 아니라, 입력 정합 회로도 고조파 조절 회로를 이용하여 구현하였다. 두 동작 주파수는 880 MHz와 1920 MHz로 정하였다. 전력증폭기의 측정된 출력 전력은 각각 880 MHz에서 39.83 dBm, 1920 MHz에서 35.17 dBm이다. 이 지점에서 얻은 전력 효율, PAE는 880 MHz에서 79.536 %, 1920 MHz에서 44.04 %이다.

## Abstract

In this paper, a novel dual-band high-efficiency class-F power amplifier using the composite right/left-handed (CRLH) transmission lines (TLs) has been realized with one RF Si lateral diffusion metal-oxide-semiconductor field effect transistor (LDMOSFET). 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. Because the control of the all harmonic components is very difficult in dual-band, 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 880 MHz and 1920 MHz in this work. The measured results show that the output power of 39.83 dBm and 35.17 dBm was obtained at 880 MHz and 1920 MHz, respectively. At this point, we have obtained the power-added efficiency (PAE) of 79.536 % and 44.04 % at two operation frequencies, respectively.

**Keywords:** Class-F Power Amplifier, Dual-Band, LDMOS, High Efficiency,

Composite Right/Left-Handed Transmission Line

## I. 서 론

최근 RF 장비는 전 세계적으로 사용하고 있는 서로

다른 무선 통신 표준에서 고르게 동작하도록 요구되고 있다. 동작 특성이 무선 환경에 따라 손실 없이 변화될 수 있는 적응형 RF 회로들이 이러한 요구를 충족시키기 위하여 필요하다. 다중 대역 동작 특성의 구현을 위하여 다양한 노력들이 최근 이루어지고 있다. 그 중 전력증폭기는 송신기 단에 가장 핵심적인 부분으로서 전체 효율에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다. 전력증폭기의 효율이 증가하게 되면 기지국 및 중계기 측면에서

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

※ 이 연구는 2008학년도 숭실대학교 대학 연구비의 지원으로 연구되었음

접수일자: 2008년7월20일, 수정완료일: 2008년8월1일

냉각 시스템의 사용으로 인한 추가 비용을 감소시킬 수 있고, 또한 단말기 측면에서는 배터리의 수명을 증가시킬 수 있다. 그러므로 전력증폭기의 효율은 설계 시 고려해야 할 중요한 요소 중 하나라고 할 수 있다. 특히 이중 대역에서 고효율 동작이 가능한 전력증폭기의 구현은 두 개의 주파수 대역을 갖는 현대 무선 통신 시스템에서 회로의 수를 줄일 수 있게 한다<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 Class-F 전력증폭기를 이중 대역에서 동작하도록 구현하는 일은 어렵다. 이중 대역에서 동작하는 class-F 전력증폭기의 정합 회로 구현을 위하여 전송 선로를 기반으로 한 메타물질의 이중 대역 특성을 이용하였다<sup>[2-3]</sup>.

최근에 Left-Handed Material (LHM)은 마이크로파 분야에서 큰 관심을 받고 있다. LHM은 위상 속도와 그룹 속도를 평행하지 않게 하는 전계, 자계, 파장 벡터에 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 구조들을 기반으로 나중에 이루어졌는데, LHM보다 더 적은 손실과 더 광대역의 주파수 대역 특성을 나타냈다. CRLH 전송 선로는 직렬 캐패시턴스와 병렬 인덕턴스 뿐만 아니라 직렬 인덕턴스와 병렬 캐패시턴스로 이루어진 단위 셀의 주기적인 반복으로 구성되어진 전송 선로이다. 직렬 캐패시턴스와 병렬 인덕턴스는 저주파에서 왼손 법칙을 따르지만, 직렬 인덕턴스와 병렬 캐패시턴스는 고주파에서 오른손 법칙을 따른다. CRLH 구조들은 또한 임의의 이중 대역 마이크로파 부품의 설계에 유용함을 보여준다. 만약 CRLH 구조들이 적절하게 설계된다면 일반적인 right-handed (RH) 전송 선로를 CRLH 전송 선로로 대체함으로써  $-90^\circ$ 의 위상 편이와  $-270^\circ$  (혹은  $90^\circ$ )의 위상 천이는 두 개의 임의로 주어진 주파수들에서 얻어질 수 있다<sup>[4-7]</sup>.

이론적으로 class-F 전력증폭기는 모든 고조파 성분을 조절하여 100 %의 효율을 얻을 수 있지만, 본 논문

에서는 CRLH 전송 선로를 이용한 이중 대역 동작 특성 구현으로 인한 회로의 복잡성을 줄이기 위하여 효율 향상에 있어서 가장 큰 기여를 하는 2차, 3차 고조파 성분만을 조절하여 회로를 단순화 시키면서 고효율 및 이중 대역 특성을 얻도록 설계되었다. 또한, 더 나은 효율 특성을 얻기 위하여 출력 정합 회로뿐만 아니라, 입력 정합 회로도 CRLH 전송 선로를 이용하여 이중 대역에서 고조파 조절 특성을 갖도록 구현하였다.

### II. $\lambda/4$ CRLH 전송 선로

그림 1은 RH 전송 선로와 LH 전송 선로의 인위의 집중 정수 소자 구현을 위한 단위 셀들을 보여 준다.  $L_R$ 과  $C_R$ 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  $\pi/2$ 보다 훨씬 더 작다면  $N$ 개의 단위 셀들을 연속으로 연결함으로써 얻어진다. LH 전송 선로는 인덕터와 캐패시터의 위치가 서로 바뀐 점에서 RH 전송 선로의 전기적인 듀얼 관계이다. 각 단위 셀의 전체 인덕턴스와 캐패시턴스는 같다. 그림 1에서 인위의 RH 전송 선로와 LH 전송 선로의 두 단위 셀의 위상 응답은 다음과 같다.

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

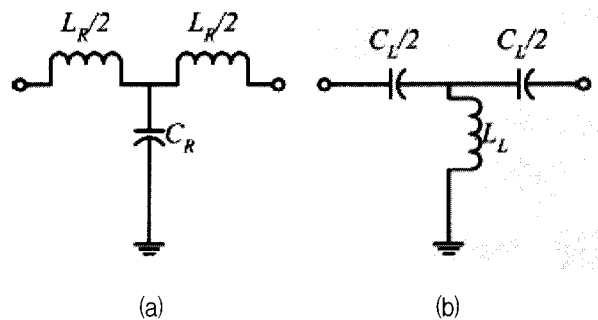


그림 1. 인공 RH와 LH 전송 선로의 T-형태 단위 셀 (a) RH 전송 선로, (b) LH 전송 선로

Fig. 1. T-type unit cells of artificial RH and LH TLs (a) RH TL, (b) LH TL.

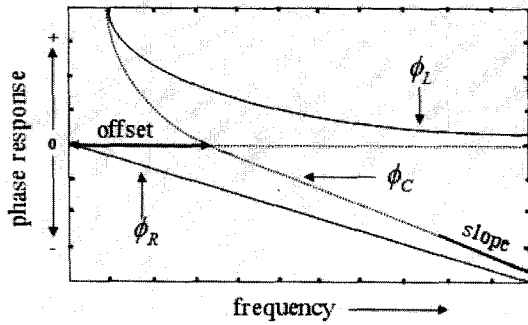


그림 2. 이상적인 RH 전송 선로, LH 전송 선로, CRLH 전송 선로의 전형적인 위상 응답  
Fig. 2. Typical phase responses of an ideal RH TL, LH TL, and CRLH TL.

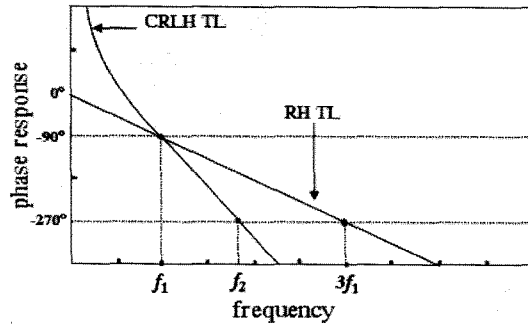


그림 3. 두 가지 모두  $f_1$ 에서  $90^\circ$ 의 전기적 길이를 갖는 RH 전송 선로와 CRLH 전송 선로의 위상 응답  
Fig. 3. Phase responses of the RH TL and CRLH TL, which both have electrical lengths of  $90^\circ$  at  $f_1$ .

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

여기서  $R$ 과  $L$ 은 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.

$$\phi_R = N\phi_{R,unit} \quad (4)$$

$$\phi_L = N\phi_{L,unit} \quad (5)$$

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

이상적인 CRLH 전송 선로는 이상적인 LH 전송 선로와 RH 전송 선로의 직렬 결합이며, 두 가지 모두 차단 주파수를 갖지 않으며, 다음과 같은 위상 응답을 갖

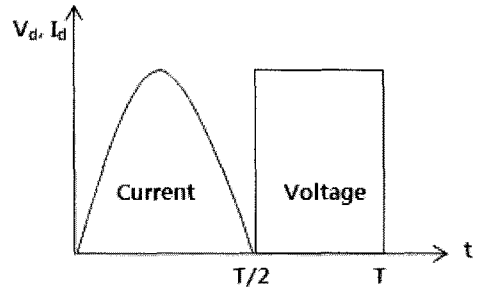


그림 4. 이상적인 Class F 전력 증폭기의 전압 전류 파형  
Fig. 4. Ideal current and voltage waveform for class-F power amplifier.

는다.

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

여기서  $C$ 는 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 이미턴스  $L_R$ 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 이미턴스  $L_L$ 과  $C_L$ 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 0 Hz인 지점에서부터 오프셋은 RH 전송 선로 측면에서 추가적인 자유로운 변화를 제공하며, 오직 위상의 기울기가 조절될 수 있다. 그러므로 CRLH 전송 선로 위상 곡선은 이중 대역 동작을 위하여 어떤 임의의 한 쌍의 주파수들에서 원하는 한 쌍의 위상들을 얻을 수 있다.

그림 3은 RH 전송 선로와 CRLH 전송 선로의 위상 응답을 보여준다.  $\pi/4$  RH 전송 선로 위상 곡선은 0 Hz 주파수에서부터  $f_1$  (분산이 0이라고 가정)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 [4~6].

### III. 제안된 Class-F 전력증폭기

Class F 전력 증폭기는 그림 4에서 보는 바와 같이 전압과 전류 파형이 신호 주기 동안 겹치는 영역이 없이 동작한다. 전압의 홀수 고조파 임피던스를 조절하여 능동 소자의 출력 단에서 구형파의 전압파형이 되도록 하고, 전류의 파형은 전도각이 180°와 같거나 작은 정현파 형태를 나타내도록 하여 전압과 전류가 겹치게 되는 부분을 최소화 시킨다. 따라서 소자에서 소모되는 순간 DC 전력은 0이 되어 이상적인 경우 100%의 효율을 얻을 수 있다. Class F 전력 증폭기의 그림 4와 같은 출력 파형을 얻기 위해 고조파 제어 회로를 증폭기의 출력 정합 단계에 추가하여 짝수 고조파 성분에서는 단락, 홀수 고조파 성분에서는 개방 형태로 동작하도록 한다. 또한, 이중 대역에서 이와 같은 특성을 얻기 위하여 임의의 동작 주파수에서 이중 대역 동작이 가능한 CRLH 전송 선로를 이용하여 정합 회로의 고조파 조절 회로를 구현하였다. 본 논문에서는 회로의 복잡도를 줄이기 위하여 전력증폭기의 효율에 가장 큰 기여도를 갖는 2차와 3차 고조파만을 제어하여 설계하였다. 또한, 효율 특성을 더욱 더 개선하기 위하여 출력 정합 회로뿐만 아니라 입력 정합 회로도 CRLH 전송 선로를 이용하여 이중 대역에서 고조파 조절 특성을 갖도록 구현하였다. 이와 같은 제안된 이중 대역 고효율 class-F 전력증폭기의 구성도가 그림 5에 나와 있다. 그림 6은 제안된 전력 증폭기의 입/출력 정합 회로를 구성하는 이중 대역 고조파 조절 회로의 구현을 위하여 이용한 CRLH 전송 선로의 구조를 보여준다. 그림에서 보듯이, 그림 1의

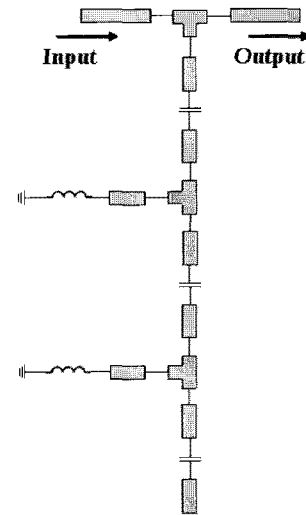


그림 6. 입/출력 정합 회로를 구성하는 이중 대역 고조파 조절 회로의 구현을 위하여 이용한 CRLH 전송 선로 구조

Fig. 6. CRLH TL structure using for the implementation of the dual-band harmonic control circuit consisted of the in/output matching network.

LH 전송 선로 단위 셀 두 개를 직렬로 연결한 형태를 갖는다. 마이크로스트립의 길이와 집중 정수 소자의 캐패시턴스와 인덕턴스의 조절을 통하여 임의의 동작 주파수를 조절할 수 있다<sup>[8-9]</sup>.

### IV. 구현 및 측정 결과

CRLH 전송 선로를 이용한 이중 대역 고효율 class-F 전력증폭기는 Freescale사의 4-W 급 RF Si LDMOSFET MRF281SR1을 이용하여 구현되었다. 또

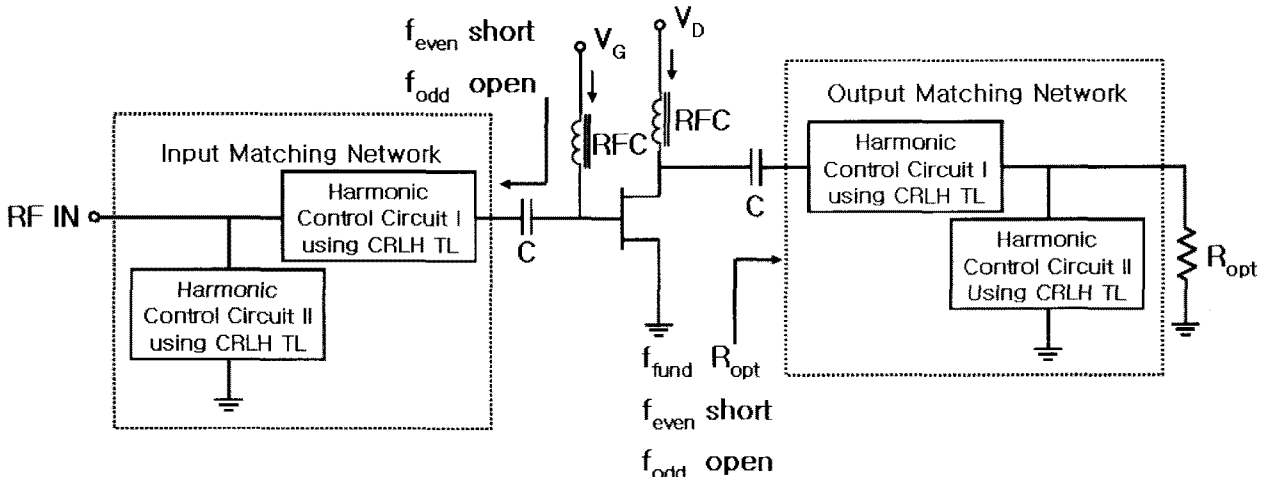


그림 5. 제안된 이중 대역 고효율 class-F 전력증폭기 구성도

Fig. 5. Schematic of the proposed dual-band high-efficiency class-F power amplifier.

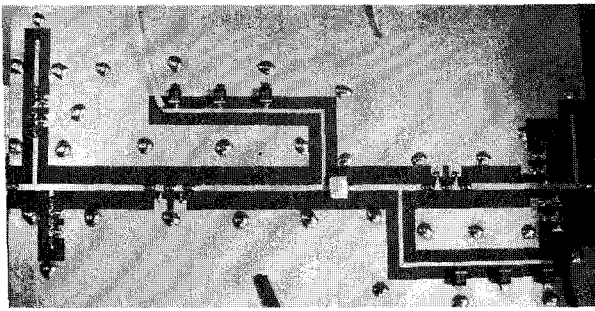
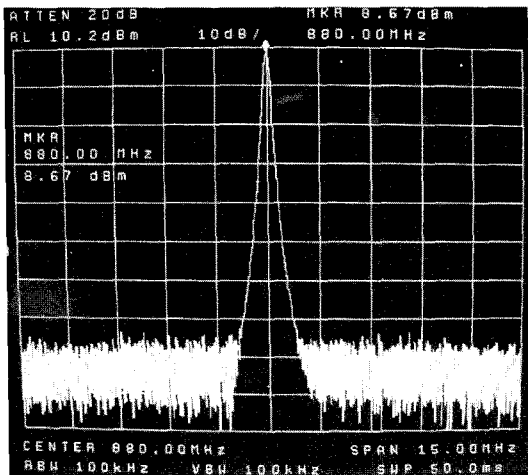
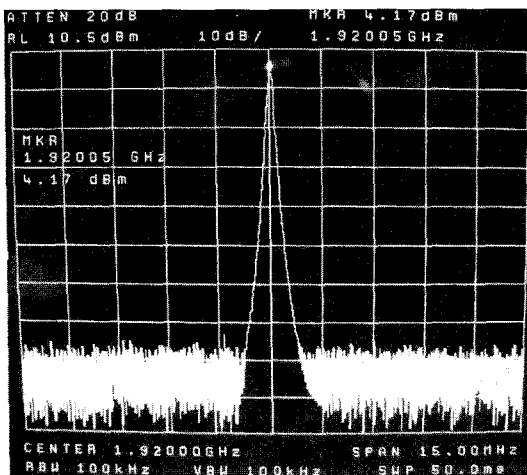


그림 7. CRLH 전송 선로를 이용한 제안된 이중 대역 고효율 class-F 전력증폭기 구현 모습  
 Fig. 7. Fabrication of the proposed dual-band high-efficiency class-F power amplifier using CRLH TL.



(a)



(b)

그림 8. 제안된 이중 대역 고효율 class-F 전력증폭기의 각각의 동작 주파수 대역에서의 출력 전력 (a) 880 MHz, (b) 1920 MHz

Fig. 8. Output power of the proposed dual-band high-efficiency class-F power amplifier at each operation frequency (a) 880 MHz, (b) 1920 MHz.

한 3.2의 유전율과 31 mils의 두께를 갖는 Taconic TLC 기판을 이용하여 제작되었다. 설계에 사용된 simulator는 Agilent사의 Advanced Design System (ADS)이다. 그림 7은 제안된 이중 대역 고효율 class-F 전력증폭기의 구현 모습을 보여준다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 정합 회로는 그림 6에 나와 있는 형태의 CRLH 전송 선로를 이용하여 이중 대역에서 고조파 조절 특성을 갖도록 구현되었다. 또한, 출력 정합 회로뿐만 아니라, 입력 정합 회로도 동일한 방법으로 이중 대역에서 고조파 조절 특성을 갖도록 구현하여 제안된 전력증폭기의 효율 특성을 더욱 더 개선하였다. 그림 5에 나와 있는 구성도와 동일한 형태의 입/출력 정합 회로를 갖는 것을 확인할 수 있다. 고조파 조절 회로뿐만 아니라, 본 출력 신호에 대한 정합 특성을 이중 대역에서 얻기 위하여 본 출력 신호 또한 CRLH 전송 선로를 이용하여 정합하였다. 입력 정합 회로도 동일한 방법으로 구현하였다.

제안된 전력증폭기의 게이트 전압과 드레인 전압은 이중 대역에서 모두 3.0 V와 28.6 V를 인가하였다. 두 개의 동작 주파수 대역은 각각 880 MHz와 1920 MHz이다. 그림 8은 각각의 동작 주파수 대역에서의 출력 전력을 보여준다. 이때 입력 전력은 모두 28 dBm이다. 먼저, 880 MHz 주파수 대역에서 출력 전력은 39.83 dBm이며, 이때 드레인 전류는 395 mA이다. 그러므로 PAE는 79.536 %이다. 1920 MHz 주파수 대역에서 출력 전력은 35.17 dBm이며, 이때 드레인 전류는 211 mA이다. 그러므로 PAE는 44.04 %이다. 880 MHz 주파수 대역의 경우 입력 전력이 25 dBm인 경우 361 mA의 드레인 전류에서 39.5 dBm의 출력 전력을 얻어 PAE가 83.26 %로 최적화되어 있다. 하지만 입력 전력이 25 dBm인 경우 1920 MHz 대역에서 효율이 좋지 않다. 그러므로 두 주파수 대역 중 1920 MHz에서 효율이 최적화된 입력 전력인 28 dBm을 기준으로 두 대역에서 전력증폭기의 특성 측정하였다. 이 경우 880 MHz 대역에서 최적화된 효율을 얻지 못했다.

제안된 전력증폭기와의 특성 비교를 위하여 고조파 조절 회로가 출력 정합 회로에만 있는 전력증폭기를 제작하였다. 즉, 입력 정합 회로는 본 신호에 대한 이중 대역 정합만을 하였다. 전력증폭기의 효율 특성을 이와 비교할 경우 제안된 전력증폭기는 이중 대역에서 모두 약 4~5 % 정도 효율이 개선되었다. 표 1은 제안된 이중 대역 고효율 class-F 전력증폭기의 측정된 동작 특성을 나타낸다.

표 1. 제안된 이중 대역 고효율 class-F 전력증폭기의 측정된 동작 특성

Table 1. Measured performances of the proposed dual-band high-efficiency class-F power amplifier.

동작 특성	단위	제안된 전력증폭기	
동작 주파수	MHZ	880	1920
출력 전력	dBm	39.83	35.17
전력 이득	dB	11.83	7.17
PAE	%	79.536	44.04
드레인 전류	mA	395	211

## V. 결 론

본 논문에서는 CRLH 전송 선로를 이용하여 하나의 RF Si LDMOSFET으로 새로운 이중 대역 고효율 class-F 전력증폭기를 구현하였다. CRLH 전송 선로는 이중 대역 조절 특성을 갖는 메타물질 전송 선로를 만들 수 있다. CRLH 전송 선로의 이중 대역 동작은 전력증폭기의 정합 회로 구현을 위하여 주파수 오프셋과 CRLH 전송 선로의 비선형 위상 기울기에 의해서 얻을 수 있다. 이중 대역에서 모든 고조파 성분을 조절하는 것은 매우 어렵기 때문에, CRLH 전송 선로를 이용하여 이중 대역에서 고효율 특성을 얻도록 2차, 3차 고조파 성분만을 조절하였다. 또한, 제안된 전력증폭기의 효율을 더욱 더 향상시키기 위하여 출력 정합 회로뿐만 아니라, 입력 정합 회로도 고조파 조절 회로를 이용하여 구현하였다. 두 동작 주파수는 880 MHz와 1920 MHz로 정하였다. 전력증폭기의 측정된 출력 전력은 각각 880 MHz에서 39.83 dBm, 1920 MHz에서 35.17 dBm이다. 이 지점에서 얻은 전력 효율, PAE는 880 MHz에서 79.536 %, 1920 MHz에서 44.04 %이다. 제안된 전력증폭기의 효율 특성을 비교하기 위하여 출력 정합 회로에만 고조파 조절 회로를 이용한 전력증폭기와 효율 특성을 비교할 경우 이중 대역에서 모두 약 4~5 % 정도 효율이 개선되는 것을 확인하였다.

## 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, "Switched-mode tuned high-efficiency power amplifiers: historical aspect and future prospect", *IEEE RFIC Symposium*, pp. 49-52, June 2002.
- [3] 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.
- [4] A. Lai, C. Caloz, and T. Itoh, "Composite right/left-handed transmission line metamaterials," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 5, pp. 34-50, September 2004.
- [5] 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.
- [6] J. Choi, and C. Seo, "Dual-band VCO using composite right/left-handed transmission line and tunable negative resistance based on pin diode", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, pp. 241-244, June 2008.
- [7] 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.
- [8] Y. Y. Woo, Y. Yang, and B. Kim, "Efficiency comparison between highly efficient class-F and inverse class-F power amplifiers", *IEEE Microwave Magazine*, June 2007.
- [9] S. C.ripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, MA: Artech House, 1999.

---

저 자 소 개

---



최 재 원(학생회원)  
2006년 2월 숭실대학교 정보통신  
전자공학부 학사 졸업  
2008년 2월 숭실대학교 정보통신  
공학과 석사 졸업  
2008년 3월~현재 숭실대학교  
정보통신공학과 박사과정

<주관심분야 : 초고주파 회로 설계, RF Power  
Amplifier, VCO, RFIC, RFID, Digital RF 등>

서 철 현(정회원)  
대한전자공학회 논문지  
vol. 31, no. 6 참조