

논문 2011-48TC-9-7

Metamaterial CRLH 전송선로를 이용한 이중대역 Class-E 전력증폭기 설계

(Design of a Dual-band Class-E Power Amplifier using Metamaterial
CRLH Transmission Lines)

임성규*, 서철현**

(Sunggyu Lim and Chulhun Seo)

요약

본 논문에서는 Composite Right-/Left-Handed (CRLH) 전송선로 (TL)와 PIN 다이오드를 이용한 이중대역 Class-E 전력증폭기를 구현하였다. CRLH 전송선로를 이용하여 이중대역 주파수 조절 특성을 갖는 Metamaterial CRLH 전송선로를 구현하였으며, CRLH 전송선로의 이중대역 동작은 전력증폭기의 정합 회로에 이용된 주파수 오프셋과 CRLH 전송선로의 비선형 위상 기울기에 의해 얻을 수 있었다. 제안된 이중대역 전력증폭기의 효율을 향상시키기 위하여 출력 정합회로뿐만 아니라 입력 정합회로를 이용하여 구현하였으며, PIN 다이오드를 이용하여 각각의 독립된 주파수에서 전력증폭기가 동작할 수 있게 하였다. 전력증폭기의 출력 전력과 전력효율은 각각 800 MHz에서 42.17 dBm, 62.24 %, 1900 MHz에서 41.50 dBm, 60.73 % 이었으며, 이중대역에서 비교적 균등한 결과를 얻었다.

Abstract

In this paper a dual-band Class-E power amplifier using Composite Right-/Left-Handed transmission lines and PIN diode is proposed. Dual-band operation is achieved by the frequency offset and nonlinear phase slope of CRLH TL for the matching network of power amplifiers. The proposed power amplifier has been realized by using in the input and the output matching network for high power added efficiency. PIN diode has been used to obtain the dual-band of power amplifier. The measured results show that output powers of 42.17 dBm and 41.43 dBm were obtained at 800 MHz and 1900 MHz, respectively. At this frequency, we have obtained the power-added efficiency(PAE) of 67.84 % and 65.31 % in two operation frequencies, respectively.

Keywords : Class-E, power amplifier, dual-band, CRLH(Composite Right-/Left-Handed) TLs, PIN Diode

I. 서론

최근 들어 이동통신 시스템의 급격한 보급에 의해 무

선통신 시스템용 고출력 전력증폭기의 중요성이 부각되고 있으며, 앞으로도 새로운 환경에 적합한 고출력, 고효율 특성을 갖는 전력증폭기의 개발이 시급한 것으로 나타나고 있다^[1~2]. 또한 서로 다른 무선 통신 표준에서 고르게 동작하도록 요구되고 있어 동작 특성이 무선 환경에서 손실 없이 변화 될 수 있는 적응형 RF 회로들이 이러한 요구를 충족시키기 위하여 필요하다. 다중대역 동작 특성의 구현을 위하여 다양한 노력들이 최근 이루어지고 있는데 그중 전력증폭기는 송신기 단에 가장 핵심적인 부분으로서 전체 효율에 가장 큰 영향을

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

※ 본 연구는 한국방송통신전파진흥원의 전파방송위성 원천기술개발 사업의 일환으로 수행하였음. [KI002071, 메타전자파구조를 이용한 전파(RF) 스펙트럼 특성 개선 기술 연구]

접수일자: 2011년8월29일, 수정완료일: 2011년9월16일

미치는 요소이다. 전력증폭기의 효율이 증가하게 되면 기지국 및 중계기 측면에서 냉각시스템의 사용으로 인한 추가 비용을 감소시킬 수 있고, 또한 단말기 측면에서 배터리의 수명을 증가시킬 수 있다. 따라서 통신 시스템 설계 시 전력증폭기의 효율은 가장 중요하게 고려해야 할 사항이다. 특히 이중대역에서 고효율 동작이 가능한 전력증폭기의 구현은 두 개의 주파수대역을 갖는 현대 무선 통신 시스템에서 회로의 수를 줄일 수 있다. 따라서 Class-E 전력증폭기가 가장 간단한 구조이면서 고주파에서 높은 효율을 가질 수 있기 때문에 Class-E 전력증폭기를 제안하였다. 하지만 일반적인 방법으로는 이중대역에서 동작하는 Class-E 전력증폭기를 구현하는 것은 어렵다. 따라서, 이중대역에서 동작하는 Class-E 전력증폭기의 정합회로 구현을 위하여 전송 선로를 이용한 메타물질의 이중대역 특성을 이용하였다^[6].

따라서 본 논문에서는 CRLH 전송선로를 이용한 이중대역 동작 특성 구현을 하는 Class-E 전력증폭기를 설계하는데 초점을 맞췄으며, PIN 다이오드를 이용하여 각각의 주파수에서 하나의 회로를 이용하여 독립적으로 동작하는 것을 구현하였다.

II. Class-E 전력증폭기 동작원리

Class-E 전력증폭기는 이론적으로 100%의 전력효율 특성을 갖는 전력증폭기로 Sokal이 처음 제시하였다. Class-E 전력증폭기는 다른 class에 비해 높은 효율로 인해 적은 열방출 특성을 가지고 있다. 같은 주파수, 같은 출력전력에서 동일한 트랜지스터를 이용한 Class-E 전력증폭기는 일반적인 Class-B or -C 전력증폭기에 비해 2, 3배 작은 전력손실 특성을 갖고 동작한다. 스위칭모드 전력증폭기에서 트랜지스터는 이상적인 스위치처럼 동작하게 된다. 트랜지스터의 전력소모를 최소화하기 위해 트랜지스터의 전압과 전류 파형이 겹쳐지 않도록 해야 하며, 이는 트랜지스터를 ON/OFF시킴으로써 전력증폭기의 고효율 특성을 얻게 된다^[6].

III. Metamaterial을 이용한 CRLH 전송선로

1. $\lambda/4$ CRLH 전송선로

그림 1은 RH 전송 선로와 LH 전송 선로의 집중 정수 소자 구현을 위한 단위 셀들을 보여 준다. LR과 CR

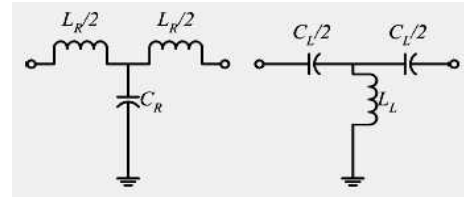


그림 1. RH와 LH전송 선로의 T-형태 단위 셀
(a) RH 전송 선로, (b) LH 전송 선로
Fig. 1. T-type unit cells of artificial RH and LH TLs.
(a) RH TL, (b) LH TL

은 각각 RH 전송 선로의 등가 집중 정수 소자 모델의 단위 셀에서의 인덕턴스와 캐패시턴스이다. LL과 CL은 각각 LH 전송선로의 등가 집중 정수 소자 모델의 단위 셀에서의 인덕턴스와 캐패시턴스이다.

이런 전송선로들은 만약 무한소 근사 가정이 적용되면서 단위 셀에 의해 발생된 위상 편이가 $\pi/2$ 보다 훨씬 더 작다면 N개의 단위 셀들을 연속으로 연결함으로써 얻어진다. LH 전송선로는 인덕터와 캐패시터의 위치가 서로 바뀐 점에서 RH 전송 선로의 전기적인 듀얼 관계이다. 각 단위 셀의 전체 인덕턴스와 캐패시턴스는 같다.

그림 2에서 RH 전송선로와 LH 전송선로의 두 단위 셀의 위상 응답은 다음과 같다.

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

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

여기서 ϕ_R 과 ϕ_L 은 각각 RH와 LH 나타내며 Z_{0R} 과 Z_{0L} 은 다음과 같이 정의되는 특성 임피던스를 나타낸다.

$$Z_{0L} = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} \quad Z_{0R} = \sqrt{\frac{L_R}{C_R}} \quad (3)$$

위의 전송 선로의 위상 응답은 다음과 같다.

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

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

RH 전송선로는 음의 위상 응답을 갖는 반면, LH 전송선로는 양의 위상 응답을 갖는다. 이상적인 CRLH 전

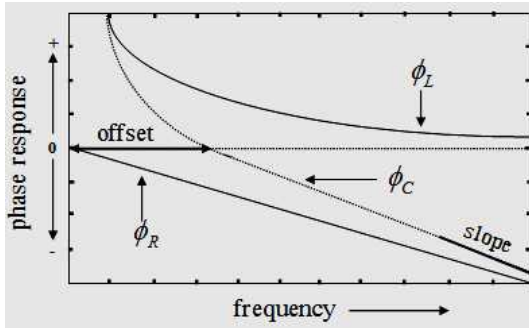


그림 2. 이상적인 RH전송선, LH전송선, CRLH전송 선로의 위상응답

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

송선로는 이상적인 LH 전송 선로와 RH 전송 선로의 직렬 결합이며, 두 가지 모두 차단 주파수를 갖지 않으며, 다음과 같은 위상 응답을 갖는다.

$$\phi_C = \phi_R + \phi_L \tag{6}$$

여기서 ϕ_C 는 CRLH를 나타낸다.

이상적인 CRLH 전송 선로의 위상 응답은 그림 2에서 보여주고 있으며, 이상적인 LH 전송선로와 이상적인 RH 전송선로의 중첩이다. 저주파에서 CRLH 전송선로의 위상 곡선은 이미턴스 L_R 과 C_R 이 무시될 수 있기 때문에 LH 전송선로의 위상 곡선에 근접하며, 위상 곡선은 식 (1)에 따라 양의 위상 응답에 대응된다. 고주파에서 CRLH 전송선로의 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°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 위 상의 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 3는 RH 전송선로와 CRLH 전송선로의 위상 응답을 보여준다. $\pi/4$ RH 전송선로 위상 곡선은 0 Hz 주파수에서부터 f_1 (분산이 0이라고 가정)까지 직선이며, -90° 에서의 동작 주파수 f_1 는 -270° 에서의 다음 이용 가능한 주파수가 $3f_1$ 이라는 것을 의미한다. 반면, $\pi/4$ CRLH 전송 선로는 주파수 오프셋과 위상 기울기가 자유롭게 조절될

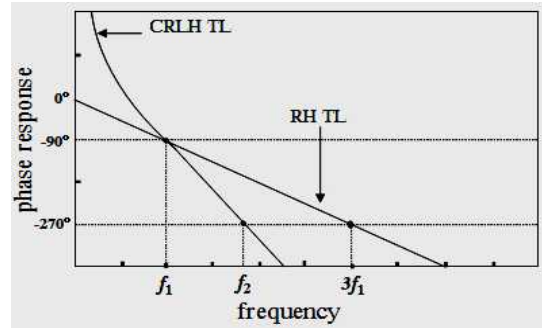


그림 3. f_1 에서 90° 의 전기적 길이를 갖는 RH전송 선로와 CRLH 전송 선로의 위상응답

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

수 있으므로 두 가지 임의의 동작 주파수들에서 $\pi/4$ 와 $3\pi/4$ 의 전기적 길이를 갖는다^[5, 7].

IV. 구현 및 측정결과

4-1 CRLH 전송선로 설계

이중대역 동작이 가능한 CRLH 전송선로를 이용하여 정합 회로의 조절 회로를 구현하였다. 그리하여 효율 특성을 개선시키고 출력 정합회로와 입력 정합회로까지 조절하는 특성을 갖도록 구현하였다.

그림 4에서 보여지듯이 마이크로스트립의 길이와 집중 정수 소자의 캐패시턴스와 인덕턴스의 조절을 통하여 이중대역에서 고효율 특성을 갖는 것을 볼 수 있다.

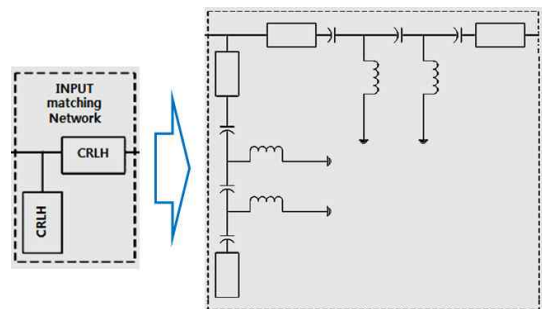


그림 4. 입력정합회로 및 출력정합회로를 나타내는 Metamaterial CRLH 구조

Fig. 4. Metamaterial CRLH Structure of Input and output matching Network.

4-2 Class-E 전력증폭기 설계

Class-E 전력 증폭기는 전압과 전류 파형이 겹치지 않도록 해야 하며, 이는 트랜지스터를 ON/OFF 시킴으로써 전력증폭기의 고효율 특성을 얻게 된다. 각각의

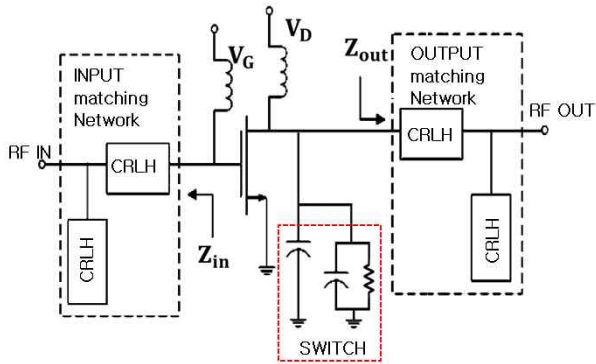


그림 5. Metamaterial CRLH를 이용한 이중 대역 Class-E 전력증폭기 구성도
 Fig. 5. Dual-band class-E power amplifier diagram using Metamaterial CRLH TLs.

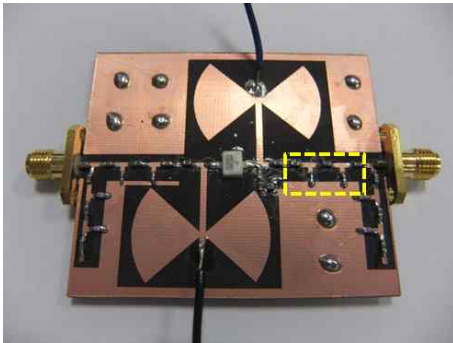


그림 6 Metamaterial CRLH를 이용한 이중대역 Class-E 전력증폭기 구현 모습
 Fig. 6. Fabrication of the proposed Dual-band power amplifier using Metamaterial CRLH TLs.

주파수대역에서 스위칭모드를 작동하기 위해서 PIN 다이오드를 사용하여 독립적으로 동작하고, 입출력 정합 회로에 CRLH TL을 적용함으로써 단일 transistor 및 단일 정합회로를 통해 이중대역에서 동작하는 Class-E 전력증폭기의 구조를 그림 5에서 보여주고 있다.

이중대역 Class-E 전력증폭기는 Freescale 사의 transistor인 LDMOS MRF282SR1을 이용하여 구현하였다. 또한 유전율 3.2와 31 mils의 유전체 두께를 갖고 copper의 두께는 0.035 mm 인 Taconic TLC기판을 이용하였다. 설계에 사용된 circuit simulator는 Advanced Designed System(ADS)이다.

그림 6은 제안된 이중대역 Class-E 전력증폭기의 구현 모습을 보여주고 있다. 또한 출력 정합회로뿐만 아니라 입력 정합회로도 동일한 방법으로 이중대역에서 동작하도록 구현하여 제안된 전력증폭기의 효율 특성을 개선하였다.

또한 그림 7는 제안된 이중대역 Class-E 전력증폭기

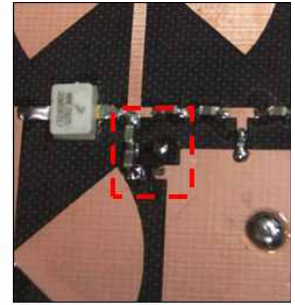
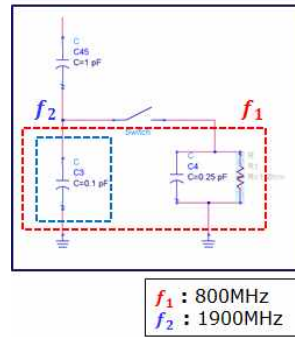
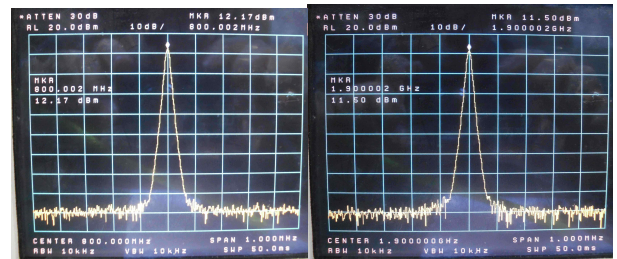


그림 7. 제안된 이중대역 Class-E전력증폭기의 switch 구조
 Fig. 7. Configuration of the switch on the proposed dual-band class-E power amplifier.



(a) 800MHz (b) 1900MHz

그림 8. 제안된 이중 대역 전력증폭기의 출력 전력 (a) 800 MHz (b) 1900 MHz
 Fig. 8. Output power of the proposed dual-band power amplifier.

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

	단위	Measured Results	
Frequency	MHz	800	1900
Output Power	dBm	42.17	41.50
Gain	dB	12.17	11.50
PAE	%	62.24	60.73

의 스위치 구조를 보여주고 있다. 캐패시터 뱅크를 이용하여 Class-E 전력증폭기에서 이중대역에서 각각 동작하게끔 만드는 역할을 하고 있다. 스위치가 ON 되었을 때 C3와 RC resonator를 사용하여 이중대역에서 낮은 주파수대역인 800 MHz를 동작하고 스위치가 OFF 되었을 때 C3만이 동작하여 높은 주파수대역인 1900 MHz를 동작하게 하고 있다. 실제 제작할 때에는 PIN 다이오드를 사용하여 구현한 것을 그림 7에서 볼 수 있다.

설계된 이중대역 전력증폭기의 제작 및 측정을 통하

여 CRLH 전송선로의 다중대역 설계가 유용함을 확인하였으며 PIN 다이오드를 사용하여 각각의 독립된 주파수에서 동작하는 것을 확인하였다. 그림 8은 각각의 주파수대역에서의 출력전력의 스펙트럼을 보여주고 있다.

V. 결 론

본 논문은 이중 대역 Class-E 전력증폭기의 고효율 특성을 개선하기 위하여 CRLH 전송선로와 PIN 다이오드를 이용하여 연구 및 제작하였다. 이를 통해 제안된 구조에서 두 개의 주파수는 800 MHz와 1900 MHz로 정하였으며, 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. 또한 주파수 오프셋과 비선형 위상 기울기 특성을 통해 임의로 다중대역의 정합이 가능한 CRLH 전송선로를 사용함으로써 크기 문제와 다중밴드 정합의 제약을 해소하도록 하였다. 두 동작주파수에서 측정된 출력전력은 각각 800 MHz에서 42.17 dBm, 1900 MHz에서 41.50 dBm이다. 이 지점에서 얻은 전력효율 PAE는 800 MHz에서 62.24%, 1900 MHz에서 60.73%이다.

본 논문에서는 CRLH 전송선로를 이용하여 다중대역 전력증폭기를 구현하는 것이 용이하며, 복잡한 입출력 정합단을 최소화시킴으로써 크기 및 효율 개선에 기여하였고, PIN 다이오드를 이용하여 각각의 주파수에서 독립적으로 동작이 가능해 졌음을 확인할 수 있었다. 또한, 각각의 주파수에서 균일한 효율을 얻을 수 있었으며, 기존의 이중대역 증폭기의 각 대역 효율 불균형에 대한 개선을 할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Steve C. Cripps, RF Power Amplifiers for Wireless Communications, Artech House, 1999.
- [2] N. O. Sokal and A. D. Sokal, "Class E-a New Class of High-Efficiency Tuned Single-Ended Switching Power Amplifiers", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol SC-10, vo. 3, pp 168-176, June 1975.
- [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] N. O. Sokal, "Class E High-Efficiency Switching- Mode Power Amplifiers, from HF to Microwave", *1998 IEEE MTT--S, International Microwave Symposium Digest*, June 1998.
- [5] I-Hsiang Lin, M. Devincents, 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] 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.
- [7] 고승기, 서철현, "메타구조의 CRLH를 이용한 이중대역 전력증폭기 설계" 전자공학회 논문지 제 47권 TC편 제 12호, pp. 78-83, 2010년 12월

저 자 소 개



임 성 규(학생회원)
2010년 2월 숭실대학교 정보통신
전자공학부 학사 졸업.
2010년 3월~현재 숭실대학교
전자공학과 석사과정.
<주관심분야 : 초고주파 회로설
계, RF Power Amplifier, Digital
RF>

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