

# CRLH 전송선로의 비선형 위상 특성을 이용한 이중대역 평형 믹서

## Dual-Band Balanced Mixer using Nonlinear Phase Characteristic of CRLH Transmission Line

정연우\*, 김 영\*, 윤영철\*\*

Youn-Woo Jung\*, Young Kim\* and Young-Chul Yoon\*\*

### 요 약

본 논문은 비선형 위상 특성을 갖고 있는 CRLH 전송선로를 이용하여 이중대역 평형 믹서를 제안한 것이다. 이 메타 재질 구조의 믹서는 이중대역에서 낮은 LO 누설 전력과 높은 RF-LO 고립도를 갖고 있어, LO와 RF 경로에 추가적인 여파기가 필요하지 않는다. 이 평형 믹서는 이중대역에서 동작하는 발룬과 윌킨슨 분배기를 이용하여 구현하였으며, 이중대역 특성은 CRLH 전송선로의 비선형 위상 특성을 이용하였다. 제안한 메타 재질을 이용한 평형 믹서는 실험을 결과를 통해서 증명하였으며, 870 MHz와 1660 MHz의 주파수에서 동작하도록 제작하여, 870 MHz에서 15.2 dB, 1660 MHz에서 21.2 dB의 변환 손실을 얻었다.

### Abstract

This paper presents a dual-band balanced mixer using nonlinear phase characteristic of composite right/left-handed (CRLH) transmission line. This metamaterial structure provides low LO leakage and high RF to LO isolation without additional filters for LO and RF path. The balanced mixer consists of balun and Wilkinson divider with dual-band characteristic of unit-cell which behaves like a CRLH metamaterial. Experimental results are used to verify the proposed metamaterial functions. The balanced mixer design results in an operating frequency of 870 MHz and 1660 MHz with an optimum mixer conversion loss of 15.2 dB at 870 MHz and 21.2 dB at 1660 MHz.

Key words : Balanced Mixer, Composite Right/Left-Handed Transmission Line, Dual-Band, Metamaterial

### I. 서 론

최근의 이동통신 시스템은 큰 데이터 용량 전송, 디지털 변복조 방법 그리고 여러 주파수 성분을 처리할 수 있는 회로들이 함께 존재하도록 개발되고 있

다. 더욱이 이들 시스템은 대부분의 상용 분야에서 간결한 설계를 요구하고 있으며, 시스템의 면적이 점점 작아지는 경향의 현실에서 여러 주파수를 함께 처리할 수 있는 회로가 필요한 실정이다. 결국 시스템의 필요에 의해서 단일 회로보다는 이중대역 또는 그

\* 금오공과대학교 전파통신과(Department of Radio Communication Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

\*\* 관동대학교 전자정보통신공학부(Department of Electronics & Information Communication Eng., Kwandong University)

· 제1저자 (First Author) : 정연우,

교신저자: 김 영

· 투고일자 : 2010년 11월 19일

· 심사(수정)일자 : 2010년 11월 19일 (수정일자 : 2011년 2월 7일)

· 게재일자 : 2011년 2월 28일

이상에서 사용할 수 있는 다양한 회로들은 수학적 방법을 이용한 것과 비선형 위상특성을 이용한 방법으로 구현하였다[1]-[4].

이 논문은 작은 크기의 면적으로 이중대역에서 동작하는 수신기를 위해서 메타 재질을 응용한 분야에 대한 것이다.

평형 믹서는 RF 신호를 90° 또는 180°의 위상을 만들고, 동위상의 LO신호와 결합하여 중간 주파수를 만들어내는 믹서로서 좋은 입력 VSWR과 RF-LO 고립도를 갖고 있다 [5]-[6]. 이와 같은 특성을 갖고 있는 평형믹서를 구현하기 위해서 이중대역 특성을 만족하는 CRLH 전송선로의 비선형 위상특성을 이용하여 설계를 하였다.

이러한 방법으로 구현된 믹서는 작은 공간에 구현이 가능하여 공간과 소자를 줄일 수 있어 컴팩트한 수신기 설계에 적합함을 보여줄 것이다.

## II. 회로의 동작

이중대역 특성을 갖고 있는 CRLH 전송선로를 이용한 평형 믹서의 블럭다이어그램은 그림 1에 나타내었다.

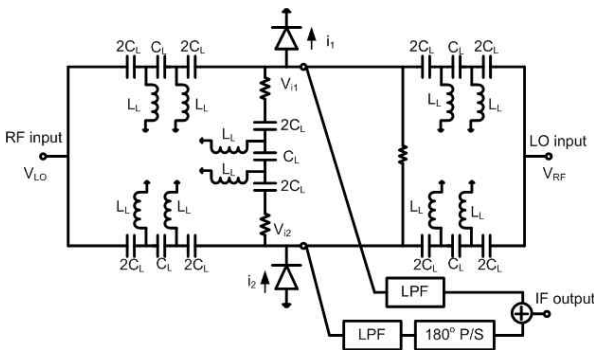


그림 1. CRLH 전송선로를 이용한 이중대역 평형 믹서 블럭다이어그램.

Fig. 1. Block-diagram of a dual-band balanced mixer using CRLH transmission line.

### 2-1 믹서

평형 믹서의 구조는 그림 1에서처럼 발룬과 윌킨

슨 디바이더로 구성되어 있다. 안테나에서 입력된 RF신호는 발룬을 통해서 0°와 180°의 위상을 갖은 신호로 분리되고, LO 신호는 윌킨슨 분배기에 의해서 분배된 후 다이오드에서 RF신호와 혼합된다.

혼합된 신호에서 중간 주파수를 추출하기 위해서 저역 여파기를 통과 시킨 후, 추출된 두 개의 중간 주파수 신호는 외부의 위상 변환기를 거친 후 두 신호를 결합하여 중간 주파수를 검출 한다.

다이오드 전류의 비선형 전달 특성은 다음과 같은 파워 시리즈로 표현할 수 있다 [7].

$$i_o = k_1 v_i + k_2 v_i^2 + k_3 v_i^3 + \dots \quad (1)$$

여기서  $i_o$ 는 다이오드 출력 전류를 그리고  $v_i$ 는 다이오드 입력 전압을 나타낸다.

다이오드의 입력 전압은 RF와 LO 두 신호의 합으로 구성되어 있고, 평형 믹서는 두 개의 단일 믹서와 결합되어 있으며 다이오드의 극성은 서로 반대이다.

두 다이오드에 걸리는 전압은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{i1} &= V_{LO} \cos \omega_{LO} t + V_{RF} \cos \omega_{RF} t \\ v_{i2} &= V_{LO} \cos \omega_{LO} t + V_{RF} \cos (\omega_{RF} t - 180^\circ) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $V_{LO}, \omega_{LO}$ 는 LO 신호의 전압과 주파수를 그리고  $V_{RF}, \omega_{RF}$ 는 RF 신호의 전압과 주파수를 나타낸다.

위의 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 다이오드 전류를 구한 후, 저역 여파기를 통과 시키면 DC와 중간 주파수 항만 남을 것이다. 이들 전류를 위상 변환기를 거쳐서 결합 한 중간 주파수 전류를 구하면 다음과 같다.

$$i_{IF} = i_{o1} + i_{o2} = -2k_2 V_{RF} V_{LO} \sin (\omega_{RF} - \omega_{LO}) t \quad (3)$$

### 2-2 CRLH 전송선로

LH (Left-Handed) 전송선로는 직렬 인터디지털 캐패시터와 병렬 단락 스텐드로 구현 할 수 있다. 이렇게 구현된 LH 전송선로는 직렬 캐패시터를 구성하는

인터디지털 형태의 핑거에 따라 흐르는 전류에 의한 인덕터 기생성분이 존재하게 된다.

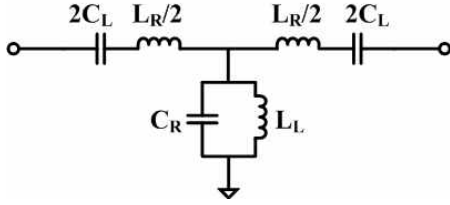


그림 2. CRLH 전송선로 등가회로.

Fig. 2. Equivalent circuit of CRLH transmission line.

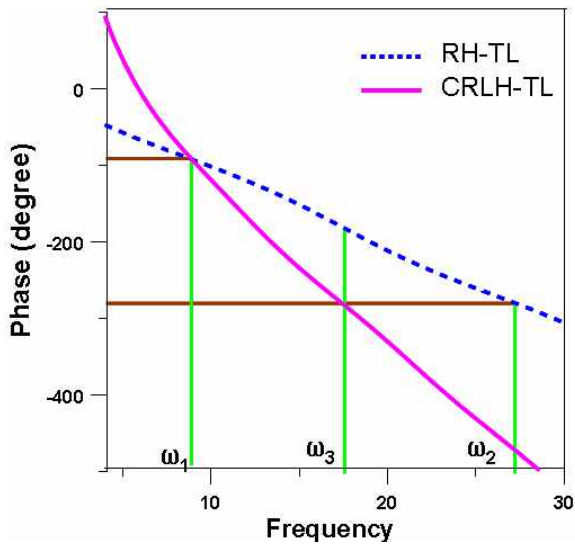


그림 3. CRLH 전송선로의 이중대역 성질.

Fig. 3. Dual-band property of a CRLH-TL.

또, 병렬 인덕터를 나타내는 단락 스티브에는 캐패시터 기생성분이 존재하게 되어, LH 전송선로와 기생성분이 결합된 전송선로가 되며, 이것을 CRLH (Composite Right/Left-Handed) 전송선로라고 한다. 그림 2는 일반적인 CRLH 전송선로의 등가회로를 나타낸 것이다 [8].

CRLH 전송선로의 위상 변화는 RH 와 LH 전송선로 위상 변화의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\phi_{CRLH} = \phi_{RH} + \phi_{LH} \quad (4)$$

CRLH 전송선로 특성은 저주파에서는 기생 성분인 LR과 CR의 존재가 무시되는 LH 전송선로의 특성을 갖으며, 또한 높은 주파수에서는 LL과 CL의 존재

가 무시되어 RH 전송선로의 특성을 따라간다.

그림 3은 CRLH 전송선로의 이중대역 특성을 주파수에 따라서 나타낸 그림이다.

이 그림에서 CRLH 전송선로는 비선형적인 위상 특성을 갖게 되어 RH 전송선로의 위상을 특정 주파수의 정수배가 아닌 곳에서 얻을 수 있음을 보여주고 있다.

이러한 특성을 이용하여 이중대역 선로를 구성할 수 있는데, 먼저 주파수  $f_1, f_2$ 를 결정하고 이들의 위상 특성을 결정한다 [8].

$$\phi_{CRLH}(f_1) = \phi_1, \phi_{CRLH}(f_2) = \phi_2 \quad (5)$$

여기서 두 주파수의 관계는 다음과 같다.

$$f_2 = \alpha f_1 \quad (6)$$

여기서  $\alpha$ 는 임의의 실수이다.

CRLH 전송선로의 위상속도와 임피던스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta_{CRLH} = \omega \sqrt{L_R C_R} - \frac{1}{\omega \sqrt{L_L C_L}} \quad (7)$$

$$Z_C^{CRLH} = \sqrt{\frac{L_R}{C_R}} = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} \quad (8)$$

위의 식을 이용하여 각각의 소자 값을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_R = \frac{Z_t [\phi_1(w_1/w_2) - \phi_2]}{N w_2 [1 - (w_1/w_2)^2]} \quad (9)$$

$$C_R = \frac{\phi_1(w_1/w_2) - \phi_2}{N w_2 Z_t [1 - (w_1/w_2)^2]} \quad (10)$$

$$L_L = \frac{Z_t N [1 - (w_1/w_2)^2]}{w_1 [\phi_1 - (w_1/w_2) \phi_2]} \quad (11)$$

$$C_L = \frac{N[1 - (w_1/w_2)^2]}{w_1 Z_i [\phi_1 - (w_1/w_2)\phi_2]} \quad (12)$$

여기서 사용된 N값은 단위 셀의 숫자를 나타낸 것이다.

위의 식들로 부터 구해진 소자의 값들을 사용하여 CRLH 전송선로를 설계하고, LR, CR 값들은 식 (13)을 이용하여 RH 전송선로를 구현한다.

$$Z_{cR} = \sqrt{\frac{L_R}{C_R}}, \quad \phi_1^{RH} = -Nw_1 \sqrt{L_R C_R} \quad (13)$$

식 (13)을 이용하여 단위 셀이 두 개인 CRLH 전송선로를 구현하면 그림 4의 형태로 전송선로를 설계할 수 있다.

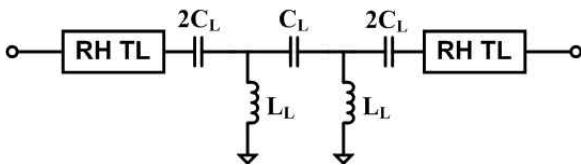


그림 4. 단위 셀 두 개로 구성된 이중대역 CRLH 전송선로의 등가회로.

Fig 4. Equivalent circuit of dual-band CRLH transmission line with two unit cells.

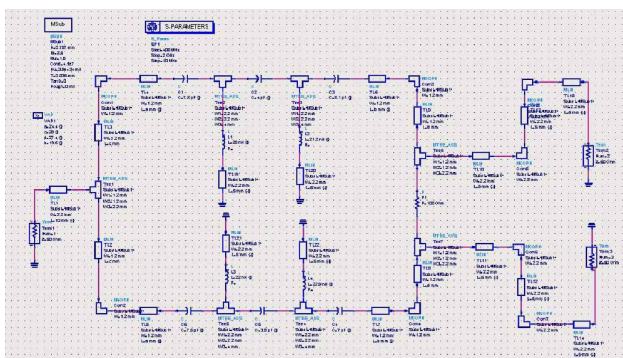


그림 5. 이중대역 윌킨슨 분배기 회로도.

Fig. 5. Schematic of dual-band Wilkinson divider.

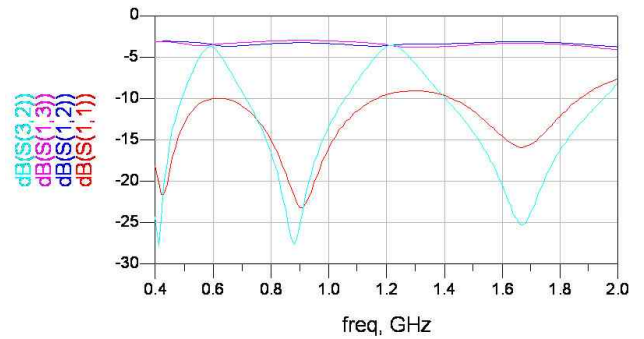


그림 6. 이중대역 윌킨슨 분배기 시뮬레이션 결과.

Fig. 6. Simulation results of dual-band Wilkinson divider.

윌킨슨 분배기를 870 MHz와 1660 MHz 이중대역에서 만족하도록 설계를 하기위해서 앞의 수식들을 이용하여 소자 값들을 구하면, 임피던스의 값이 70.7 Ω인 전송선로는 CL=2.5 pF, LL=5.6 nH 그리고 RH 전송선로의 전기적 길이는 81.7° 값을 갖으며, 이것을 이용하여 그림 5와 같은 이중대역 윌킨슨 분배기를 설계하였다.

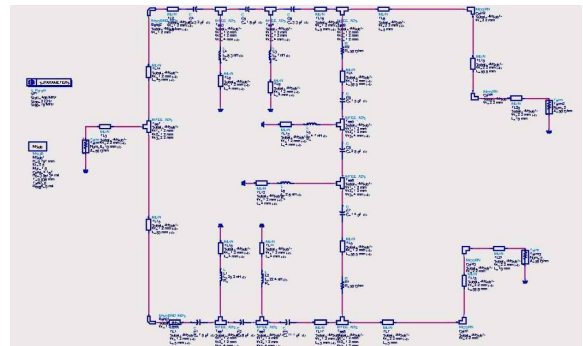


그림 7. 이중대역 발룬 회로도.

Fig. 7. Schematic of dual-band balun.

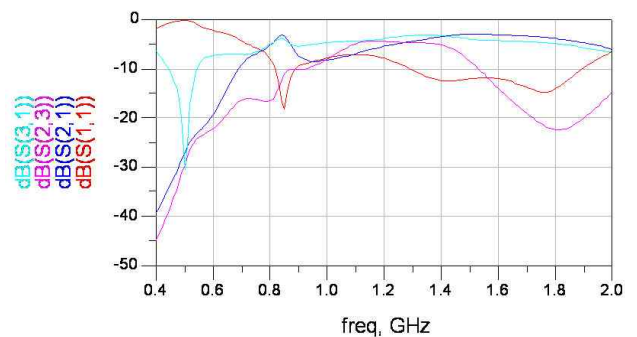


그림 8. 이중대역 발룬의 시뮬레이션 결과.

Fig. 8. Simulation result of dual-band balun.

위의 설계를 바탕으로 그림 6는 이중대역 윌킨슨 분배기의 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

또, 평형 믹서에 필요한 발룬은 CRLH 전송선로의 비선형적인 위상특성을 이용하여 설계하였으며, 870 MHz와 1660 MHz 이중대역에서 만족하는 소자 값은  $CL=2.4$  pF,  $LL=8.2$  nH 그리고 RH 전송선로의 전기적 길이는  $81.7\lambda$  값을 구하였다.

이것을 이용하여 그림 7과 같은 이중대역 발룬을 설계하였고, 위의 설계를 바탕으로 그림 8은 이중대역 발룬의 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

### III. 이중대역 평형 믹서의 실험결과

이 논문은 이중대역 윌킨슨 분배기와 발룬을 이용하여 870 MHz와 1660 MHz에서 동작하는 평형 믹서를 제작하여 그 특성을 확인하였다.

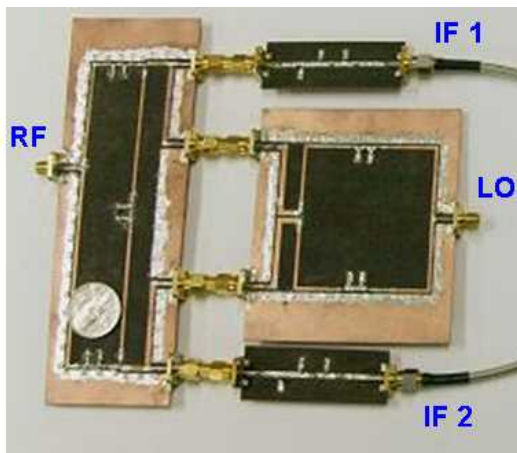


그림 9. 제작된 이중대역 평형믹서.

Fig. 9. Photograph of dual-band balanced mixer.

분배기와 발룬을 제작하는데 사용된 PCB는 타코닉사 유전율  $\epsilon_r = 2.5$ , 두께 0.8 mm 테프론 기판을 사용하였고, 그림 9는 제작된 이중 대역 평형 믹서사진을 나타낸 것이다.

위 그림에서 제작된 윌킨슨 분배기는 이중대역을 만족하기 위해서  $70.7$  오옴의  $\frac{\lambda}{4}$  전송선로를  $CL=4.7$  pF,  $LL=18$  nH 그리고 RH 전송선로는 104mm의 선로로 변환하여 구현하였으며, 이것의 측정값은 그림 10에 나타내었다. 측정값을 살펴보면 870 MHz

에서  $S_{21}$ , 31은 -3.5 dB 그리고 반사계수는 -21 dB 또, 포트간 고립도는 -20 dB를 얻었고, 1660 MHz에서  $S_{21}$ , 31은 -3.0 dB 그리고 반사계수는 -19 dB 또, 포트간 고립도는 -19 dB를 얻었다.

또한, 제작된 발룬은 이중대역을 만족하기 위해서  $CL=1.8$  pF,  $LL=8.2$  nH 그리고 RH 전송선로는 63mm의 선로를 이용하여 구현하였고, 이것의 측정값은 그림 11에 나타내었다. 그림11에서 살펴보면 870 MHz에서  $S_{21}$ , 31은 -5.4 dB, -4.6 dB 그리고 반사계수는 -10 dB 또, 1660 MHz에서  $S_{21}$ , 31은 -4.7 dB, -2.9 dB 그리고 반사계수는 -20 dB를 얻었다.

평형 믹서는  $f_{RF}= 870$  MHz,  $f_{LO}= 880$  MHz를 사용하여 중간 주파수가 10 MHz일 때 15.2 dB의 최적의 변환 손실을 얻었고,  $f_{RF}= 1660$  MHz,  $f_{LO}= 1670$  MHz를 사용하여 21.2 dB의 변환 손실을 얻었다.

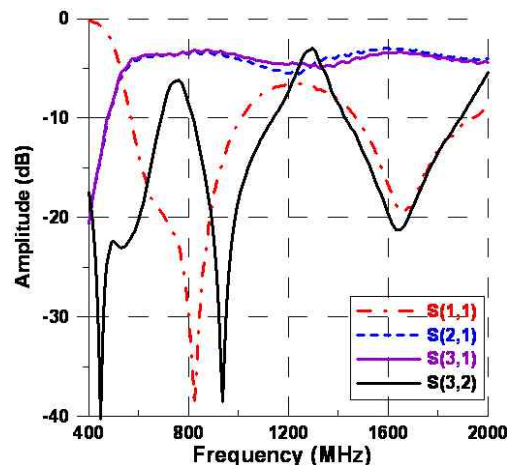


그림 10. 제작된 이중대역 윌킨슨 분배기 측정결과.  
Fig. 10. Results of dual-band Wilkinson divider.

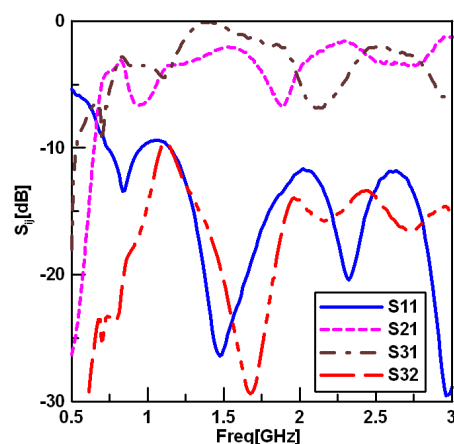


그림 11. 제작된 이중대역 발룬 측정결과.  
Fig. 11. Results of dual-band balun.

이 때 믹서의 펌핑 LO 전력은 10 dBm이다. 이와 같은 믹서에서, LO 누설 전력은 높은 LO 전력을 요구하는 시스템에서 중요한 관심사이다. 이 LO 전력은 RF 포트를 통해서 안테나로 방사되는 전력이 작아지도록 해야 하며 또한, 반대로 RF신호는 LO 포트에 전달되지 않아야 한다.

대부분의 경우 LO와 RF 신호는 상대적으로 작은 주파수 간격으로 분리되어 있기 때문에 여파기를 사용하여 분리하기가 어렵다. 하지만 이 구조에서는 LO 신호가 두 경로로 180° 위상 차이를 갖고 RF 포트로 전달되고, RF 신호는 발문에 의해서 180° 위상 차이로 결합되기 때문에 여파기 없이도 서로의 포트에 고립도를 확보할 수 있다. 이러한 특성을 확인하기 위하여 RF- LO 사이의 고립도는 870 MHz, 1660 MHz 두 주파수에서 25.0 dB 이상의 특성을 얻었다.

여기서 사용된 믹서 다이오드는 Avago사의 HSMS-8202를 서로의 극성을 반대로 하여 각각의 경로에 대칭적으로 연결하였다.

마지막으로 중간 주파수 신호는 믹서의 위와 아래 경로에서 180° 위상 차이가 나타나며, 이것은 저역 통과 여파기와 위상 변환기 그리고 결합기를 통해서 결합된다. 사용된 저역 통과 여파기는 4단 버터워스 응답과 100 MHz의 차단 주파수를 갖고 있으며, 이것으로 인하여 LO-IF와 RF-IF 신호 고립도는 870 MHz에서는 53 dB 이상, 1660 MHz에서는 40 dB 이상 확보하였다.

#### IV. 결 론

이 논문은 평형 믹서를 CRLH 전송선로를 이용하여 870 MHz와 1660 MHz의 이중대역에서 구현한 예를 보여주었다. 이중대역 발문과 윌킨슨 분배기를 구현하여 두 주파수 대역에서 변환손실, LO-RF 고립도 등 전기적인 특성을 확인하였다.

여기서 설계된 이중대역 평형 믹서는 셀룰러와 PCS대역의 이동통신 시스템에서 요구하는 다중대역의 수신기에 적용할 수 있으며, 여러 가지 여파기를 제거하는 효과를 갖고 있다. 또한, 시스템의 요구에 따라서 이중대역을 선택하면 원하는 평형 믹서를 설

계를 할 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

본 논문은 금오공과대학교 학술지원비의 지원에 의한 논문임.

#### 참 고 문 헌

- [1] L.N. Chen, H.H. Xie, Y.C. Jiao and F.S. Zhang, "A Novel 4:1 Unequal Dual-Frequency Wilkinson Power Divider," *ICMMT 2010 Proceedings*, pp. 1290-1293, 2010.
- [2] Y. Wu, Y. Liu and S. Li, " Unequal dual-frequency Wilkinson power divider including series resistor-inductor-capacitor isolation structure", *IET Micro. Antennas Propag.*, vol. 3, Iss. 7, pp. 1079-1085, 2009.
- [3] P. Aflaki, R. Negra and F. M. Ghannouchi, " Dual-band rat-race balun structure using transmission-lines and lumped component resonators", *IMS 2010*, pp. 1572-1575, Jun. 2010.
- [4] H. Choi, S. Shim, Y. Jeong, J. Lim, C. Kim, S. Eom and Y. Jung," 2.14/3.5 GHz novel dual-band negative groupdelay circuit design based on composite right/left handed transmission line", *EuMA 2010*, pp. 441-444, Sep. 2010.
- [5] V.D. Hwang and T. Itoh, "Quasi - optical HEMT and MESFET self-oscillation mixers", *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. 36, pp. 1701-1705, Dec. 1988.
- [6] Y.H. Chou and S.J. Chung, "A three-port 180 degree antenna hybrid: design and applications," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E-84-B, no.9, Sep. 2001.
- [7] D.M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd ed., J. Wiley & Sons, 2005.
- [8] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials Transmission Line theory and microwave applications*, New Jersey: J. Wiley & Sons, 2006.

정 연 우 (鄭然優)



2010년 2월 : 금오공과대학교  
전자공학부 전자공학과 졸업  
(공학사)  
2010년 3월 ~ 현재: 금오공과  
대학교 대학원 전파통신공학과  
재학 중  
관심분야 : RF 회로 설계,  
Metamaterial, 수동소자 회로 설계

윤 영 철 (尹永哲)



1978년 2월: 서강대학교 전자공학과  
(공학사)  
1982년 2월: 서강대학교 대학원  
전자공학과 (공학석사)  
1989년 2월: 서강대학교 대학원  
전자공학과 (공학박사)  
1987년 9월 ~ 현재 관동대학교  
전자정보통신공학부 교수  
관심분야 : RF 및 Microwave 회로설계

김 영 (金英)



1988년 2월: 서강대학교 전자공학과  
(공학석사)  
2002년 8월: 서강대학교 대학원  
전자공학과 (공학박사)  
1988년 1월 ~ 1993년 5월: 이즈텔  
시스템즈(주) 연구소 선임연구원  
1993년 6월 ~ 1998년 2월: 삼성전자  
(주) 정보통신사업본부 선임연구원  
1998년 3월 ~ 2003년 2월 : 두원공과대학 정보통신과 조교수  
2003년 3월 ~ 현재: 금오공과대학교 전자공학부 부교수  
관심분야 : RF 및 Microwave 회로해석 및 설계, 전력  
증폭기 및 선형화기 설계