

넓은 대역폭을 가지는 소형 링 하이브리드

Ring Hybrid Coupler with Compact Size and Wide Bandwidth

김의중*, 김승환*, 김일규*, 이영순*, 김영*, 윤영철**

Ui-Jung Kim*, Seung-Hwan Kim*, Ell-Kou Kim*, Young-Soon Lee*,
Young Kim* and Young-Chul Yoon**

요 약

본 논문은 병렬 캐패시터와 고 임피던스 선로 그리고 CRLH-TLs (Composite Right/Left-Handed Transmission Lines)을 이용한 소형화와 대역폭 확장을 한 링 하이브리드 커플러 설계에 대한 것이다. 소형화를 위해 전송 선로의 길이를 줄이는 방법은 전송선로를 고 임피던스 선로와 병렬 캐패시터로 대체하였고, 또한 대역폭 향상을 위해서는 직렬 캐패시터와 병렬 인덕터로 구성된 CRLH 메타 재질의 비선형적인 위상특성을 이용하였다. 이렇게 제작된 링 하이브리드 커플러는 기존 커플러와 비교해서 크기는 10% 이하로 줄었으며, 대역폭은 60% 이상 확장되었음을 제시하였다.

Abstract

This paper introduces a ring hybrid coupler using shunt capacitors, high impedance lines and CRLH-TLs (Composite Right/Left-Handed Transmission Lines) with size reduction and bandwidth enhancement. The reduced method of line length uses to combine a short length high impedance line and shunt capacitors. Also, there is combined CRLH meta-material so as to obtain wide bandwidth of transmission line using nonlinear phase characteristic of CRLH-TL that consists of series capacitors and shunt inductors. The implemented ring hybrid coupler shows a novel design with compact size that is smaller than 10% and bandwidth is larger than 60% of conventional ring hybrid coupler.

Key words : Ring hybrid coupler, CRLH-TLs, wide bandwidth, size reduction

I. 서 론

차세대 이동통신 시스템 또는 4G 서비스는 단일 모드가 아니라 멀티 모드 서비스를 제공하는 것을 권고하고 있다. 또한, MIMO (Multi-Input Multi-Output)의 높은 데이터율 전송과 스마트 시스템은 RF 시스템의 멀티 밴드, 멀티 접속 그리고 멀티 경로 등을 요

구한다. 또한, 이들 시스템은 많은 상용 시스템에서 원하는 컴팩트한 설계를 요구하고 있다. 집적화와 소형화는 차세대 이동 통신 시스템의 요구 사항이며, 이것은 저 가격과 낮은 전송 손실을 제공한다.

일반적으로, 링 하이브리드는 마이크로웨이브 회로에서 필수적인 수동 소자이며, 평형 믹서, 평형 증폭기, 가변 감쇠기등에 사용되는 소자이다. 그러나,

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

** 관동대학교 전자 정보 통신 공학과(Electronics and Information Communication Engineering, Kwandong University)

· 제1저자 (First Author) : 김의중

· 투고일자 : 2009년 3월 3일

· 심사(수정)일자 : 2009년 3월 20일 (수정일자 : 2009년 4월 10일)

· 게재일자 : 2009년 4월 30일

링 하이브리드, 방향성 결합기 그리고 월킨스 분배기 등에 사용되는 $\lambda/4$ 전송선로는 이동통신 시스템에 사용하기에는 너무 긴 선로이다. 기존의 링 하이브리드는 포트와 포트 사이에 세 개의 $\lambda/4$ 와 한 개의 $3\lambda/4$ 전송선로가 연결되어 있다. 이러한 $\lambda/4$ 배수의 전송선로 길이는 RF보드에 큰 공간을 차지한다[1]~[4].

본 논문에서는 크기 축소와 넓은 대역폭을 확보하기 위해서 집적 마이크로웨이브 소자를 메타 재질로 구현하였다. 특히, 작은 크기를 위해서 짧은 고 임피던스 전송선로와 병렬 캐패시터 그리고 메타 재질의 CRLH 전송 선로를 이용한 소자를 제안하였다. 기존의 링 하이브리드 커플러의 단점을 보완하기 위해서, $\lambda/4$ 의 전송 선로를 짧은 고 임피던스 선로와 병렬 캐패시터로 변환하였고 [5], $3\lambda/4$ 전송선로는 비선형 위상 특성을 갖고 있는 CRLH 메타 재질[6]로 대체하여 크기는 작고 대역폭은 넓은 링 하이브리드를 구현하였다. 링 하이브리드 커플러는 전송선로 대신에 직렬 캐패시터와 병렬 인덕터로 구성된 CRLH 메타 재질로 구현했기 때문에, 작은 공간과 넓은 대역폭을 확보할 수 있었다.

II. 링 하이브리드 커플러 설계

2-1 고 임피던스 선로 와 병렬 캐패시터 설계

$\lambda/4$ 전송선로는 일반적인 링 하이브리드 커플러의 필수적인 소자이다. 이것은 그림 1(a)에 나타내었다. 이러한 전송 선로는 직렬 인덕터와 양쪽의 병렬 캐패시터가 연결된 π 형태로 모델링 할 수 있다. 전송선로의 특성 임피던스는 전송선로의 인덕턴스와 캐패시턴스의 비로 결정되는데, $\lambda/4$ 보다 짧은 전송선로를 만들기 위해서는 인덕턴스값이 변화되기 때문에 고 임피던스 선로와 병렬의 캐패시턴스로 보상할 수 있다.

그림 1(a)의 $\lambda/4$ 전송선로와 그림 1(b)의 $\lambda/4$ 보다 짧은 고 임피던스 선로와 병렬 캐패시터의 전송선로 사이의 호환성을 보이기 위해서 각각의 어드미턴스를 계산하였다. 식 (1)과 (2)는 $\lambda/4$ 전송선로와 짧은 고 임피던스 선로와의 어드미턴스 파라미터를 나타낸 것이다.

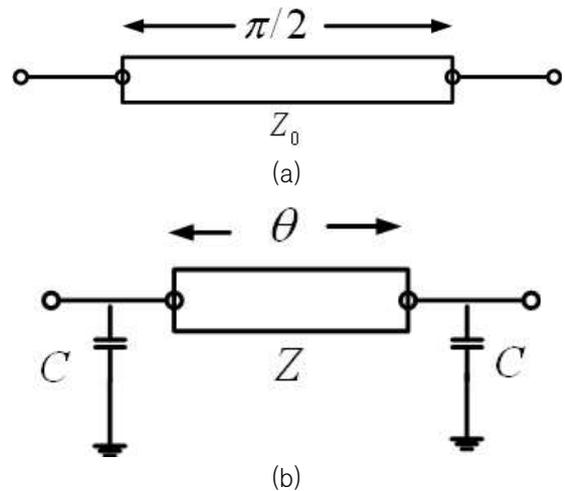


그림 1. (a) $\lambda/4$ 길이의 전송선로 (b)고 임피던스 선로와 병렬 캐패시터를 추가한 전송선로

Fig. 1. (a) $\lambda/4$ wavelength transmission line.

(b) Transmission line with short length high impedance line and shunt capacitors

$$[Y]_a = \frac{1}{jZ_0} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[Y]_b = \begin{bmatrix} \frac{\cos\theta}{jZ\sin\theta} + jwC & \frac{-1}{jZ\sin\theta} \\ \frac{-1}{jZ\sin\theta} & \frac{\cos\theta}{jZ\sin\theta} + jwC \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 Z_0 는 $\lambda/4$ 전송선로의 특성 임피던스, Z 는 짧은 전송선로의 특성 임피던스, θ 는 짧은 전송선로의 전기적 길이 그리고 ω 는 각 주파수를 나타낸다.

두 식을 이용하여 캐패시터 C 값과 임피던스 Z 값을 구할 수 있다.

$$Z = \frac{Z_0}{\sin\theta}, \quad C = \frac{1}{\omega Z \tan\theta} \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여 중심 주파수 880MHz 링 하이브리드 커플러를 설계하여 Agilent사의 소프트웨어 ADS 2005로 시뮬레이션 하였다. 먼저 $\lambda/4$ 전송선로의 길이를 줄이기 위해서, 줄어든 전기적 길이를 $\theta = 45^\circ (\lambda/8)$ 로 선택한다. 결국 포트와 포트 사이의 줄어든 길이는 $\lambda/8$ 이다. 위의 식 (3)에 따라서 고 임피던스 값은 $Z = 70.7 \Omega$ 을 그리고 캐패시터 값을 $C = 2.6pF$ 를 계산할 수 있다. 그림 2는 고 임피던스

선로와 병렬 캐패시터를 사용한 크기가 줄어든 링 하이브리드 커플러를 나타낸 것이다. 여기서 캐패시터 C값들은 두 개의 캐패시터가 병렬로 연결된 5.2pF이다.

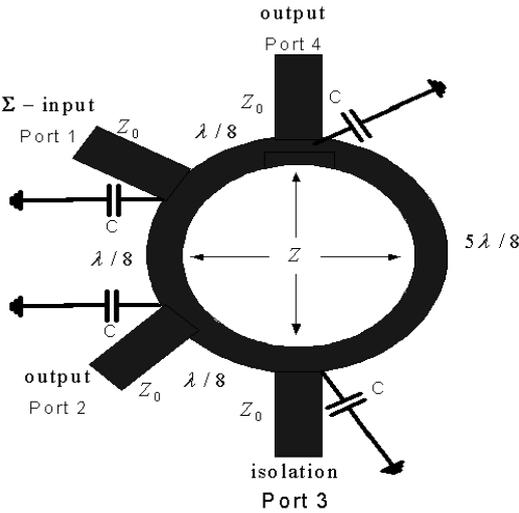


그림 2 전송 선로의 길이가 줄어든 링 하이브리드
Fig. 2. Ring hybrid coupler with reduced transmission line

2-2 CRLH 전송 선로 해석

이상적인 LH (Left-Handed) 전송선로는 직렬 캐패시터 CL과 병렬 인덕터 LL로 구성되어 있다. 그러나, 전송선로에는 전류에 의한 자기장과 전압에 의한 전기장이 존재하기 때문에 LH 전송선로는 직렬 인덕턴스 LR과 병렬 캐패시턴스 CR의 기생 성분이 존재하게 된다. 이것을 LH 전송선로와 기생성분이 결합된 CRLH (Composite Right/Left-Handed) 전송 선로라고 한다[7]. 그림 3은 CRLH 전송선로 단위 셀의 π형 등가회로라고 한다.

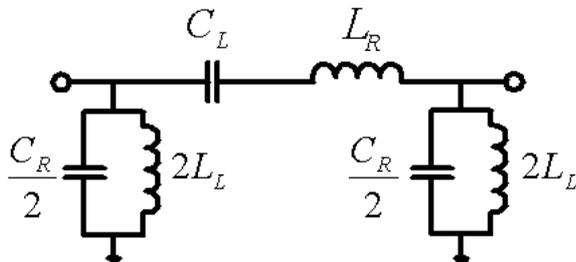


그림 3. CRLH 전송선로 단위 셀의 π형 등가회로

일반적으로, CRLH 전송선로에서 직렬 공진 주파수 (ω_{se})와 병렬 공진주파수 (ω_{sh})가 다르기 때문에 RH와 LH 주파수 사이에 갭이 존재한다.

$$f_{se} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_R C_L}}, f_{sh} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_L C_R}} \quad (4)$$

만일 갭이 없어지는 조건이 될 때 이것을 평형 (Balanced)라고 하며, 이 때 CRLH 전송선로에서 전달 상수는 다음과 같이 나타낸다.

$$\beta_{CRLH} = \beta_{RH} + \beta_{LH} = \omega\sqrt{L_R C_R} - \frac{1}{\omega\sqrt{L_L C_L}} \quad (5)$$

CRLH 전송선로 단위 셀의 위상 응답은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_{CRLH} = \phi_{LH} + \phi_{RH} \quad (6)$$

$$\phi_{LH} = -\tan^{-1}\left(\frac{\omega(L_L/Z_L + C_L Z_L)}{1 - 2\omega^2 L_L C_L}\right) \quad (7)$$

$$\phi_{RH} = -\tan^{-1}\left(\frac{\omega(L_R/Z_R + C_R Z_R)}{2 - \omega^2 L_R C_R}\right)$$

$$Z_R = \sqrt{L_R/C_R}, Z_L = \sqrt{L_L/C_L}$$

식 (7)에서와 같이 RH 전송선로는 음의 위상을 갖고 있고, LH 전송선로는 양의 위상을 갖고 있음을 알 수 있다.

그림 2에서, 광 대역을 위해서 $5\lambda/8$ (225°) 전송 선로를 변화시키기 위해서 CRLH 전송선로를 사용할 것이다. 첫 째, 225° RH 전송선로를 -135° LH 전송선로로 변환한다. 225° RH 전송선로는 90° RH 전송선로의 주파수 응답 기울기와 차이가 크기 때문에 링 하이브리드의 대역폭이 좁아지므로, -135° LH 전송선로 대체하면 90° 의 RH 전송선로와 기울기 차이가 줄어들어 대역폭을 넓힐 수 있다. 결국, LH 전송선로가 동작 주파수에서 완만한 위상 변화를 갖는 비선형 위상 특성을 이용함으로써 대역폭을 확장할 수 있다. 225° 의 위상 지연은 -135° 의 위상 지연으로 등가적으로 판단할 수 있기 때문에 즉 225° 의 RH 전송선로는

-135°의 LH 전송선로로 변화해도 전기적 특성은 아무런 변화가 없다. RH 전송선로와 비교하여 LH 전송선로는 작게 구현할 수 있고, 관심있는 동작 주파수 영역에서 둔감한 주파수 위상 응답을 갖고 있다.

그림 4(a)는 -135° LH 전송선로를 구현한 것으로 -45° LH 전송선로 세 개의 단위 셀로 구성된 것을 나타낸 것이다. 실제적으로 구현할 때는 개별소자를 납땜하기 위해서 RH 전송선로가 필요하다. 따라서 그림 4(b)는 -45°의 LH 전송선로 단위 셀을 구현하기 위해서, 제안된 단위 셀은 -50°의 LH 단위 셀과 두 개의 2.5° RH 셀로 구성하였다.

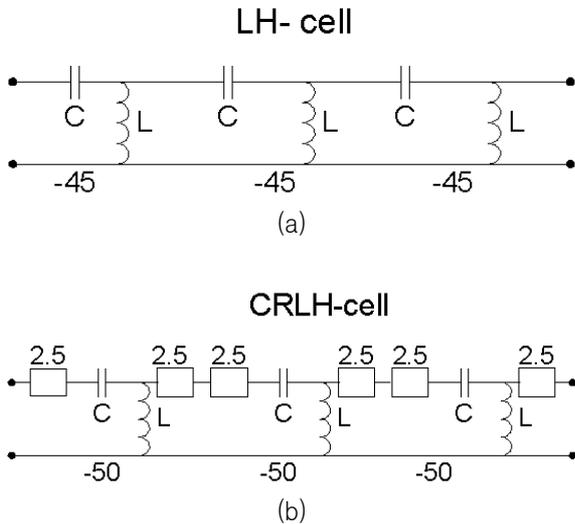


그림 4 (a) -135°의 LH 전송선로의 등가적 회로
 (b) -135°의 CRLH 전송 선로의 등가적 회로
 Fig. 4 (a) Equivalent circuit of -135° LH TLs
 (b) Equivalent circuit of -135° CRLH TLs

위의 LH, RH 그리고 CRLH 전송선로의 위상 응답 특성의 주파수 민감도는 위의 방정식에 의해서 계산되었고, 그림 5는 45°, 90° 그리고 225°의 RH 전송선로와 -135° LH 전송선로의 위상 특성을 나타내었다. 이 그래프를 살펴보면 225°와 90°사이의 위상차와 -135°와 90°도의 위상차를 비교해보면 후자가 더 넓은 주파수 범위에서 위상차 기울기가 작음을 볼 수 있으며, 결국 이러한 특성은 마이크로웨이브 소자의 광대역 대역폭을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

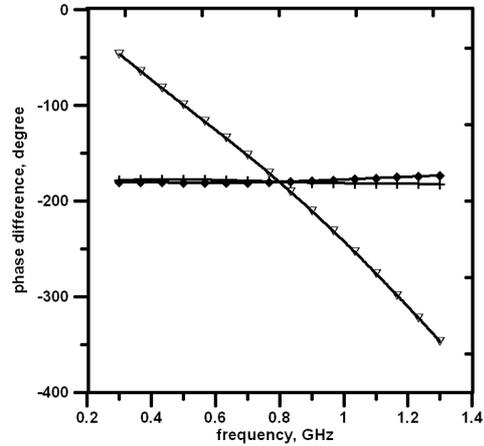


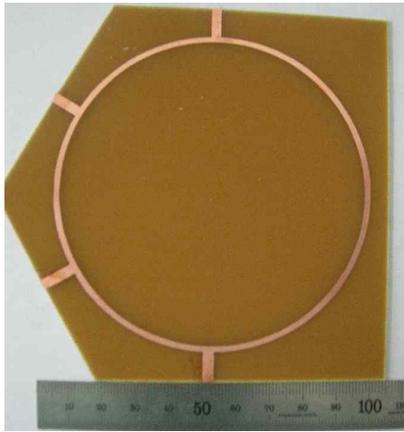
그림 5. LH(-135), RH(90), RH(225) 전송선로의 주파수 변화에 따른 위상변화 차이
 Fig. 5. Phase difference response of LH(-135), RH(90), RH(225) transmission lines

III. 실험 결과

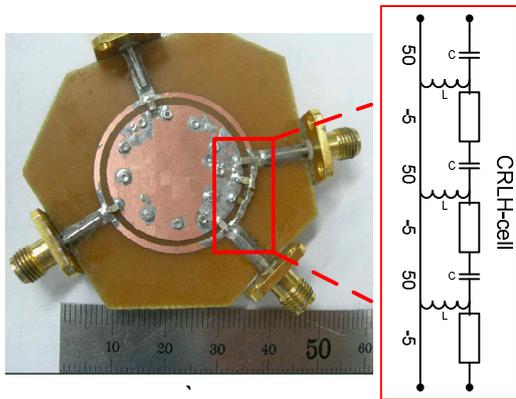
본 논문에서는 링 하이브리드 커플러의 개선된 특성을 확인하기 위해서 유전율(ϵ_r)은 4.3, 기판 두께(h)는 1.6mm인 기판을 사용하여 링 하이브리드 커플러를 시뮬레이션 및 제작 하였다.

커플러의 물리적 크기를 줄이기 위해 $\lambda/4$ 전송선로를 고 임피던스를 갖는 $\lambda/8$ 전송선로와 캐패시터로 대체하고, 두 선로가 접합되는 부분에 병렬로 연결되는 캐패시터는 하나의 캐패시터로 대체 하였다. 또한 대역폭 확대를 위한 LH 전송선로의 직렬 캐패시터 값은 2.8pF, 병렬 인덕터의 값은 15.7nH의 값을 사용하였다. 이렇게 계산되어진 값을 이용하여 CRLH의 평형 구조를 만들어 주기 위해 CRLH 전송선로의 양 끝단의 캐패시터는 2C의 값을 사용하였다. 여기서 사용된 캐패시터와 인덕터 값은 중심 주파수 0.88GHz에 근접한 주파수에서 얼마만큼의 위상 변화 평탄도를 가지는가에 의해 대역폭이 결정된다.

그림 6은 중심 주파수가 0.88GHz인 기존 것과 위의 과정으로 얻어진 소자 들을 링 하이브리드에 적용시킨 것을 비교하여 나타내었다. 제안한 링 하이브리드 커플러의 크기는 기존의 10% 이하 이다.



(a)



(b)

그림 6 (a) 기존의 링 하이브리드 커플러 (b) 제안한 소형 광대역 링 하이브리드 커플러

Fig. 6 (a) Conventional ring hybrid coupler (b) Proposed reduced broadband ring hybrid coupler

다른 형태의 커플러와 제안된 커플러를 비교하기 위해서 커플러의 면적을 표 1에 정리하였다. 기존 링 하이브리드 커플러의 면적을 100으로 볼 때, 고 임피던스와 병렬 캐패시터만으로 크기를 줄인 것과 CRLH 전송 선로를 이용한 것과 비교를 한 것으로 제안한 링 하이브리드 커플러의 크기가 다른 것과 비교해서 현저하게 작게 구현되었음을 알 수 있다.

표 1. 제안한 링 하이브리드와의 면적 비교

Table 1. Comparison the ring hybrid coupler size

Type	size(mm ²)	Percentage(%)
Conventional	6743.33	100%
Reduced size[1]	3066.41	45%
Proposed	606.48	9%

그림 7은 기존 것과 제안된 링 하이브리드 커플러의 측정된 반사계수를 나타낸 것이다. 기준 값을 15dB로 본다면, 제안된 커플러는 0.66 GHz ~ 1.23 GHz (65%)의 넓은 대역폭을 만족함을 알 수 있다. 또한, 0.5dB의 삽입 손실을 기준으로 살펴보면, 0.77 GHz ~ 1.23 GHz (52%)의 대역폭을 갖고 있음을 그림 8에 나타내었다. 그림 9는 포트 1과 포트 3의 고립도를 나타낸 것으로 15dB 이상의 값을 갖고 있음을 알 수 있다.

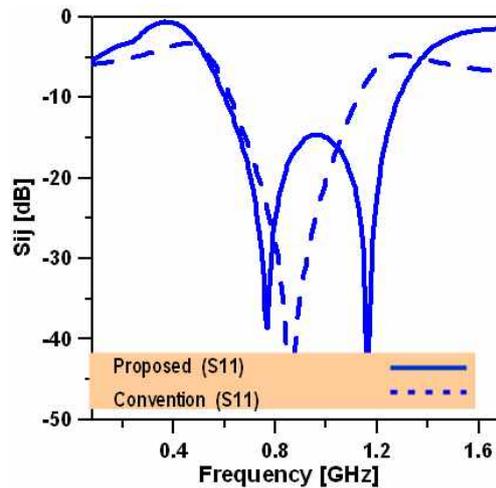


그림 7. 일반적인 링 하이브리드와 제안한 링 하이브리드의 반사계수 측정 결과

Fig. 7 Measured return loss of conventional and proposed ring hybrid

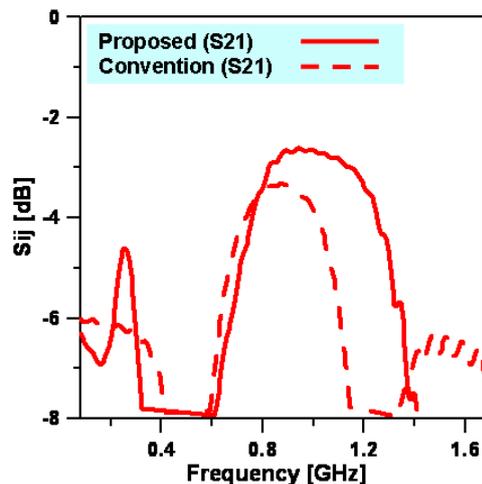


그림 8. 일반적인 링 하이브리드와 제안한 링 하이브리드의 삽입손실 측정 결과

Fig. 8 Measured insertion loss of conventional and proposed ring hybrid

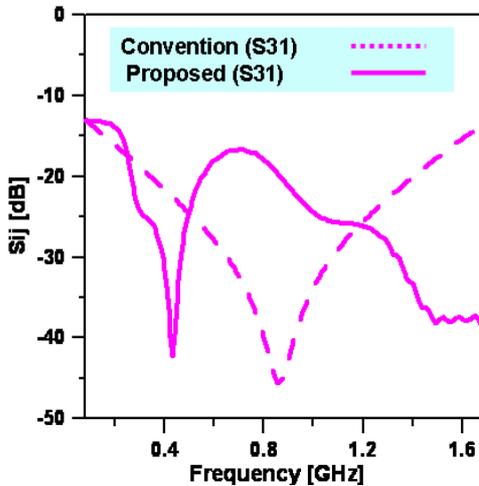


그림 9. 일반적인 링 하이브리드와 제안한 링 하이브리드의 격리도 측정 결과

Fig. 9 Measured isolation of conventional and proposed ring hybrid

IV. 결 론

본 논문에서는 콤팩트하고 광 대역의 링 하이브리드 커플러를 제안하여 기존 것과 비교하였다. 제안한 방법으로 설계된 결과는 기존 것에 비해서 1/10의 면적을 갖고 있음을 확인하였다.

링 하이브리드 커플러를 소형화 하면서 광대역 특성을 갖도록 하기 위해서 $\lambda/4$ 전송선로는 짧은 고 임피던스 전송선로와 두 개의 병렬 캐패시터로 구현하였고, $3\lambda/4$ 전송선로는 비선형 위상 특성을 갖고 있는 LH 전송 선로로 대체하였다. 제작된 링 하이브리드 커플러의 특성은 기존 것 보다 더 넓은 대역폭을 갖고 있음에도 불구하고 크기는 작아졌음을 확인하였다.

이렇게 제안된 링 하이브리드 커플러는 이 커플러를 사용하는 모든 마이크로웨이브 소자나 장치들의 크기를 줄일 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원 (KRF-20060353-D00024)과 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

- [1] V. I. Albanese, W. P. Peyser, "An analysis of a broad-band coaxial hybrid ring," *IRE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 6, pp. 369-373, Oct. 1958.
- [2] L. K. Yeung, Y. E. Wang, "A novel 180o hybrid using broadside-coupled asymmetric coplanar striplines," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 55, pp.2625-2630, Dec. 2007.
- [3] C. -H. Chi, C. -Y. Chang, "A new class of wideband multisection 180o hybrid rings vertically installed planar couplers", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 54, pp. 2478 - 2482, Jun. 2006.
- [4] C. -H. Ho, L. Fan, and K. Chang, "New uniplanar coplanar waveguide hybrid-ring couplers and magic-T's", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 42, pp.2440-2448, Dec. 1994.
- [5] Hirota, T., Minakawa, A., Muraguchi, M, "Reduced size branch line and rat race hybrid for uniplanar MMIC's," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 38, Issue 3, pp.270-275, March 1990.
- [6] H. Okabe, C. Caloz, and T. Itoh. "A compact enhanced-bandwidth hybrid ring using an artificial lumped-element left-handed transmission line section," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 52, no. 3, pp. 798-804, March 2004.
- [7] C Caloz, T Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications*, Wiley & Sons Inc, 2006.

김 의 중 (金義中)



1996년 2월: 금오공과대학교 전자통신공학과 (공학사)
1998년 2월: 금오공과대학교 전자공학과 (공학석사)
2005년 2월: 금오공과대학교 전자통신공학과 (공학박사)
2005년~2006년 3월: (주)오성전자

리모컨사업부 연구소
2006년 9월~현재: 금오공과대학교 모바일연구소 연구교수
관심분야 : Closed-form Green's function method, 안테나의 산란 문제, 도파관 필터

이 영 순



1979년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1981년 2월: 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)
1996년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
1981년~현재: 금오공과대학교 전자공학부 교수

관심분야 : 전자기 이론, 안테나의 산란 문제, 도파관 불연속, 개구 결합

김 승 환



2008년 2월 : 금오공과대학교 전자공학부 전자공학과(공학사)
2008년 3월~ 현재: 금오공과대학교 대학원 전자통신공학과 석사과정

관심분야 : RF 회로 설계, Metamaterial, 수동소자 회로 설계, 고 효율 전력 증폭기 설계

김 영 (金英)



1988년 2월: 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
2002년 8월: 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
1988년 1월 ~ 1993년 5월: 이즈텔 시스템즈(주) 연구소 선임연구원
1993년 6월 ~ 1998년 2월: 삼성전

자(주) 정보통신사업본부 선임연구원
1998년 3월 ~ 2003년 2월 : 두원공과대학 정보통신과 조교수
2003년 3월 ~ 현재: 금오공과대학교 전자공학부 조교수
관심분야 : RF 및 Microwave 회로해석 및 설계, 전력 증폭기 및 선형화기 설계

김 일 규 (金一奎)



2005년 2월 : 금오공과대학교 전자공학부 전자공학전공(공학사)
2007년 2월 : 금오공과대학교 전자공학부 전자공학전공(공학석사)
2007년 2월~현재 : 금오공과대학교 대학원 전자통신공학과 박사과정 재학중

관심분야 : RF 및 microwave 회로 설계, 전력 증폭기 및 선형화기 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 전

자정보통신공학부 교수
관심분야 : RF 및 Microwave 회로설계