

초광대역 위상 역전 전이 구조를 이용한 소형화된 링 하이브리드 결합기 및 주파수 체배기 응용

Size-Reduced Ring-Hybrid Coupler Using Phase-Inverting Ultra-Wideband Transitions and Its Frequency Doubler Application

송선영 · 김영곤 · 박진현 · 김강욱

Sun-Young Song · Young-Gon Kim · Jin-Hyun Park · Kang Wook Kim

요 약

본 논문에서는 한 쌍의 동위상 및 역위상 전이 구조로 이루어진 초광대역 위상 역전 전이 구조를 이용하여 소형화된 크기와 광대역 특성을 갖는 새로운 구조의 링 하이브리드를 제안하고, 그 응용의 예로서, 단일 평형 주파수 체배기를 구현한 예를 보여주고 있다. 제안된 링 하이브리드는 기존의 링 하이브리드 대비 65 % 축소된 크기를 가지며, Σ 단자와 Δ 단자에서 각각 92.5 %와 81.3 %의 대역폭을 갖는다. 또한, 동작 주파수 대역에서 균일한 크기 및 위상의 평형도를 가지므로, 다양한 평형 소자에 응용될 수 있다. 새로운 구조의 링 하이브리드를 이용하여 제작된 주파수 체배기는 회로 시뮬레이션 결과와 유사한 특성을 가지며, 15 dBm의 입력 신호를 인가할 경우 4~12 GHz 대역에서 평균 10.5 dB 변환 손실과 28 dB 이상의 입력 주파수 신호 억압도를 나타낸다.

Abstract

In this paper, a new size-reduced, wideband ring-hybrid coupler is presented, and a design of a planar single-balanced doubler using the ring-hybrid is shown. This ring-hybrid coupler employs a pair of ultra-wideband transitions for phase inversion, which consists of in-phase and out of-phase transitions providing a good amplitude and phase balances for wide frequency ranges. The implemented ring-hybrid is 65 % smaller than conventional ring-hybrids, and provides 92.5 % and 81.3 % bandwidth at Σ and Δ ports, respectively. Thanks to good amplitude and phase balances over wide bandwidth, the ring-hybrid can be applied to implement various balanced components. The implemented single-balanced doubler utilizing the ring-hybrid exhibits typical conversion loss of 10.5 dB for the output frequency range of 4~12 GHz with fundamental suppression level of 30 dB. The performance was also well-predicted with the nonlinear circuit simulation.

Key words : Ring-Hybrid, Size Reduction, Phase Inversion, Transition, Doubler, Ultra-Wideband

I. 서 론

링 하이브리드는 높은 격리도 특성을 갖는 0° 및 180° 전력 분배기로서, 고주파 및 초고주파 시스템 설계 시 평형 주파수 체배기, 혼합기 및 push pull 증

폭기 등의 다양한 소자에 응용되고 있다. 링 하이브리드의 기본적인 구조는 $\lambda/4$ 와 $3\lambda/4$ 의 전기적 길이 차이($Z_0=70.7 \Omega$)를 갖는 네 개의 단자로 구성되어 있으며^[1], 신호를 인가하는 단자에 따라 동위상 혹은 역위상을 갖는 두 개의 반전력 신호를 출력하고, 나

경북대학교 전자공학과(School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University)

*이엠와이즈통신(주)(EM-wise communications)

· 논문 번호 : 20100709-02S

· 교신저자 : 김강욱(e-mail : kang_kim@ee.knu.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 9월 3일

머지 단자는 격리된다. 링 하이브리드는 비교적 간단한 구조와 높은 격리도 특성으로 인해 시스템 설계시 유용하게 쓰이지만, 평균 20~25%의 좁은 대역폭 특성과 540°의 전기적 길이를 요구하는 구조적 특성에 의해 크기가 크다는 단점을 가진다. 최근 들어, 고주파 및 초고주파 시스템의 성능 향상과 원가 절감을 위해 시스템의 소형화 및 광대역화가 요구되어짐에 따라, 기존의 링 하이브리드가 갖는 문제점을 개선하기 위해 다양한 방법이 연구되어 왔다^{[2]~[6]}. 1990년 Hirota는 $\lambda/4$ 기본 선로를 높은 임피던스를 갖는 단락 선로와 두 개의 병렬 커패시터로 대체함으로써 하이브리드의 크기를 줄이는 방법을 제안하였으며^[2], 2000년 Raghu는 하이브리드의 선로를 C모양의 접힌 구조로 대체하여 크기를 줄였다^[3]. 그러나 이와 같은 구조들은 기생 커패시턴스 성분의 발생으로 인한 튜닝이 불가피해지며, 대역폭 개선의 효과가 적었다. 최근 들어, 링 하이브리드의 소형화와 대역폭 개선 문제를 동시에 해결하기 위한 방안으로 위상 반전기(phase inverter)를 이용한 링 하이브리드 설계 방법이 제안되고 있다^{[4]~[6]}. 이때, 사용되는 위상 반전기의 동작 주파수 대역과 180° 위상 평형도 특성은 링 하이브리드의 성능에 중요한 영향을 미친다^[4]. 본 논문에서는 링 하이브리드가 가지고 있는 대역폭 개선과 소형화 과제 해결을 위해, 기존의 $\lambda/4$, $3\lambda/4$ 선로 부분을 초광대역 위상 역전 전이 구조로 대체함으로써 새로운 구조의 링 하이브리드 설계를 제안하였다. 또한, 링 하이브리드의 응용의 예로서 단일 평형 주파수 체배기를 설계 및 제작하였으며, 제안된 체배기의 특성을 나타내었다.

II. 단일 평형 주파수 체배기 설계

2-1 Size-Reduced Ring-Hybrid Coupler 설계

그림 1은 본 논문에서 제안한 초광대역 위상 역전 전이 구조를 이용한 링 하이브리드 결합기의 구조를 나타낸 것이다. 기존의 링 하이브리드 구조에서 $\lambda/4$ 기본 선로를 $\lambda/4$ 동위상 전이 구조로, $3\lambda/4$ 선로를 $\lambda/4$ 역위상 전이 구조로 대체함으로써 링 하이브리드 전체의 전기적 길이가 $3\lambda/2$ 에서 λ 로 축소될 수 있다. 실제로 본 논문에서 제안한 링 하이브리드의 크기는 기존의 크기 대비 65% 소형화 되었다. 소형

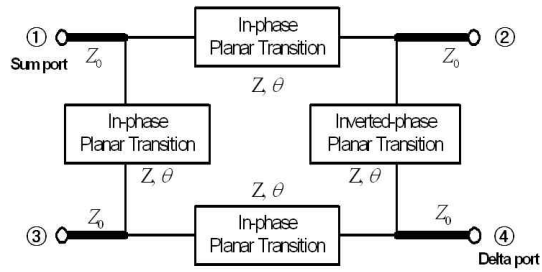


그림 1. 제안된 링 하이브리드 결합기 구조
Fig. 1. Schematic of the proposed ring-hybrid coupler.

화된 링 하이브리드는 각 선로의 길이가 중심 주파수에서 $\lambda/4$ ($\theta=90^\circ$)일 때, 가장 넓은 대역폭 특성을 가지며, 이때, 선로의 특성 임피던스 값은 아래의 식을 통해 결정된다^[6]. 단, L 은 동작 주파수 대역에서 최대 반사 손실 값이다.

$$Z = Z_0 \times \sqrt{2 \left(1 - \frac{2}{10^{-L/20} + 1} \right)} \quad (1)$$

본 논문에서 제안한 링 하이브리드의 특성 임피던스는 62 Ω 이며, 이는 50 Ω 선로와 자연스럽게 매칭이 가능함에 따라 링 하이브리드는 광대역 특성과 20 dB 이상의 높은 반사 손실을 갖게 된다. 링 하이브리드 설계에 사용된 초광대역 위상 역전 전이 구조는 $\lambda/4$ 의 전기적 길이를 갖는 한 쌍의 동위상 및 역위상 전이 구조^[7]로 구성된다. 두 전이 구조로부터 출력 신호 간의 크기 및 위상의 평형도는 링 하이브리드의 전체적 성능에 영향을 끼치는 중요한 요소이므로 넓은 주파수 대역에서 우수한 크기 및 위상차 성능이 요구되어진다.

그림 2는 제안된 두 전이 구조($\lambda/4$ 동위상 및 역위상 전이 구조)의 모습을 나타낸 것이며, 각 전이 구조는 기본적으로 평행판 스트립 선로(parallel strip-line)-CPW(Coplanar Waveguide) 전이 구조를 통해 이루어진다. 각 단계별 유효 유전율은 각각 다른 값을 가지고 있으며, 두 전이 구조 간의 크기 및 위상의 평형도를 위해 위상 역전이 이루어지는 부분(B-C)을 제외한 나머지 부분은 같은 구조를 갖게 된다. 평행판 스트립 선로는 유전체 윗면과 아랫면의 +, - 신호선으로 이루어진 평형 선로(balanced line)이며, 평행판 스트립 선로에서 CPW로의 전이 구조는 접지면과 신호선의 형상 변화(shaping)를 통해 선로의 특성 임피던스를 62 Ω 로 유지시키는 동시에 자연스러운

표 1. 위상 역전 전이 구조의 파라미터

Table 1. Parameters for transition.

W_{gap}	W_g	W_{cpw}	W_p	l_p	S_{gap}
5	20	10	24	82	5

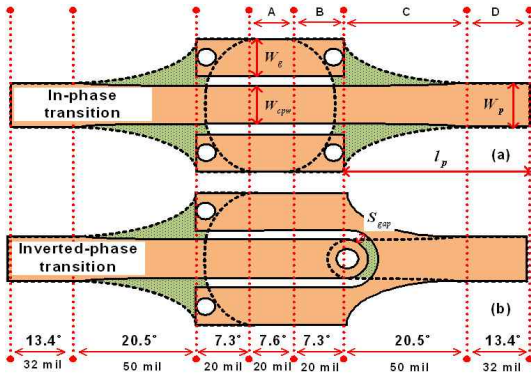


그림 2. 한 쌍의 위상 역전 전이 구조

Fig. 2. A pair of transitions for phase inversion.

전계 분포 전이를 만들어 주었다. 또한, 접지면 연속성을 위해, CPW의 아래 접지면과 양 옆 접지면을 비아를 통해 연결하였다. 두 전이 구조간의 180° 위상 차이를 위해, B-C 부분은 다음과 같이 서로 다른 구조를 갖게 된다. 먼저, 동위상 전이 구조의 경우, CPW의 중앙 신호선이 평행판 스트립 선로의 윗면 신호선으로, 양 옆의 접지면은 비아를 통해 아랫면 신호선으로 연결되며, 접지면과 신호선의 폭을 조절하여 특성 임피던스 값을 62 Ω으로 유지시켰다. 다음으로 역위상 전이 구조의 경우, CPW의 중앙 신호선이 비아를 통해 평행판 스트립 선로의 아랫면 신호선과 연결되고, 양 옆의 접지면은 서로 합쳐진 후 윗면 신호선으로 연결된다.

초광대역 위상 역전 전이 구조 설계를 위해 유전율 3.38을 갖는 두께 8 mil의 RO 4003 기판을 사용하였다. 제안된 전이 구조는 3-D EM 시뮬레이션을 위해 CST Microwave Studio를 사용하였으며, 전이 구조 설계에 사용된 각 파라미터 값은 표 1에 나타내었다. 시뮬레이션 결과를 통해, 동위상 전이 구조는 DC~25 GHz 대역에서 1 dB 이하의 삽입 손실과 평균 20 dB 이상의 반사 손실 특성을 가지며, 역위상 전이 구조는 2.1~25 GHz 대역에서 1 dB 이하의 삽입 손실과 평균 15 dB 이상의 반사 손실 특성을 가

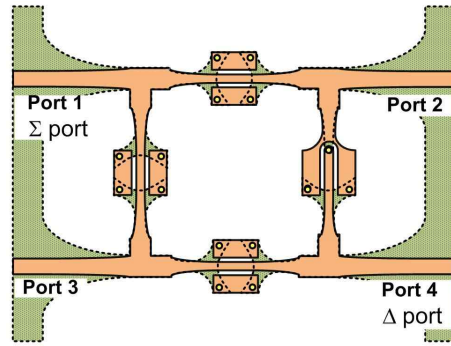


그림 3. 소형화된 링 하이브리드 결합기

Fig. 3. Layout of the proposed size-reduced ring-hybrid coupler.

짐을 확인하였다. 두 전이 구조의 출력 신호 간의 크기 차이는 거의 없으며, 위상 차이는 180° 기준으로 5° 이내의 값을 가진다^[7].

그림 3은 앞서 설명한 초광대역 위상 역전 전이 구조를 이용하여 설계한 소형화된 링 하이브리드($f_c = 8$ GHz)의 모습을 나타낸 것이다. 3개의 $\lambda/4$ 동위상 전이 구조와 1개의 $\lambda/4$ 역위상 전이 구조를 각 단자에 연결한 후, 신호선과 아래의 접지면 형상 변화를 통해 평행판 스트립 선로($Z_0 = 62 \Omega$)에서 마이크로 스트립 선로($Z_0 = 50 \Omega$)로 자연스러운 전이를 이루었다. 제안된 링 하이브리드는 제작에 앞서 CST Microwave Studio를 이용하여 3-D EM 시뮬레이션을 수행하였으며, 결과는 다음과 같다. 그림 4는 단자 1 (Σ 단자)에 신호가 인가되었을 때의 S 파라미터를 나타낸 것이며, 동위상의 반전력 신호가 단자 2, 3에 각각 출력되고, 4.2~12.2 GHz 대역에서 평균 3.5 dB 삽입 손실과 10 dB 이상의 반사 손실 특성을 보인다. 이때, 단자 4는 격리 단자가 되며, 동작 주파수 대역에서 30 dB 이상의 격리도 특성을 갖는다. 양 출력 단자간의 크기 차이는 1 dB 이내이며, 위상 차이는 0° 기준으로 2° 이내의 우수한 평형도를 갖는다. 그림 5는 단자 4(Δ 단자)에 신호가 인가되었을 때의 S 파라미터를 나타낸 것이며, 역위상의 반전력 신호가 단자 2, 3에 각각 출력되고, 단자 1은 격리된다. 이때, 링 하이브리드의 성능은 앞의 경우와 비슷한 특성을 나타낸다.

그림 6은 제작된 링 하이브리드의 윗면과 아랫면을 나타낸 것이며, 사용된 기판은 두께 8 mil의 RO

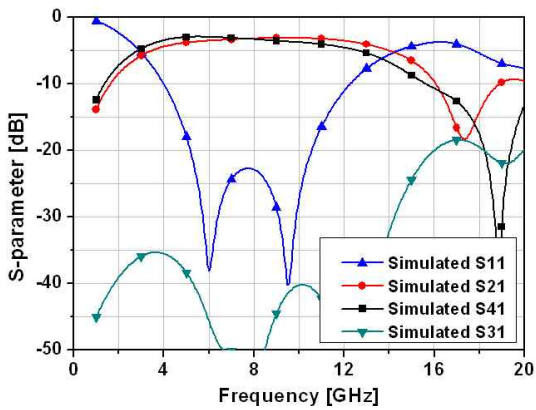


그림 4. Σ 단자의 S-파라미터
Fig. 4. S-parameters for the Σ port.

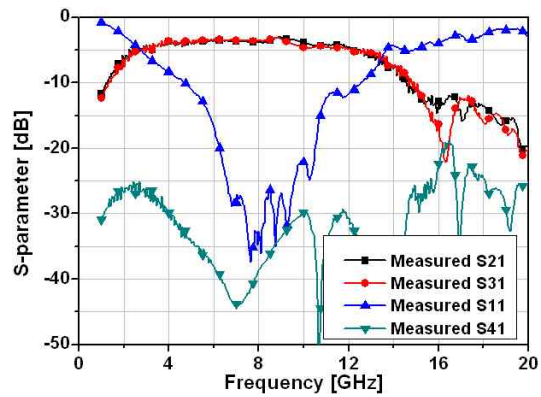


그림 7. Σ 단자의 S-파라미터
Fig. 7. S-parameters for the Σ port.

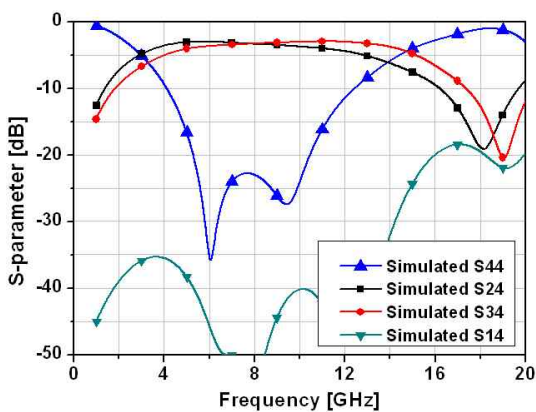


그림 5. Δ 단자 S-파라미터
Fig. 5. S-parameters for the Δ port.

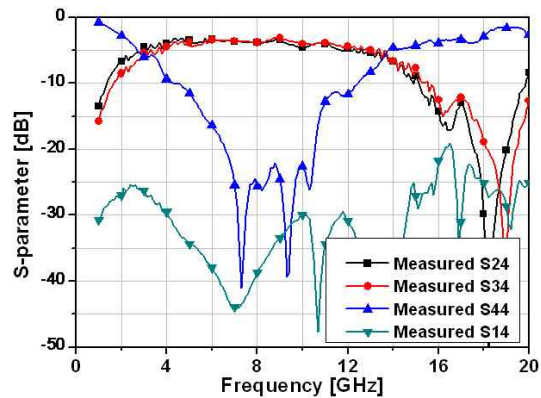


그림 8. Δ 단자 S-파라미터
Fig. 8. S-parameters for the Δ port.

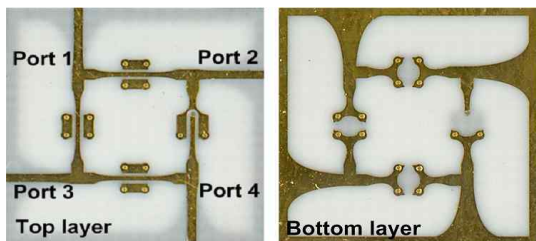


그림 6. 제작된 소형화 링 하이브리드 결합기
Fig. 6. Fabricated size-reduced ring-hybrid coupler.

4003 기판이다. 전체 크기는 $5.4 \times 5.4 \text{ mm}^2$ 로서, 기존의 링 하이브리드 대비 65% 축소된 크기이며, 측정을 위해 평행판 스트립-마이크로스트립 선로 전이 구조를 추가하였다.

제작된 링 하이브리드는 Anritsu사의 Universal test fixture(3680K)와 네트워크 분석기(37397C)를 이용하

여 2~18 GHz 대역의 S 파라미터 특성을 측정하였다. 그림 7은 Σ 단자에 신호를 인가할 경우 얻게 되는 S-파라미터 특성을 나타낸 것이며, 4.9~12.3 GHz 대역(92.5%)에서 평균 4.8 dB 삽입 손실과 10 dB 이상의 반사 손실 값을 보인다. 또한, 동작 주파수 대역에서 30 dB 이상의 높은 격리도 특성을 가지며, 양 출력 단자 간의 크기 차이는 1 dB 이내이고, 위상 차이는 0° 기준으로 4° 이내의 평행도를 나타낸다. 그림 8은 Δ 단자에 신호를 인가할 경우 얻게 되는 S-파라미터 특성을 나타낸 것이며, 5.8~12.3 GHz 대역(81.3%)에서 평균 4.8 dB 삽입 손실과 10 dB 이상의 반사 손실 값을 가진다. 동작 주파수 대역에서 격리도 특성은 30 dB 이상의 값을 가지며, 양 출력 단자간의 크기 차이는 1 dB 이내이고, 위상 차이는 180° 기준으로 3° 이내의 평행도를 나타낸다. 이때, 링 하이브리드의 삽입 손실은 추가된 선로와 제작상

표 2. 성능 비교

Table 2. Performance comparisons.

	This work		참고문헌 [4]		참고문헌 [5]	
	Sum	Dif.	Sum	Dif.	Sum	Dif.
Freq. range (GHz)	4.9~12.3	5.8~12.3	2~4	2~4	1.3~3.1	1.7~3.2
Bandwidth (%)	92.5	81.3	66.6	66.6	81	61
Phase balance(°)	< 4	180 ±3	< 2	< 3.5	±10	180 ±10
Amplitude (dB)	±1	±1	< 0.3	< 0.4	±0.5	±0.5
Isolation	< -30 dB	< -30 dB	< -30 dB	< -20 dB	< -20 dB	< -20 dB
Return loss	< -10 dB	Unknown	Unknown	< -15 dB	< -15 dB	< -15 dB
Size reduction	65 %	65 %	65 %	75 %	65 %	75 %
Used ϵ_r	3.38	10.8	10.8	3.5	3.5	3.5

의 오차를 포함한 값이다.

본 논문에서 제안한 링 하이브리드는 크기의 소형화 및 광대역 특성을 고려한 전체적 성능이 이전의 연구되어온 링 하이브리드^{[4],[5]}의 성능보다 우수하며, 이를 비교한 것을 표 2에 나타내었다.

2-2 단일 평형 체배기 설계

2-1절에서 설계한 링 하이브리드는 넓은 대역에서 양 출력 단자 간의 우수한 크기 및 위상의 평형도를 가지므로, 180° 전력 분배기(발룬)를 필요로 하는 다양한 평형 소자 설계에 유용하게 쓰일 수 있다. 그 실례로서, 본 논문에서는 단일 평형 주파수 체배기를 제안하였으며, 그 성능을 나타내었다.

체배기 설계 시 사용되는 쇼트키 다이오드는 일반적으로 FET, 바랙터 다이오드에 비해서 넓은 대역의 성능을 가지며^[8], 쇼트키 다이오드를 이용한 단일 평형 체배기의 주파수 대역은 사용되는 발룬에 의해 결정된다. 발룬의 신호 크기 및 위상의 평형도는 체배기의 변환 손실 및 입력 주파수를 포함한 홀수 차 하모닉(odd-order harmonics) 성분 신호의 억압 특성에 중요한 영향을 끼친다.

그림 9는 단일 평형 주파수 체배기의 등가회로를 나타낸 것이다. 입력 단자에 인가된 신호는 역병렬의 두 다이오드에 흐르게 되고, 다이오드는 반주기를 기준으로 서로 번갈아가며 동작하게 된다. 이 과

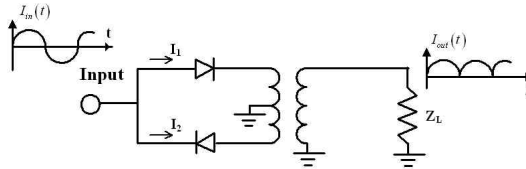


그림 9. 단일 평형 주파수 체배기의 등가회로
Fig. 9. Equivalent circuit of the single-balanced doubler.

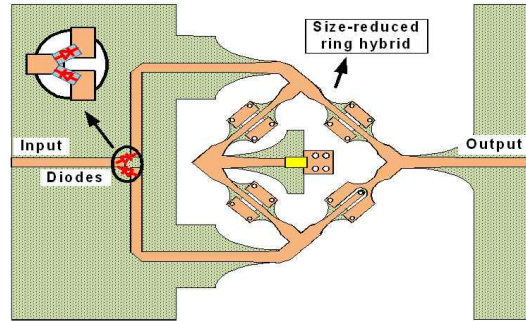


그림 10. 제안된 단일 평형 체배기
Fig. 10. Configuration of the proposed frequency doubler.

정을 통해 하모닉 신호가 생성되며, 발룬을 통과하면서 입력 주파수 신호의 두 배의 주파수 신호가 출력 된다. 이때, 사용되는 발룬의 성능이 우수할수록 스퓨리어스 신호를 제거하기 위한 대역 통과 여파기 혹은 대역 차단 여파기의 필요가 없어진다^[9].

그림 10은 2-1절에서 제안한 링 하이브리드를 이용하여 설계한 단일 평형 체배기의 모습을 나타낸 것이다. 체배기 입력단에 위치한 마이크로스트립 선로 T-junction 위에 두 개의 쇼트키 다이오드를 역병렬로 구성하였으며, 출력단은 앞서 설계한 링 하이브리드로 구성하였다. 이때, 링 하이브리드의 격리 단자는 50 Ω 저항을 이용하여 종단시켜 주었다. 제안된 체배기는 출력단에 사용된 링 하이브리드에 의해서 짝수차 하모닉(even-order harmonics) 성분의 신호가 출력되고, 입력 주파수 신호를 포함한 홀수차 하모닉 성분의 신호에 대해 높은 억압도 특성을 가진다. 이는 푸리에 급수로 표현되는 다이오드의 전류 파형을 통해 설명될 수 있다^[10]. 두 다이오드에 흐르는 전류는 방향 및 시간 지연을 제외하고는 그 성분이 동일하며, 두 다이오드에 흐르는 홀수차 하모닉 성분 신호는 동위상이므로 발룬을 지나면서 서로 상쇄된다. 반면에, 두 다이오드에 흐르는 짝수차

하모닉 성분 신호는 역위상이므로 발륜을 지나면서 결합되어 출력된다. 또한, DC 신호가 흐를 경우, 발륜은 단락 회로가 되므로 DC return path로 동작한다^[11]. 이와 같이 발륜을 이용한 단일 평형 체배기는 자체적인 필터링 특성을 지니고 있으며, 입력단과 출력단 간의 높은 격리도 특성을 갖는 장점이 있다.

제안된 체배기 구현을 위해 두께 8 mil의 RO 4003 기판을 이용하였으며, M/A-com사의 GaAs flip-chip 다이오드(MA4E1317)를 사용하였다. 제작에 앞서, Ansoft Designer Software의 하모닉 밸런스 시뮬레이터를 이용하여 제안된 체배기의 성능을 분석하였다. 먼저 3-D EM 시뮬레이션을 통해 링 하이브리드의 S-파라미터 특성을 추출하였으며, 체배기의 비선형 특성 분석을 위해 MA4E1317의 스파이스 파라미터 값을 이용하였다. 입력 신호 전력은 +15 dBm을 인가하였으며, 2~6 GHz의 입력 주파수 범위에서 100 MHz 간격으로 특성을 얻었다. 수행된 회로 시뮬레이션 결과를 바탕으로 체배기의 성능을 미리 예측할 수 있었다.

그림 11은 RO 4003 기판을 이용하여 제작한 체배기의 윗면과 아랫면을 나타낸 것이며, 체배기의 크기는 20×13 mm²이다. 제작된 체배기 측정을 위해 Anritsu사의 Universal test fixture(3680K)와 Agilent사의 신호 발생기(E8257C) 및 스펙트럼 분석기(E44-48A)를 사용하였으며, 입력 신호의 전력은 +15 dBm을 인가하였다. 그림 12는 하모닉 밸런스 시뮬레이션을 통해 얻은 체배기의 특성과 제작된 체배기의 특성을 비교한 것이다. 시뮬레이션 결과, 링 하이브리드를 응용한 체배기는 4~12 GHz 출력 주파수 대역에서 평균 11 dB의 변환손실 값을 가지며, 2~6 GHz 입력 주파수 대역에서 35 dB 이상의 높은 입력 주파수 억압 특성을 갖는다. 실제로 구현된 체배기의 성능은 4~12 GHz 출력 주파수 대역에서 평균

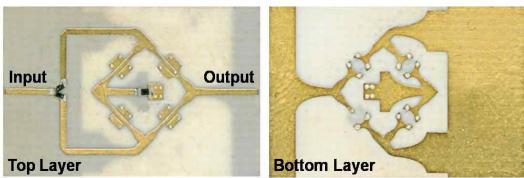
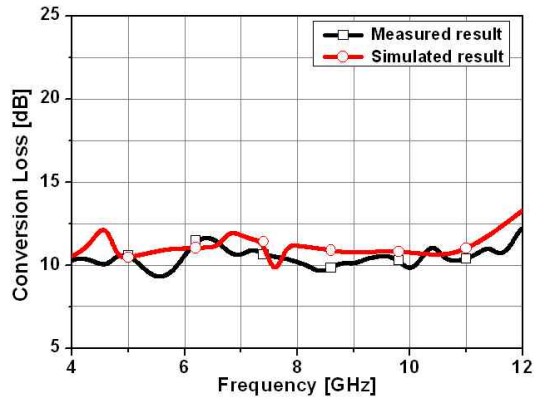
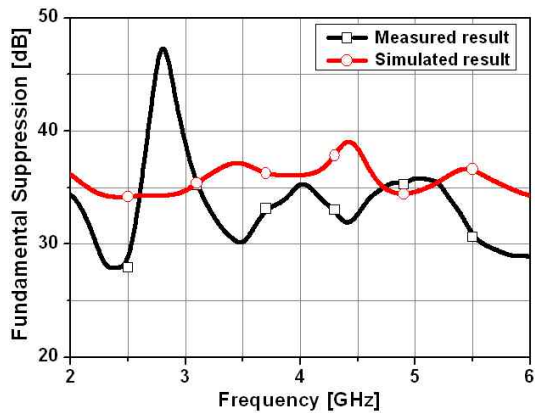


그림 11. 제작된 단일 평형 주파수 체배기
Fig. 11. Fabricated single-balanced frequency doubler.



(a) 변환 손실
(a) Conversion loss



(b) 입력 주파수
(b) Fundamental frequency suppression

그림 12. 제작 결과
Fig. 12. Simulated and measured results.

10.5 dB의 변환 손실 값을 가지며, 2~6 GHz 입력 주파수 대역에서 28 dB 이상의 입력 주파수 억압 특성을 보인다. 이에 따라, 측정된 체배기의 성능은 하모닉 밸런스 시뮬레이션을 통해 얻은 결과와 매우 유사한 결과를 얻음을 확인하였다.

III. 결 론

본 논문에서는 초광대역 위상 역전 전이 구조를 이용한 새로운 구조의 링 하이브리드의 설계를 보여 주고 있으며, 이는 크기의 소형화와 광대역 특성을 만족시킨다. 링 하이브리드의 광대역 특성과 우수한 크기 및 위상의 평형도를 활용하여 단일 평형 주파수 체배기를 설계하였으며, 제작된 체배기는 4~12

GHz 대역에서 평균 10.5 dB의 변환 손실과 입력 주파수를 포함한 홀수 차 하모닉 성분의 신호에 대한 높은 억압도 특성을 보인다. 이 결과를 통해, 새로운 구조의 링 하이브리드는 향후 다양한 평형 소자에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] C. Y. Pon, "Hybrid-ring directional coupler for arbitrary power division", *IRE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. MTT-9, pp. 529-535, 1961.
- [2] T. Hirota, A. Minakawa, and M. Muraguchi, "Reduced-size branch-line rat-race hybrids for uniplanar MMICs", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 38, no. 3, pp. 270-275, Mar. 1990.
- [3] R. K. Settaluri, G. Sundberg, A. Weisshaar, and V. K. Tripathi, "Compact folded line rat-race hybrids for uniplanar MMICs", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 38, pp. 270-275, Mar. 1990.
- [4] C. H. Ho, L. Fan, and K. Chang, "New uniplanar coplanar waveguide hybrid-ring couplers and magic-T's", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 42, no. 12, pp. 2440-2448, Dec. 1994.
- [5] T. T. Mo, Q. Xue, and C. H. Chan, "A broadband compact microstrip rat-race hybrid using a novel CPW inverter", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 55, no. 1, pp. 161-167, Jan. 2007.
- [6] T. Q. Wang, K. Wu, "Size-reduction and band-broadening design technique of uniplanar hybrid ring coupler using phase inverter for M(H)MIC's", *IEEE Trans Microwave Theory Tech.*, 47, pp. 198-206, 1999.
- [7] Y. G. Kim, S. Y. Song, and K. W. Kim, "A pair of ultra-wideband planar transitions for phase inversion applications", *Accepted for Publication in IEEE Microwave and Wireless Component Letter*, 2010.
- [8] 김인복, 김영근, 장태경, 송선영, 김강욱, "대역 가변형 초광대역 단일 평형 체배기의 설계", *한국전자과학회논문지*, 20(8), pp. 714-720, 2009년 8월.
- [9] H. Ogawa, A. Minagawa, "Uniplanar MIC balanced multiplier-A proposed new structure for MIC's", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 35, no. 12, pp. 1363-1368, Dec. 1987.
- [10] M. T. Faber, J. Chramiec, and M. E. Adamski, *Microwave and Millimeter-Wave Diode Frequency Multipliers*, Norwood, MA: Artech House, 1998.
- [11] S. A. Maas, *The RF and Microwave Circuit Design Cookbook*, Norwood, MA, Artech House, 1998.

송 선 영



2008년 2월: 한밭대학교 정보통신 컴퓨터학부 (공학사)
 2009년 3월~현재: 경북대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 초고주파 회로 설계, 믹서 및 주파수 체배기

김 영 근



2006년 2월: 경북대학교 전자전기 컴퓨터학부 (공학사)
 2008년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
 2008년 3월~현재: 경북대학교 전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 초고주파 회로 설계, 초광대역 발룬, 광대역 믹서 및 주파수 체배기

박진현



2006년 2월: 경북대학교 전자전기
컴퓨터학부 (공학사)
2010년 3월~현재: 경북대학교 전
자공학과 석사과정
[주 관심분야] 초고주파 회로 설계,
광대역 여파기

김강욱



1985년 2월: 서울대학교 전기공학
과 (공학사)
1987년 2월: 서울대학교 전기공학
과 (공학석사)
1996년 7월: University of California,
Los Angeles. 전자공학과 (공학박
사)
1987년~1990년: 한국전기연구소 연구원
1996년~1998년: University of California Los Angeles. Post-
Doctor 연구원
1998년~1999년: P-Com, Inc. 마이크로파 설계연구원
1999년~2001년: Narda DBS Microwave, RF 설계연구원
2001년~2005년: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 조교수
2006년~현재: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 부교수
2007년 5월~현재: 이엠와이즈통신(주) 대표이사
[주 관심분야] 마이크로파 통신시스템 및 서브시스템, 마
이크로파 및 밀리미터파 부품 및 패키징, 무선통신용 안
테나, 전자기 상호 작용 및 전자기 수치 해석