

수직 결합 구조를 이용한 방향성 결합기

윤태순*

The Directional Coupler Using the Vertical Coupling Structure

Tae-Soon Yun*

요 약

본 논문에서는 CPW 선로를 기반으로 한 수직 결합 구조를 이용한 반전력의 방향성 결합기가 설계 및 제작되었다. CPW 수직 결합 구조의 우수 모드는 유전체 기판 두께의 반을 갖는 일반적인 CPW 선로로 해석될 수 있으며, 기수 모드는 CBCPW 선로로 해석될 수 있다. 반전력 방향성 결합기는 유전율 2.55, 기판 두께 0.76mm의 테프론 기판 상에 중심주파수 2.45 GHz, 대역폭 61.6%로 설계되었으며, 제작된 반전력 방향성 결합기는 중심주파수 2.45 GHz, 대역폭 66.1%를 가졌고, 중심주파수에서 반사손실과 격리도는 각각 19.52 dB와 19.47 dB를 가졌다.

ABSTRACT

In this paper, the directional coupler with half-power division is designed and fabricated by using the vertical coupling structure based on the CPW transmission-line. Even-mode and odd-mode of the vertical coupling structure can be analyzed by the conventional CPW-line and the CBCPW-line, respectively, with half thickness of the substrate. The directional coupler is designed by using the tefron substrate with the dielectric constant of 2.55 and the thickness of 0.76mm. Manufactured directional coupler has the center frequency of 2.45 GHz and the bandwidth of 66.1%. Also, the return loss and isolation are 19.52dB and 19.47dB, respectively, at the center frequency.

키워드

Directional Coupler, Vertical Coupling Structure, Coupling, CPW-Line
방향성 결합기, 수직 결합 구조, 결합도, CPW 선로

1. 서 론

결합기(Coupler)는 입사 또는 송출하는 초고주파 신호를 나누거나 합치는 소자로 초고주파 회로에서 많은 부분에 이용되고 있다. 이러한 결합기에는 방향성 결합기(directional coupler), 가지선로 분배기(branch-line divider), 링 커플러(ring coupler), 윌킨스 분배기(wilkinson divider)가 있다[1-4].

이러한 결합기의 주요 설계 변수는 결합기의 면적과 결합도의 구현, 주파수 대역폭 등이라 할 수 있는데, 가지선로 분배기(branch-line divider), 링 커플러(ring coupler), 윌킨스 분배기(wilkinson divider)는 방향성 결합기에 비해 반전력 분배기와 같은 큰 결합도를 갖도록 제작이 용이한 반면 $\lambda/4$ (quarter-wavelength) 길이의 전송 선로를 반복적으로 사용함에 따라 상대적으로 큰 면적을 필요로 한다.

* 교신저자 : 호남대학교 전자공학과
• 접수일 : 2017. 04. 21
• 수정완료일 : 2017. 05. 31
• 게재확정일 : 2017. 06. 16

• Received : Apr. 21, 2017, Revised : May. 31, 2017, Accepted : Jun. 16, 2017
• Corresponding Author : Tae-Soon Yun
Dept. Electronics Eng., Honam University,
Email : easteryun@gmail.com

가지선로 분배기와 윌킨스 분배기를 통해 넓은 대역 폭을 구현하려면 다단으로 구현해야 함에 따라 더 큰 면적이 필요로 하게 된다[5].

방향성 결합기는 그 크기 부분에서는 다른 결합기 구조에 비해 우수하지만, 높은 결합도(tight coupling)를 구현할 때 결합 선로의 우수 모드와 기수 모드 임피던스 차이가 커져 결합 선로의 간격이 매우 작아짐에 따라 구현이 어렵다는 단점이 있다. 이에 따라 마이크로스트립 전송선로의 접지면을 활용하여 수직 구조로 결합도를 향상시킨 수직 결합 구조에 대한 연구가 진행되고 있다[6-7].

수직 결합 구조는 초고주파 커플러, 혼합기 및 광통신 소자 분야에서도 다양하게 연구가 진행되고 있으나, 그 구조에 대한 해석은 아직 미미한 상태이다.

본 논문에서는 마이크로스트립 전송선로를 기반으로 하는 수직 결합 구조의 불연속을 해결하기 위해 코플래너 웨이브가이드(coplanar waveguide: CPW) 구조를 기반으로 수직 결합 구조를 해석하고, 이를 통해 광대역 방향성 결합기를 구현하고자 한다.

II. 코플래너 웨이브가이드 기반의 수직 결합 구조 해석

그림 1 (a)는 코플래너 웨이브가이드 선로를 기반으로 한 수직 결합 구조를 나타내고 있고, 수직 결합 구조의 우수 모드와 기수 모드는 그림 1(b)와 1(c)에 각각 나타낸 바와 같다. 우수 모드에서는 결합 선로에 동일한 전위가 인가되었음을 가정으로 하여 대칭면은 개방 구조를 가지게 되고, 기수 모드에서는 대칭면이 접지 구조를 가지게 된다. 즉, 수직 결합 구조의 우수 모드는 유전체 높이 $h/2$ 를 갖는 전형적인 코플래너 웨이브가이드 선로의 구조이며, 기수 모드는 하단 접지면을 갖는 코플래너 웨이브가이드 즉, CBCPW (conductor backed CPW) 구조가 된다.

수직 결합 구조의 우수 모드와 기수 모드 임피던스 계산을 위해 conformal mapping을 적용하였다.

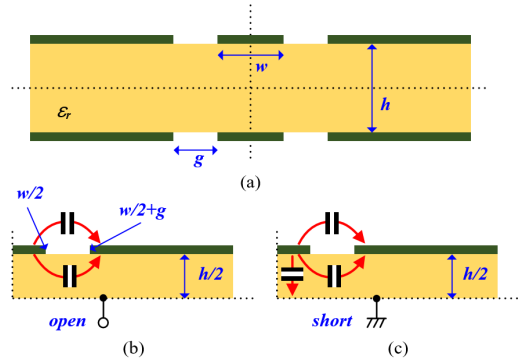


그림 1. (a) 코플래너 웨이브가이드 선로 기반의 수직 결합 구조 : 수직 결합 구조의 (b) 우수 모드와 (c) 기수 모드

Fig. 1 (a) Vertical coupling structure : (b) even-mode and (c) odd-mode

Conformal mapping은 타원의 형태로 형성되는 전개 구조를 평행판 형태로 변환 함수를 이용하여 변환하는 것으로 이를 통해 유효 유전율 및 임피던스를 계산할 수 있다[8-10].

먼저, 우수 모드에서의 유효 유전율과 임피던스는 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$\epsilon_{re,even} = 1 + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{K(k_2)}{K'(k_2)} \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \quad (1)$$

$$Z_{even} = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{re,even}}} \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)에서 $K(k)$ 와 $K'(k)$ 는 1차 완전 타원 적분을 가리키는 것으로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{K(k)}{K'(k)} &= \frac{\pi}{\ln[2(1+\sqrt{k})/(1-\sqrt{k})]} \quad (0 \leq k \leq \sqrt{2}) \\ \frac{K(k)}{K'(k)} &= \frac{1}{\pi} \ln[2(1+\sqrt{k})/(1-\sqrt{k})] \quad (\sqrt{2} \leq k \leq 1) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 k' 은 $\sqrt{1-k^2}$ 로 주어지는 값이다. 타원 적분의 변수 k_1 과 k_2 는 다음과 같다.

$$k_1 = \frac{w/2}{w/2 + g} = \frac{w}{w + 2g}$$

$$k_2 = \frac{\sinh(\pi w / 2h)}{\sinh\{\pi(w + 2g) / 2h\}} \quad (4)$$

기수 모드에서의 유효 유전율과 임피던스는 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$\epsilon_{re,odd} = 1 + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{K(k_3)}{K'(k_3)} \Big/ \left(\frac{K(k_1)}{K'(k_1)} + \frac{K(k_3)}{K'(k_3)} \right) \quad (5)$$

$$Z_{odd} = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{re,odd}}} \cdot 1 \Big/ \left(\frac{K(k_1)}{K'(k_1)} + \frac{K(k_3)}{K'(k_3)} \right) \quad (6)$$

식 (5)에서 타원 적분의 변수 k_3 은 다음과 같다.

$$k_3 = \frac{\tanh(\pi w / 2h)}{\tanh\{\pi(w + 2g) / 2h\}} \quad (7)$$

III. 수직 결합 구조를 이용한 방향성 결합기

방향성 결합기를 이용하여 반전력 분배기를 구현하기 위해서는 우수 모드와 기수 모드 임피던스가 각각 120.7Ω, 20.7Ω이 되어야 한다. 본 논문에서는 2장에서의 해석 방법을 이용하여 유전율 2.55, 기판 두께 0.76mm의 테프론 기판에서의 우수모드와 기수모드 임피던스를 계산하였다.

그림 2에서 나타난 바와 같이 코플래너 웨이브가이드 선로의 폭이 증가함에 따라 우수 모드 임피던스와 기수 모드 임피던스는 감소하고, 선로와 접지의 간격이 증가함에 따라 임피던스는 감소한다. 또한, 우수 모드 임피던스는 증감폭이 크지만, 기수 모드 임피던스는 증감폭이 상대적으로 작은 것을 알 수 있다.

이러한 해석법을 이용하여 코플래너 웨이브가이드 선로 기반의 수직 결합 선로의 신호선 폭과 간격을 계산하여 3차원 전자파 해석 툴을 통해 반전력 방향성 결합기를 설계하였다.

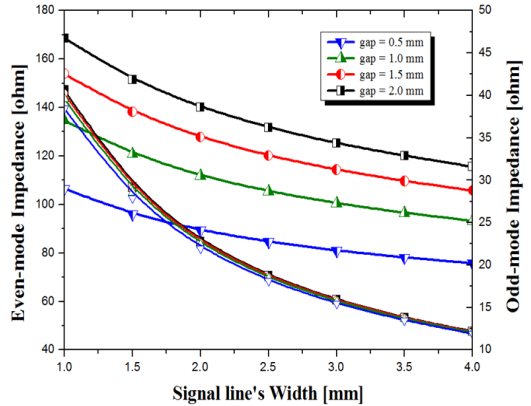
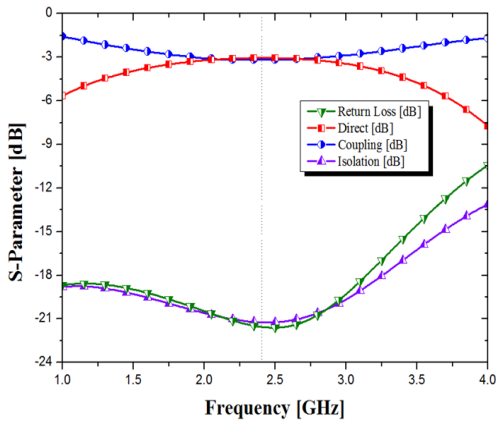


그림 2. 코플래너 웨이브가이드 선로의 폭과 간격에 따른 우수모드 및 기수모드 임피던스
Fig. 2 Even-mode and odd-mode impedance as the width and gap of the CPW-line

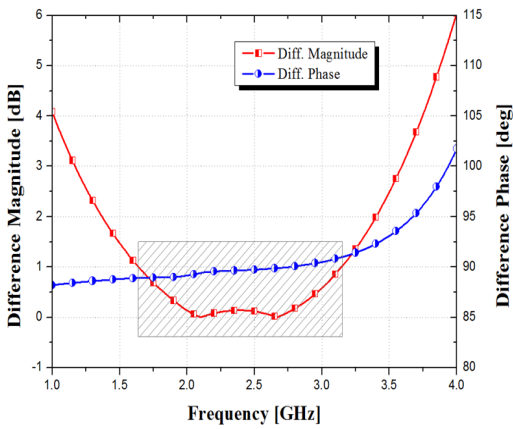
반전력 방향성 결합기는 우수 모드와 기수 모드 임피던스가 각각 120.7Ω, 20.7Ω이 되어야 하므로 그림 2의 결과로부터 초기값으로 선정하고 최적화 과정을 통해 선로 폭과 접지와의 간격은 각각 3.9 mm, 1.04 mm로 설계하였으며 결합 구조의 길이는 설계 주파수 2.45 GHz에 맞춰 23.4 mm로 하였다. 또한, 각 포트에서의 코플래너 웨이브가이드 선로 폭과 접지면과의 간격은 각각 2.0 mm, 1.0mm로 최적화 하였다.

방향성 결합기의 모든 포트는 상단면에 배치하였으며 결합 포트(coupled-port)와 격리 포트(isolation-port)는 비아 홀을 통해 수직 결합 구조의 하단면과 연결시켰다. 또한, 코플래너 웨이브가이드 선로는 불연속면에서 방사 손실이 크게 증가하게 되므로 이를 줄이기 위해 입력 포트(input-port)와 연결 포트(direct-port) 부분과 수직 결합 구조의 연결 부분에 와이어 본딩을 삽입하여 손실을 줄였다.

그림 3은 반전력 방향성 결합기의 설계 결과이다. 그림 3(a)에서 결합기의 중심주파수는 2.45 GHz이고, 입력 포트에서의 방사 손실 20dB의 대역폭은 58.8%로 나타났다. 또한, 그림 3(b)에 나타난 바와 같이, 1.64 GHz에서 3.15 GHz 범위 (61.6% 대역폭) 안에서 출력 포트(연결 포트 및 결합 포트) 간의 신호 크기 차이 및 위상 차이는 대역폭 내에서 각각 ± 1dB 이내, 90 ± 1.2° 이내로 나타났다.



(a)



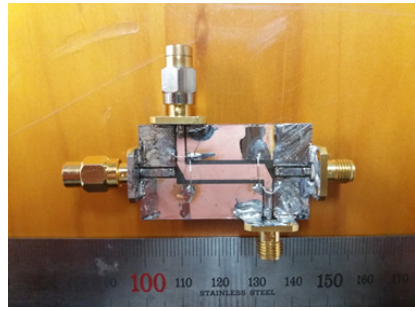
(b)

그림 3. 코플래너 웨이브가이드 기반의 수직 결합 구조를 이용한 반전력 방향성 결합기의 설계 결과 : (a) S-파라미터 특성 및 (b) 출력 포트 간 크기 및 위상 차이

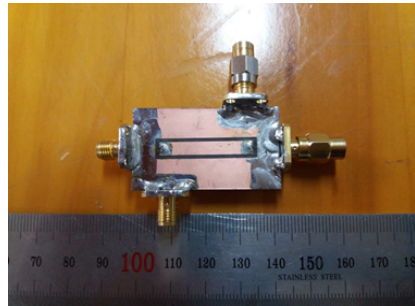
Fig. 3 Simulated results of half-power directional coupler using the vertical coupling : (a) S-parameter and (b) difference of the magnitude and phase

그림 4는 이러한 설계 결과를 바탕으로 제작된 반전력 방향성 결합기의 사진이다.

그림 4(b)에 나타난 바와 같이 방향성 결합기의 하단면은 수직 결합 구조만을 구성하도록 하였고, 결합기의 모든 포트는 상단면에 배치하였다. 그리고, 코플래너 웨이브가이드 선로의 불연속에 의한 방사 손실을 줄이기 위해 와이어 본딩을 그림 4(a)와 같이 하였다.



(a)

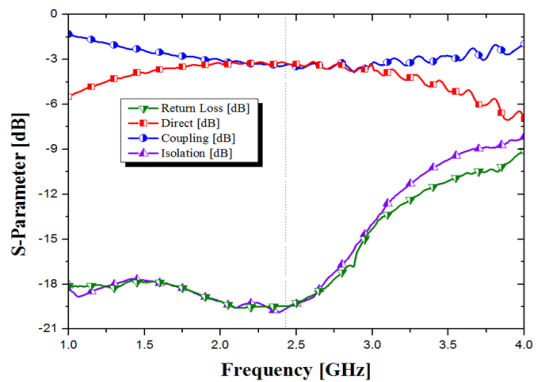


(b)

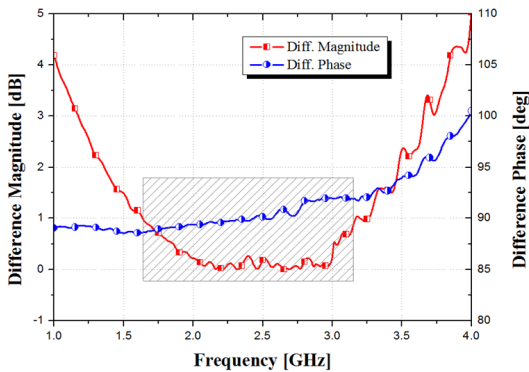
그림 4. 반전력 방향성 결합기의 제작 사진의 (a) 상단면과 (b) 하단면

Fig. 4 (a) Upper side and (b) bottom side of manufactured photos of the half-power directional coupler

제작된 반전력 방향성 결합기의 측정 결과는 그림 5와 같다.



(a)



(b)

그림 5. 코플래너 웨이브가이드 기반의 수직 결합 구조를 이용한 반전력 방향성 결합기의 측정 결과 : (a) S-파라미터 특성 및 (b) 출력 포트 간 크기 및 위상 차이

Fig. 5 Measured results of half-power directional coupler using the vertical coupling : (a) S-parameter and (b) difference of the magnitude and phase

그림 5(a)에서 나타낸 바와 같이, 측정된 방향성 결합기의 중심주파수는 2.45 GHz를 가졌으며 중심주파수에서의 연결 포트로의 삽입 손실과 입력 포트에서의 반사 손실은 각각 3.33dB, 19.52dB로 측정되었다. 격리 포트의 출력 값인 격리도는 중심주파수에서 19.47dB의 값을 나타냈다.

또한, 반전력 분배기로 설계된 이상적 방향성 결합기는 출력 포트 간에 신호 크기가 없어야 하고 위상 차이는 90°인 것에 비해 그림 5(b)에 나타낸 바와 같이, 1.64 GHz에서 3.26 GHz 범위 (66.1% 대역폭) 안에서 출력 포트 간의 신호 크기 차이 및 위상 차이는 대역폭 내에서 각각 ± 1 dB 이내, $90 \pm 2.1^\circ$ 이내로 나타나 설계 결과와 유사한 결과 값을 얻을 수 있었으며 일반적인 10dB 또는 20dB 방향성 결합기의 유사한 특성을 보였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 코플래너 웨이브가이드 선로 기반의 수직 결합 구조를 해석하고 이를 통하여 반전력 분배 특성을 갖는 방향성 결합기를 설계 및 제작하였다. 코플래너 웨이브가이드 선로 기반의 수직 결합 구조의

우수 모드는 유전체 기판의 두께 1/2을 갖는 일반적인 코플래너 웨이브가이드 선로로 해석되었고, 기수 모드는 바닥 접지면을 갖는 코플래너 웨이브가이드 선로로 해석되었다.

제작된 방향성 결합기의 면적은 코플래너 웨이브가이드 선로의 접지면을 포함하여 $24.0 \times 42.0 \text{ mm}^2$ 으로 가지선로 분배기, 링 커플러, 윌킨스 분배기에 비해 작은 면적을 가지며 3dB의 전력 분배 특성을 가졌다. 또한, 중심주파수 2.45 GHz에서 19.52dB의 반사 손실과 19.47dB의 격리도를 나타내었고, 출력 포트 간의 신호 크기 차이 및 위상 차이는 대역폭 내에서 각각 ± 1 dB 이내, $90 \pm 2.1^\circ$ 이내로 측정되었다.

이러한 코플래너 웨이브가이드 선로 기반의 수직 결합 구조를 갖는 방향성 결합기는 작은 면적을 필요로 하는 전력 분배 시스템에 다양하게 이용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 2016년도 호남대학교 학술연구비 지원을 받아 연구되었음.

References

- [1] K. Shin and S. Ha, "A Study on the Power Amplifier Development Using Travelling Wave Combiner in X-band," *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 12, 2014, pp. 1331-1336.
- [2] S. Lee, E. Lim, and Y. Rhee, "High Power X-band SSPA Design Using Gysel High Power Combiner," *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 4, 2014, pp. 425-432.
- [3] B. Kim, S. Lee, and Y. Kim, "Unequal Dual-band Wilkinson Power Divider," *J. of Digital Convergence*, vol. 12, no. 4, 2014, pp. 343-348.
- [4] R. Mongia, I. Bahl, and P. Bhartia, *RF and Microwave Coupled-line Circuits* (Boston): Artech House, 1999.
- [5] C. Chang and C. Yang, "A Novel Broad-Band

- Chebyshev-Response Rat-race Ring Coupler," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 47, no. 4, Apr. 1999, pp. 455-462.
- [6] H. Nam, M. Lee, T. Yun, and J. Lee, "Broadband Double Balanced Diode Mixer Using a Marchand Balun with Vertical Coupling Structure," *Microwave and Optical Tech. Lett.*, vol. 51, no. 8, Aug. 2009, pp. 1811-1814.
- [7] H. Nam, T. Yun, and J. Lee, "A Broadband Marchand Balun with Vertical Coupling Structure," *Microwave and Optical Tech. Lett.*, vol. 49, no. 4, Apr. 2007, pp. 752-755.
- [8] K. Gupta, R. Garg, I. Bhal, and P. Bhartia, *Microstrip Lines and Slotlines* (Boston): Artech House, 1996.
- [9] R. Simons, *Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems* (New York): Wiley, 2001.
- [10] S. Gevorgian, L. Peter, and E. Kollberg, "CAD Models for Shielded Multilayered CPW," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 43, no. 4, Apr. 1995, pp. 772-779.

저자 소개



윤태순(Tae-Soon Yun)

2000년 국민대학교 전자공학과
(공학사)

2002년 광운대학교 전파공학과
(공학석사)

2006년 광운대학교 전파공학과
(공학박사)

2007년 10월~2008년 9월: The SUNY at Buffalo Post
Doc.

2008년 10월~2010년 2월: 광운대 BK사업단 연구교수

2010년 3월~현재: 호남대학교 전자공학과 조교수

※ 관심분야 : 마이크로파 소자, 무선전력전송, CRL
H 전송 선로