
결합 선로를 이용한 브랜치 선로 방향성 결합기

한대현*

Branch line directional coupler with coupled lines.

Dae-Hyun Han*

이 논문은 2008년도 동의대학교 교내 연구비를 지원받았음

요 약

방향성 결합기는 RF 및 마이크로파 대역에서 신호를 분배하거나 감시하는 데 이용된다. 본 논문에서는 마이크로스트립 선로로 구현한 결합선로를 이용한 새로운 구조의 브랜치 선로 방향성 결합기를 제안하였다. 브랜치 선로 방향성 결합기는 결합도가 낮아지면 병렬로 연결된 선로의 특성 임피던스가 높아져 마이크로스트립 선로로 구현하기 어려워진다. 이를 극복하기 위하여 단락된 평행 결합 선로를 이용하여 높은 특성 임피던스를 구현하였다. 제안한 브랜치 선로 방향성 결합기의 시뮬레이션 결과 및 제작하여 측정된 결과를 보였다. 제작한 10 dB 브랜치 선로 방향성 결합기는 10% 대역폭에서 반사 손실이 30 dB 이상, 8% 대역폭에서 고립도 35 dB 이상인 결과를 보였다.

ABSTRACT

Directional couplers are widely used in RF and microwave applications to distribute or monitor signals. This paper presented a new structure of microstrip branch line directional coupler with coupled lines. The loose couplings of microstrip branch line directional couplers are impractical for the high characteristic impedance values required for the shunt branches. To overcome this limitation, the parallel coupled lines with the shorts were used for the high characteristic impedance. The results of the simulations and measurements were presented for the proposed branch line directional coupler. Measurement of the 10 dB branch line directional coupler shows that the return loss is higher than 30 dB over 10 % bandwidth and the isolation is 35 dB or better over 8 % bandwidth.

키워드

방향성 결합기, 브랜치 선로 방향성 결합기, 결합 선로, 마이크로스트립 선로

Key word

directional coupler, branch line directional coupler, coupled lines, microstrip line

* 증신회원 : 동의대학교 전자공학과(dhan@deu.ac.kr)

접수일자 : 2010. 12. 14

심사완료일자 : 2010. 12. 23

I. 서 론

방향성 결합기는 RF 및 마이크로파 대역에서 신호를 분배하거나 신호의 주파수나 전력을 감시하거나 안테나와 같은 부하단의 임피던스 정합 상태를 점검하는데 이용된다. 방향성 결합기는 도파관, 동축선, 또는 스트립 선로(strip line)나 마이크로스트립 선로(microstrip line)를 이용하여 설계할 수 있다. 마이크로스트립 선로는 다른 수동 및 능동 소자를 쉽게 집적시킬 수 있고 사진 식각 기법을 이용할 수 있으며 부피가 작고 제작이 간편하고 비용이 낮은 장점 때문에 많이 이용되고 있다.

마이크로스트립 선로에서 방향성 결합기는 평행한 결합 선로(coupled transmission lines)를 이용하여 구현된다. 마이크로스트립 선로의 평행 결합 선로는 유전체 기판과 공기로 이루어지는 매질의 불균일한 특성 때문에 기수 모드(odd mode)와 우수 모드(even mode)의 위상 속도 차이가 존재한다. 기수 모드는 우수 모드보다 더 많은 전자기장이 공기 중에 있어서 유효 유전율이 더 낮게 되어 기수 모드의 위상속도가 우수 모드의 위상속도보다 빠르다. 결합 선로의 두 위상속도 차이 때문에 마이크로스트립 선로의 방향성 결합기의 방향성이 좋지 않게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 결합 선로위에 유전율이 높은 유전체를 두거나[1], 결합 전송선 사이에 보상 커패시터를 연결하거나[2], 결합 전송선을 이용하여 교차 커패시터(interdigital capacitor)를 구현하거나[3], $\lambda/8$ 개방 회로 스타브를 부착하거나[4], 병렬로 인덕터를 부착한다.[5]

본 논문에서는 방향성 결합기를 결합 선로를 이용한 새로운 구조의 브랜치 선로(branch line) 방향성 결합기를 제안하였다. 일반적으로 브랜치 선로 결합기는 두 개의 평행한 직렬 선로와 병렬로 연결된 선로로 구성된 4 포트로 구성되어 있으며, 결합도는 3 dB 이며 두 출력의 신호 사이에는 위상 차이가 90도의 난다. 결합도가 낮아지면 브랜치 선로 결합기의 병렬로 연결된 선로의 특성 임피던스가 높아 마이크로스트립 선로로 구현하기 어려워진다. 이를 해결하기 위하여 병렬로 연결된 전송선을 평행 결합 선로를 이용하여 방향성 결합기를 구현하였다.

II. 브랜치 선로 방향성 결합기

브랜치 선로 결합기는 그림1에 보인 것과 같이 특성 임피던스 Z_{0s} 이고 길이가 $\lambda_g/4$ 인 두 개의 직렬 전송선과 특성 임피던스 Z_{0p} 이고 길이가 $\lambda_g/4$ 인 두 개의 병렬 전송선이 대칭으로 구성되어 있다.

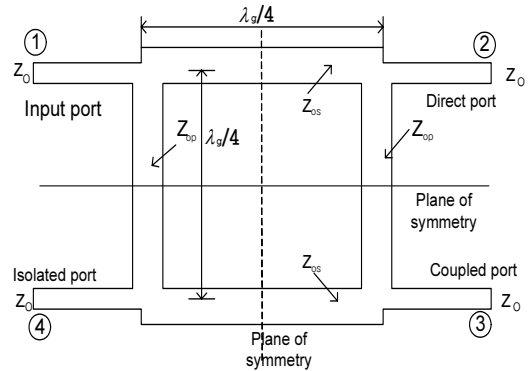


그림 1 브랜치 선로 결합기
Fig. 1. Branch line coupler

브랜치 선로 결합기의 특성은 우수 모드, 기수 모드 해석으로 구할 수 있다. 계산된 브랜치 선로 결합기의 산란 계수는

$$S_{11} = \frac{Z_{0s}^2 Y_0^2 - (Y_{0s} - Y_{0p}^2 Z_0) Z_0^2}{4 Y_{0p}^2 Z_0^2 + (Z_{0s} Y_0 + Y_{0s} Z_0 - Y_{0p}^2 Z_0 Z_0)^2} \quad (1)$$

$$S_{21} = \frac{-j2(Z_{0s} Y_0 + Y_{0s} Z_0 - Y_{0p}^2 Z_0 Z_0)}{4 Y_{0p}^2 Z_0^2 + (Z_{0s} Y_0 + Y_{0s} Z_0 - Y_{0p}^2 Z_0 Z_0)^2} \quad (2)$$

$$S_{31} = \frac{-4 Y_{0p} Z_{0s}}{4 Y_{0p}^2 Z_0^2 + (Z_{0s} Y_0 + Y_{0s} Z_0 - Y_{0p}^2 Z_0 Z_0)^2} \quad (3)$$

$$S_{41} = \frac{-j2 Y_{0p} Z_0 (Z_{0s} Y_0 - Y_{0s} Z_0 + Y_{0p}^2 Z_0 Z_0)}{4 Y_{0p}^2 Z_0^2 + (Z_{0s} Y_0 + Y_{0s} Z_0 - Y_{0p}^2 Z_0 Z_0)^2} \quad (4)$$

이며, $Y_0 = 1/Z_0$, $Y_{0s} = 1/Z_{0s}$, $Y_{0p} = 1/Z_{0p}$ 이며, $Z_0 = 1/Y_0$ 는 시스템의 특성 임피던스이다. 식(1)과 식(4)에서 정합이 되는 조건은

$$Z_{0s} Y_0 = (Y_{0s} - Y_{0p}^2 Z_{0s}) Z_0 \quad (5)$$

이며, 정리하면 직렬 전송선과 병렬 전송선 특성 임피던스 관계는

$$Z_{0s} = \frac{Z_{0p}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_{0p}}{Z_0}\right)^2}} \quad (6)$$

이다. 식(5) 또는 식(6)을 만족하면 브랜치 선로 결합기의 산란 계수는

$$S_{11} = 0 \quad (7)$$

$$S_{21} = -j \frac{Z_{0s}}{Z_0} \quad (8)$$

$$S_{31} = -j \frac{Z_{0s}}{Z_{0p}} \quad (9)$$

$$S_{41} = 0 \quad (10)$$

이다. 식(7) 과 식(8)에서 직렬 전송선과 병렬 전송선의 특성 임피던스와 산란 계수로 표현하면

$$Z_{0s} = Z_0 |S_{21}| = Z_0 \sqrt{1 - |S_{31}|^2} \quad (11)$$

$$Z_{0p} = \frac{Z_{0s}}{|S_{31}|} = \frac{Z_0 \sqrt{1 - |S_{31}|^2}}{|S_{31}|} \quad (12)$$

이다.

시스템의 특성 임피던스 $Z_0 = 50 \Omega$ 인 시스템에서 결합도(coupling factor)가 10 dB 인 방향성 결합기는 $|S_{31}| = \frac{1}{\sqrt{10}}$ 이며, 직렬 전송선의 특성 임피던스 $Z_{0s} = 47.4 \Omega$ 이고, 병렬 전송선의 특성 임피던스 $Z_{0p} = 150 \Omega$ 이다. 마이크로스트립 선로에서는 특성 임피던스가 150Ω 선로는 선풍이 너무 좁아 구현이 불가능하다. 이 문제를 해결하기 위해서 그림 2와 같은 단락된 결합 선로(coupled lines) 구조를 이용한다.

그림 2의 결합 선로에 대한 해석은 우수 모드와 기수 모드 방법으로 가능하며 등가회로는 그림 3과 같다.[6] 그림 4에서는 $\theta = 90^\circ$ 일 때의 등가회로이며 전송선의 등가 특성 임피던스는

$$Z_c = \frac{2Z_{0e}Z_{0o}}{Z_{0e} - Z_{0o}} \quad (13)$$

이며, Z_{0e} 는 우수 모드 특성 임피던스이고, Z_{0o} 는 기수 모드 특성 임피던스이다. 식(13)에서 두 모드의 특성 임피던스 차이가 적으면 등가 특성 임피던스는 큰 값을 가질 수 있다.

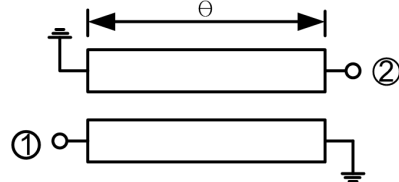


그림 2. 단락된 결합 선로 개략도
Fig. Schematics of coupled lines with two shorts.

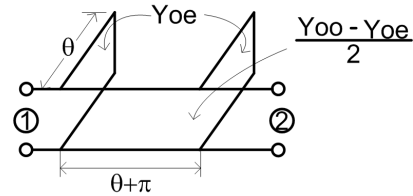


그림 3. 단락된 결합 선로의 등가회로
Fig. 3. Equivalent circuit of coupled lines with two shorts.

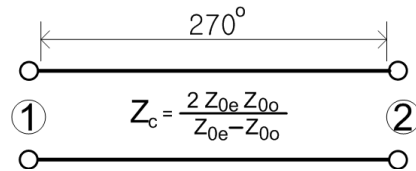


그림 4. $\theta = 90^\circ$ 일 때 단락된 결합 선로의 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuit of coupled lines with two shorts when $\theta = 90^\circ$.

결합 선로에서 우수 모드와 기수 모드의 특성 임피던스는[7]

$$Z_{0e} = Z_{0c} \sqrt{\frac{1+c}{1-c}} \quad (14)$$

$$Z_{0o} = Z_{0c} \sqrt{\frac{1-c}{1+c}} \quad (15)$$

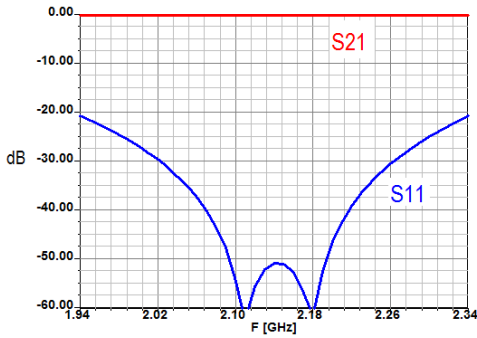
이며, 여기서 Z_{0c} 는 결합 선로의 각 전송선 특성 임피던스, c 는 결합 선로의 결합도이다. 식(13)에 식(14)과 식(15)를 적용하면 결합 선로의 결합도는

$$c = \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \quad (16)$$

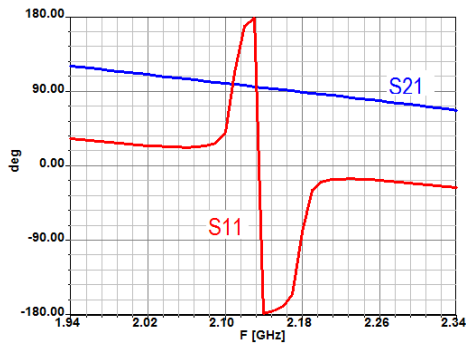
$$r = \frac{Z_c}{Z_{0c}} \quad (17)$$

이 되며, 만일 시스템의 특성 임피던스와 결합 선로의 특성 임피던스가 같으면($Z_0 = Z_{0c}$) 식(13)에 식(12), 식(14)와 식(15)를 적용하면 식(18)과 같이 결합 선로의 결합도 c 는 브랜치 선로 방향성 결합기의 결합도 $|S_{31}|$ 와 같다.

$$c = |S_{31}| \quad (18)$$



(a)



(b)

그림 5. 결합 선로의 시뮬레이션 결과
(a) S_{11} 과 S_{21} 의 크기 (b) S_{11} 과 S_{21} 의 위상
Fig. 5 Simulation results of the coupled lines
(a) Magnitude of S_{11} and S_{21} (b) Phase of S_{11} and S_{21}

본 논문에 적용한 10 dB 하이브리드 선로 방향성 결합기 경우에는 $Z_{0p} = Z_c = 150 \Omega$ 이고, 시스템의 특성 임피던스와 결합 선로의 특성 임피던스가 같게 두어 $c = |S_{31}| = 1/\sqrt{10}$ 이 되고, $Z_{0e} = 69.37 \Omega$, $Z_{0o} = 36.04 \Omega$ 가 된다. 전기적인 길이 $\theta = 90^\circ$ 인 단락된 결합 선로를 시뮬레이션 결과를 그림 5에 보였다.

시뮬레이션에서는 포트 1과 포트 2의 특성 임피던스를 $Z_{0p} = Z_c = 150 \Omega$ 으로 두었으며, 중심 주파수는 2.14 GHz이다. 그림5에서 중심 주파수에서 S_{11} 은 크기는 약 -50 dB 로 등가 특성 임피던스가 150 Ω 이며, S_{21} 위상의 위상 천이는 90° 로 -270° 임을 보여주고 있다.

결합 선로를 이용하여 높은 특성 임피던스를 구현한 평행 전송선에 적용한 브랜치 선로 방향성 결합기를 그림 6에 보였다.

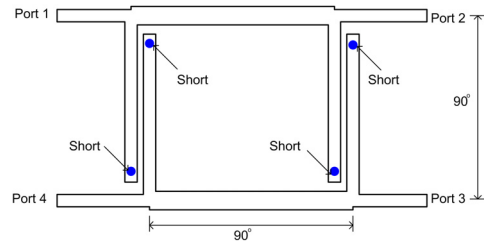


그림 6. 결합 선로를 가지는 브랜치 선로 방향성 결합기

Fig. 6 Branch line directional coupler with coupled lines

III. 시뮬레이션 및 실험

결합 선로를 가지는 브랜치 선로 방향성 결합기를 Agilent ADS 소프트웨어로 시뮬레이션한 회로도를 그림 7에 보였다.

결합 선로를 가지는 브랜치 선로 방향성 결합기의 시뮬레이션 결과를 그림 8에 반사 손실과 고립도(isolation)를 그림 9에 삽입 손실과 결합도를 나타내었다. 시뮬레이션 결과는 반사 손실이 최대 50 dB, 고립도가 최대 74 dB, 결합도가 10 dB, 삽입 손실이 0.45 dB 이다.

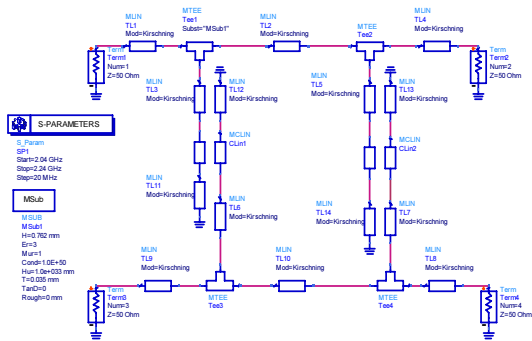


그림 7. 결합 선로를 가지는 브랜치 선로 방향성 결합기 시뮬레이션 회로도

Fig. 7 Simulation circuit of branch line directional coupler with coupled lines.

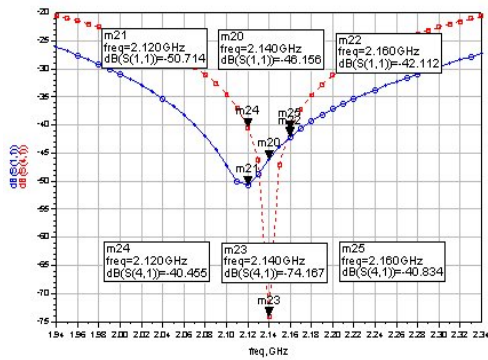


그림 8. 반사 손실과 고립도(isolation) 시뮬레이션 결과

Fig. 8 Simulation results of return loss and isolation.

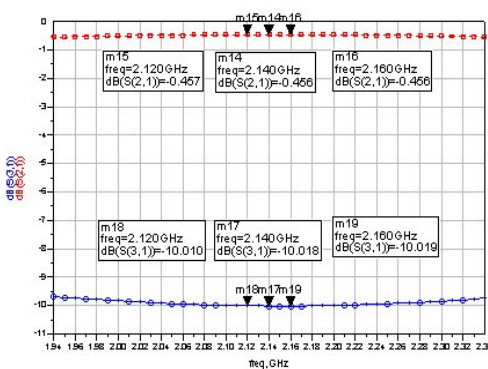


그림 9. 삽입 손실과 결합도 시뮬레이션 결과

Fig. 9 Simulation results of insertion loss and coupling

기판의 유전율이 3, 두께가 0.762 mm, 도체의 두께 0.035 mm 인 기판을 사용하여 결합 선로를 가지는 브랜치 선로 방향성 결합기를 제작하여 회로망 분석기 agilent 8573 으로 측정하였다. 그림 10에 제작한 브랜치 선로 방향성 결합기를 보였으며, 그림 11에는 반사 손실과 삽입 손실, 그림 12에는 결합도, 그림 13에는 고립도를 측정한 결과를 보였다. 측정 결과는 10% 대역폭에서 반사 손실이 30 dB 이상, 결합도 9.9 dB, 삽입 손실 0.6 dB, 8% 대역폭에서 고립도 35 dB 이상인 결과를 보였다.

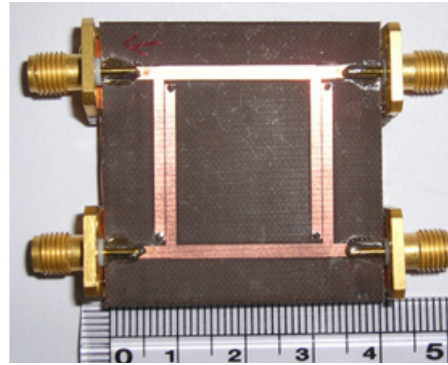


그림 10. 브랜치 선로 방향성 결합기

Fig. 10 Branch line directional coupler

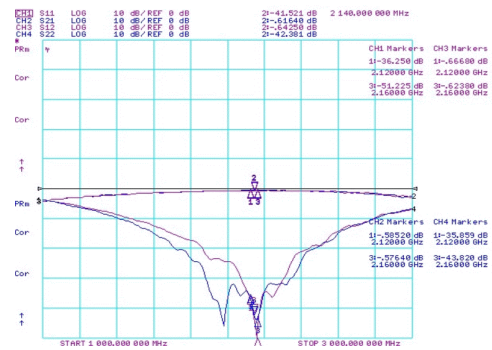


그림 11. 반사 손실과 삽입 손실 측정 결과

Fig. 11 Measurement results of return loss and insertion loss.

참고문헌

[1] J.L. Klein and K. Chang, "Optimum dielectric overlay thickness for equal even and odd mode phase velocities in coupled microstrip circuits", *Electron Lett* 26 , pp 274.276, 1990

[2] S.F Chang, J.L. Chen, Y.H Jeng, and C.T Wu, "New high directivity coupler design with coupled spurlines", *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett* 14, pp 65-67, 2004

[3] D. Baek and Y. Kim, "Symmetric microstrip interdigital capacitor compensated high directivity directional coupler", *Microwave and Optical Tech. Lett.*, vol. 50, no. 11, pp 2801-2803, Nov. 2008

[4] H. J. Hong, "Improved directivity", *Electron Lett*, no. 10, pp 141-143, 1974

[5] Seungku Lee and Youngshik Lee, "A design method of microstrip directional couplers loaded with shunt inductors for directivity enhancement", *IEEE MTT-58*, vol. 58, no. 4, pp 994-1002, 2010

[6] G. L. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, *Microwave Filters Impedance Matching Networks and Coupling Structures*. New York: McGraw-Hill, 1964.

[7] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, 2005.

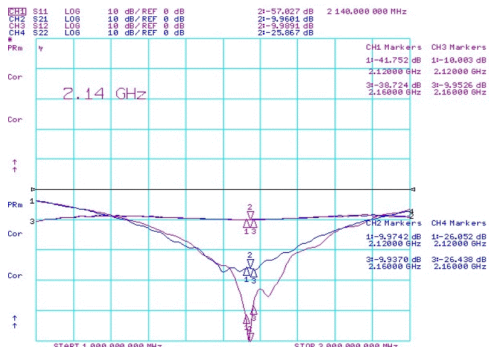


그림 12. 결합도 측정 결과
Fig. 12 Measurement results of coupling.

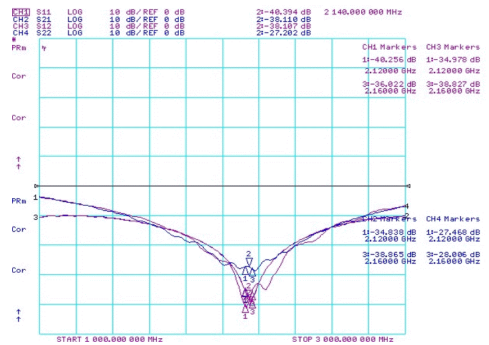


그림 13. 고립도 측정 결과
Fig. 13 Measurement results of isolation

IV. 결 론

결합 선로를 이용한 브랜치 선로 방향성 결합기를 제안하였다. 브랜치 선로를 방향성 결합기로 사용할 경우에 결합이 약하면 병렬 전송선의 특성 임피던스가 높아서 마이크로스트립 선로로 구현이 어렵다. 이를 극복하기 위하여 결합 선로를 사용하여 증가적으로 높은 특성 임피던스를 구현하였으며 결합 선로의 결합도의 조건을 유도하였다. 설계하여 제작한 브랜치 선로 방향성 결합기는 10% 대역폭에서 반사 손실이 30 dB 이상, 결합도 9.9 dB, 삽입 손실 0.6 dB, 8% 대역폭에서 고립도 35 dB 이상인 결과를 보였다.



한대현(Dae-Hyun Han)

1986년 8월 경북대학교 전자공학과 (공학사)

1990년 2월 포항공대 전자전기공학과 (공학석사)

1996년 8월 포항공대 전자전기공학과(공학박사)

※관심분야: 마이크로파 수동 소자 및 능동 소자 마이크로파 회로, 전자장