

높은 결합도를 갖는 다층 마이크로스트립 방향성 결합기 설계

천동완, 신철재
아주대학교 전자공학부

Design of Multilayer Microstrip Directional Coupler with high Coupling

Dong-Wan Chun, Chull-Chai Shin
School of Electronics Engineering, Ajou University

요약

본 논문에서는 Re-entrant mode 결합기를 이용하여 결합도가 향상된 다층 마이크로스트립 구조 결합기를 제안하였다. 제안된 구조는 결합이 이루어지는 두 전송선로의 위층, 아래층 양면에 부동 도체를 위치시킨 형태이며, 이는 기 모드 정전용량의 증가로 인해 높은 결합도를 얻을 수 있고 각 모드별 유효 유전율의 차이가 크지 않기 때문에 정재파비, 격리도, 위상차등에서도 향상된 특성을 얻을 수 있다. 따라서 이는 강한 결합이 필요한 다단 결합기나 광대역 결합기에 사용될 수 있다. 제안된 결합기의 설계를 위해 우, 기 모드 해석 방법을 이용하여 임피던스, 유효 유전율, 결합계수 등을 계산하였으며 시뮬레이션과 제작을 통해 이의 타당성을 확인하였다.

I. 서론

오늘날 초고주파 산업의 발달과 더불어 군사용, 산업용 초고주파 시스템에서 중요한 역할을 담당하고 있는 방향성 결합기에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 마이크로스트립 방향성 결합기는 구현이 간편하다는 장점 때문에 많이 이용되고 있다. 이 중에서 단일 평면상에서 결합이 이루어지는 단일 층 결합기는 구현이 용이하다는 장점은 있으나 공기와의 접촉면이 넓기 때문에 우, 기 모드에서의 전송속도 차이가 커서 격리도, 정재파비, 위상 등에 있어서 만족할 만한 특성을 얻기가 힘들다. 또한 단일 평면에서 결합이 이루어지기 때문에 결합도가 낮아 3 dB 이상의 결합도를 얻기가 힘들어 대역 또한 제한된다. 이러한 특성들 중에서 대역특성은 결합기의 성능에서 중요하게 작용하기 때문에 본 논문에서는 다층 구조를 사용하여 결합도를 향상시켜 이를 개선 시켰다.

단일 층 구조에서 대역을 넓히기 위한 방법중의 하나는 다단(multi-section) 구조를 이용하는 것으로

이 구조는 넓은 대역을 갖기 위해서 큰 결합도를 요구하기 때문에 단일 층 구조로 구현하는데 있어 한계가 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 많은 다층구조를 이용한 결합기들이 제안되어왔다. 대표적으로 결합도 개선을 위해 broad-side 결합구조를 이용한 bilevel 방향성 결합기[1], Re-entrant mode 구조를 이용한 Re-entrant mode 방향성 결합기[2],[3],[4] 등이 제안되었다. 이 중에서 bilevel 결합기는 전송선이 비대칭적으로 결합을 이룰 수 있기 때문에 c , π 모드가 생겨 우, 기 모드해석이 불가능하여 설계하기가 쉽지 않다. 그러나 Re-entrant mode 결합기는 결합이 대칭적으로 이루어지기 때문에 우, 기 모드 해석이 가능하다. 따라서 본 논문에서는 후자의 구조를 개선시켜 결합도를 향상시켰다.

제안된 구조는 접지면, 단일 부동 도체, 전송선로로 이루어진 기존의 Re-entrant mode 결합기 구조의 전송선로의 위에 한 층의 매질을 더 추가시켜 위층,

아래층 양면에 부동 도체를 위치시킨 형태이다. 결합기의 설계를 위해 우 모드, 기 모드 해석 방법을 사용하여 임피던스, 유효 유전율, 결합계수 등을 계산하였으며, 이 수치를 이용해 결합기를 설계하였다. 설계수치의 타당성을 확인하기 위해 이를 Zeland 사의 IE3D 로 시뮬레이션하고, 실제로 제작하여서는 HP8510C Network Analyzer를 이용하여 측정하였다. 시뮬레이션과 실측결과 제안된 결합기가 기존의 결합기에 비해 결합도가 향상되었고 정재파비, 격리도, 위상차 등에서 우수한 특성을 보임을 알 수 있었다.

II. 결합도가 향상된 방향성 결합기 설계

1. 결합도가 향상된 결합기의 구조

그림 1 은 결합도가 향상된 결합기의 구조이다. 기존의 Re-entrant mode 결합기는 두 층으로 이루어져 있지만 제안된 결합기는 결합도를 증가시키기 위해 부동도체를 전송선로 위에 하나 더 위치시켰기 때문에 세 층으로 이루어져 있다.

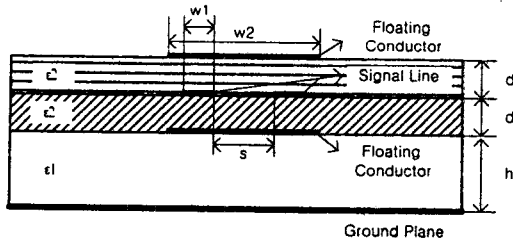


그림 1. 결합도가 향상된 결합기의 구조

그림 1 에서 해석상 편의를 위해 두 번째 층 세 번째 층의 유전율과 두께를 ϵ_2 와 d 로 같게 가정하였고, 두 부동 도체의 폭(w_2)도 같게 하였으며, 각 전송선로는 부동도체(floating conductor) 반쪽 면의 중심에 위치하도록 하였다.

2. 우(Even mode), 기 모드(Odd mode) 해석

Re-entrant mode 결합기는 우 모드, 기 모드에 따라 자계벽과 전계벽에 의해 부동 도체가 개방, 단락으로서 동작하게 된다. 또한 제안된 결합기도 마찬가지로 두 개의 부동 도체가 우 모드, 기 모드에 따라

개방, 단락으로서 동작하게 되어 Re-entrant mode 결합기처럼 쉽게 임피던스를 계산 할 수가 있다. 이를 근거로 각 모드에 따른 결합기의 구조를 그림 2 에 나타냈으며 이를 바탕으로 결합기의 특성임피던스, 유효 유전율, 결합계수 등을 계산하고자 한다.

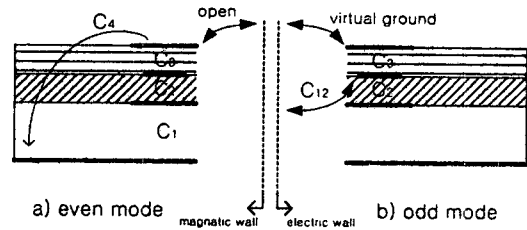


그림 2. 우, 기 모드 일 때 결합기의 구조

우 모드에서는 자계벽이 형성되어 두 전송 선로 사이가 개방된 것처럼 동작하기 때문에 그림 2 (a) 와 같이 구조를 등가화 시킬 수 있다. 그림에서 C_1 는 전송선로에서 위층 부동 도체에 결합되어 이 부동 도체와 접지와 형성된 정전용량이다. 따라서 전송선로와 접지 사이에 형성되는 정전용량과 임피던스는 다음과 같이 주어진다[5].

$$C_{even} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \parallel \frac{C_3 C_4}{C_3 + C_4} \quad \text{II}-(1)$$

$$Z_{even} = (Z_1 + Z_2) \parallel (Z_3 + Z_4) \quad \text{II}-(2)$$

기 모드에서는 전계벽이 형성되어 두 전송선로 사이에 가상 접지가 형성되게 되어 두 부동 도체 또한 가상 접지로서 동작하기 때문에 그림 2 (b) 와 같은 구조로 등가화 시킬 수 있다. 그림에서 C_{12} 는 $\frac{s}{2d} > 0.5$ 일 때는 결합되는 양이 작아서 무시할 수 있으나[4], MIC 형태로 제작을 할 때에는 d 를 작게 구현하는 것이 실질적으로 힘들어 $\frac{s}{2d} < 0.5$ 인 경우가 발생할 수 있기 때문에 추가시킨 것이다. 따라서 전송선로와 가상 접지 사이에 형성되는 정전용량과 임피던스는 다음과 같이 주어진다.

$$C_{odd} = C_2 \parallel C_3 \parallel 2C_{12} \quad \text{II}-(3)$$

$$Z_{odd} = \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \parallel Z_{12}/2 \quad \text{II}-(4)$$

기존의 Re-entrant mode 결합기의 경우 모드별 임피던스는 다음과 같이 주어진다[2].

$$Z_{even} = Z_1 + Z_2, Z_{odd} = Z_2 \quad \text{II-(5)}$$

위의 결과를 비교하면 우 모드 임피던스의 경우 Z_4 가 매우 크기 때문에 제안된 결합기와 기존의 Re-entrant mode 결합기의 임피던스의 크기가 비슷하다. 그러나 기 모드 임피던스의 경우 Z_2 와 거의 같은 크기인 Z_3 때문에 제안된 결합기가 더 작다. 즉 결과적으로 제안된 결합기의 결합도가 기존의 결합기보다 크다는 것을 확인 할 수 있다.

3. 방향성 결합기 설계

우, 기 모드 해석에 의해 계산된 결과를 토대로 설계수치를 계산하기 위해 하층기판은 $\epsilon_r=2.94$, $h=1.524$ mm 인 RT/duroid 6002 를 사용하였고, 상층의 두 기판은 $\epsilon_r=2.75$, $h=0.3683$ mm 인 Teflon 으로 같게 선정하였다.

위의 수치에 근거하여 $w_2=8$ mm 이고, w_1 이 변화할 때 계산된 우, 기 모드 임피던스와 특성임피던스의 변화 특성은 그림 3 과 같다.

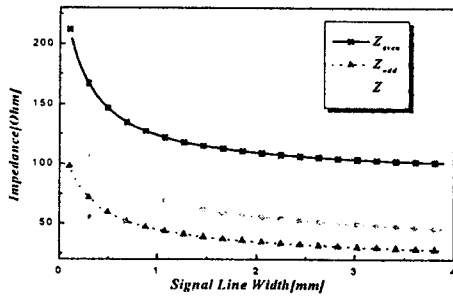


그림 3. w_1 의 변화에 따른 우, 기 모드 임피던스

그림 3 에서 전송선의 폭이 증가할수록 기 모드 정전용량의 증가량이 우 모드에서의 증가량보다 크기 때문에 우, 기 모드 임피던스 차이가 점점 커짐을 알 수 있다. 이는 곧 결합도가 증가함을 의미한다. 이때 w_1, w_2 의 폭이 증가할수록 임피던스가 감소하는 이유는 모드별로 결합되는 정전용량이 증가하기 때문이다. 그림 4 에서 w_1 의 변화에 따른 결합도의

변화를 볼 수 있다. 기존의 구조에 비해 결합도가 향상되었음을 알 수 있다.

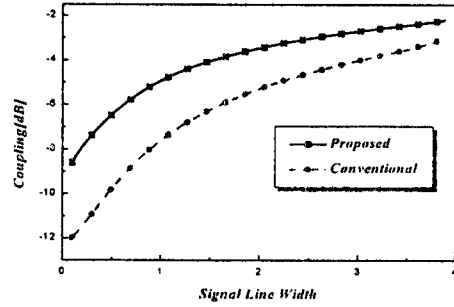


그림 4. w_1 의 변화에 따른 결합도

그림 3. 과 그림 4. 로 부터 임피던스가 50Ω 이고 결합이 -3 dB 만큼 이루어지는 w_1, w_2 값을 찾으면 각각 8 mm, 3 mm 임을 알 수 있다. 여기서 구한 폭은 임피던스와 결합도가 w_1, w_2 의 변화에 따라 변하기 때문에 w_2, w_1 순서로 길이를 바꾸어 가면서 원하는 임피던스와 결합도가 일치하는 점을 찾은 값이다. 같은 방법으로 -2 dB 결합을 이룰 때의 w_1, w_2 값을 찾으면 각각 5 mm, 2.3 mm 임을 확인할 수 있었다.

4. 제작 및 측정

위 설계 수치를 가지고 중심 주파수를 1.5 GHz 에 맞춰 IE3D 를 이용해 시뮬레이션 한 결과 그림 5. 그림 6 과 같은 특성을 얻을 수 있었다.

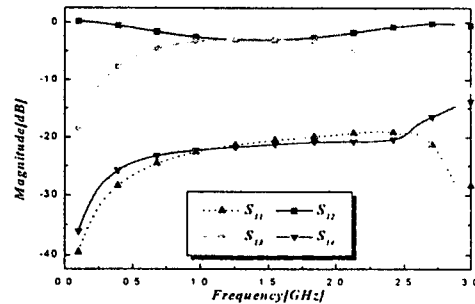


그림 5. -3 dB 결합기의 산란계수

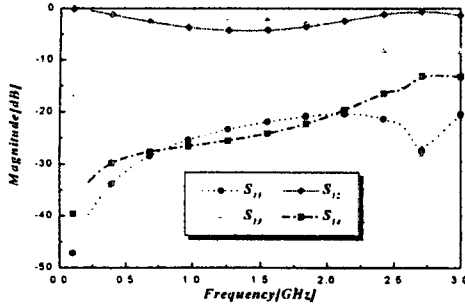


그림 6. -2dB 결합기의 산란계수

시뮬레이션 결과 -3 dB 결합기의 경우 $f=1.5$ GHz에서 $S_{12}=-3.1$ dB, $S_{13}=-3.05$ dB 이고, -2dB 결합기의 경우 $S_{12}=-4.12$ dB, $S_{13}=-2.1$ dB 임을 알 수 있었다. 여기서 0.2 dB 정도의 손실은 도체의 유한한 전도도 때문으로 여겨진다.

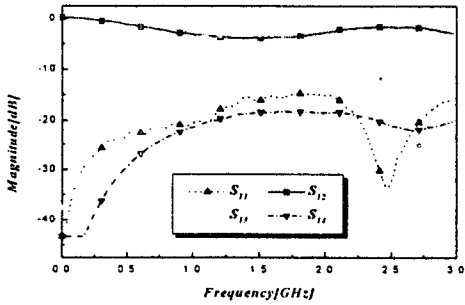


그림 7. -3 dB 결합기의 측정된 산란계수

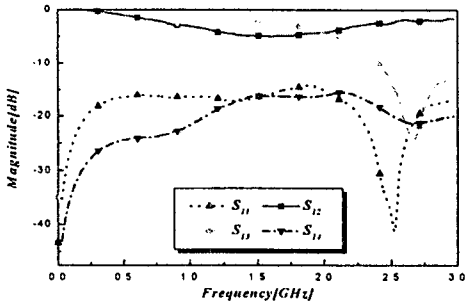


그림 8. -2 dB 결합기의 측정된 산란계수

결합기를 실제 제작하여 측정한 결과 그림 7, 그림 8과 같은 특성을 얻을 수 있었다. 이 때 -3 dB 결합기의 경우 $S_{12}=-3.66$ dB, $S_{13}=-3.16$ dB 이고, -2 dB 결합기의 경우 $S_{12}=-4.65$ dB, $S_{13}=-2.28$ dB 이었는데, 손실이 약 0.8~0.9 dB 정도 생김을 알 수 있다. 이는 단층기판을 접합시켜 다층기판으로 구현함에 따른 손실과, 정렬오차에 의한 손실로 여겨진다.

III. 결론

본 논문에서는 MIC 와 MMIC 에 광대역 용으로 사용할 수 있는 결합도가 향상된 방향성 결합기를 설계하였다. 기본적으로 정전용량 계산에 의한 우.기 모드 해석방법을 이용하였고, 각각의 모드별로 존재하는 정전용량은 conformal mapping 방법에 의해 계산하였다. 시뮬레이션 및 실측결과로 비추어 볼 때 결합도가 향상되었고, 모드 해석방법에 의한 결합기 해석의 타당성을 확인할 수 있었으며, 앞으로 단일층 결합기와 본 결합기를 이용하여 다단 결합기를 설계할 계획이다.

참고문헌

- [1] Mark D. Prouty, S. E. Schwarz. "Hybrid Couplers in Bilevel Microstrip," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.41, no. 11, pp.1939-1944, Nov. 1993.
- [2] S.B. Cohn, "The Re-Entrant Cross Section and Wide-Band 3-dB Hybrid Couplers," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 11,no. 4, pp.254-258, Jul. 1963.
- [3] L. Lavendol and J.J. Taub. "Re-Entrant Directional Coupler Using Strip Transmission Line(Correspondence)," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 13, no. 5, pp.700-701. Sep. 1965.
- [4] E. G. Cristal. "Re-Entrant Directional Couplers having Direct Coupled Center Conductors (Correspondence)," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 14, no. 4, pp.207-208, Apr. 1963.
- [5] K. C. Gupta, R. Garg. and I. J. Bahl, Microstrip Lines and Slot-Lines. Artech House, 1996.