

평행 결합선로 이론에 근거한 새로운 집중 소자형 방향성 결합기 해석 및 설계

송택영*, 이상현*, 김영태*, 천창울**, 박준석*
 순천향대학교 정보기술공학부*, 서울시립대학교 전자공학과**
 Email : sspur@intizen.com

Design of a Novel Lumped Element Backward Directional Coupler Based on Parallel Coupled-Line Theory

Taek-Young Song, Sang-Hyun Lee, Young-Tae Kim Chang-Yul Cheon, Jun-Seok Park
 Division of Information Technology Engineering, Soonchunhyang Univ.
 Electronics and Telecommunications Research Institute

Abstract

In this paper, a novel lumped equivalent circuit for a conventional parallel directional coupler is proposed. The equivalent circuit and design formula for the presented lumped element coupler is derived based on the even- and odd-mode properties of a parallel-coupled line. By using the derived design formula, we have designed the 3dB and 10dB lumped element directional couplers at the center frequency of 100Mhz. Furthermore, a chip type directional coupler has been designed to fabricate with multilayer configurations by employing the Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC) process. Designed chip-type directional coupler has a 10dB-coupling value at the center frequency of 2GHz. Excellent agreements between simulations and measurements on the designed directional couplers show the validity of this paper

1. 서론

이동통신의 발달은 통신기기의 소형화에 따라 점차 신뢰성이 높고 광대역에서 사용하면서도 작은 크기의 통신 부품을 요구하게 되었다. 실제로 현재까지 여파기와 듀플렉서 방향성 결합기 등 많은 무선부품 소자들이 여러 방법으로 소형화에 성공하여 상용화 되었다. 본 논문에서는 방향성 결합기에 우/기 모드 계산법을 사용하여 상호 인덕턴스가 제외된 자기 인덕턴스와 자기 커패시턴스만을 가지는 새로운 등가회로 모델들을 제시하였고, 논문의 타당성을 보이기 위해 각 등가회로 모델에 대해 3dB, 10dB 방향성 결합기를 설계하여 회로 시뮬레이션과 전자장 시뮬레이션을 통하여 제작하였으며 측정된 측정치와의 비교를 통해 논문의 정당성을 확인한다. 등가화된 방향성 결합기는 LTCC와 같은 다층구조의 기법을 통해 작은 사이즈의 칩으로 제작 가능할 것이라 기대한다.

2. 설계 이론

그림 1(a),(b),(c),(d)는 본 논문에서 새롭게 제시한 방향성 결합기의 등가회로 모델들이다. 그림 1(a),(b)는 방향성 결합기의 등가 회로를 π 형으로 구현한 것이고, (c),(d)는 T형으로 구현한 것이다. 그림 1(a)에 관한 수식을 유도하였고, 각각의 등가회로에 대해서는 유도된 식을 정리하였다.

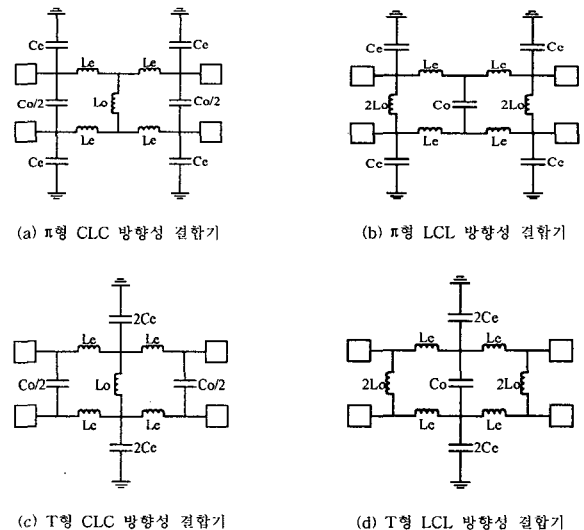


그림 1. 방향성 결합기 등가회로

그림 2(b)는 자기 인덕턴스와 자기 커패시턴스만을 가지는 집중소자로 나타낼 수 있다. 병렬 결합 방향성 결합기와 제시한 등가회로가 같다는 가정에 우/기모드 계산법으로 각각의 소자 값을 유도 한다.

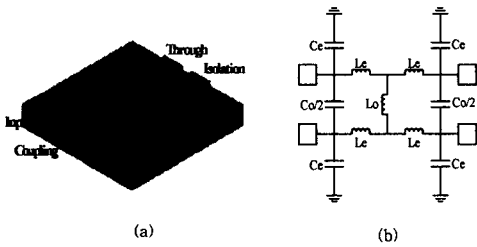


그림 2. (a) 방향성 결합기의 병렬 결합
(b) 병렬 결합 방향성 결합기 등가회로

병렬 결합 방향성 결합기는 그림3(a)에서 보인 것 처럼 두개의 대칭면을 갖는다. 제시한 등가회로 역시 병렬 결합 방향성 결합기처럼 대칭면을 지정하고 각각의 대칭면에 우/기모드를 인가하였을 때의 전기적 길이와 임피던스에 의해 대응하는 소자값을 유도한다

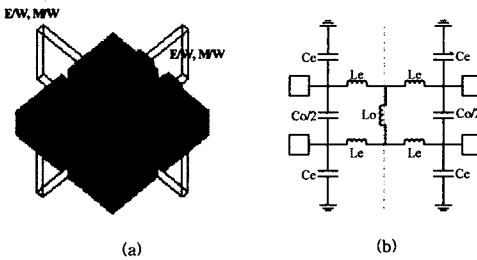


그림 3. (a) 병렬 결합 방향성 결합기의 대칭면
(b) 병렬 결합 방향성 결합기 등가회로

먼저 가로축에 우모드인 경우의 등가회로는 아래의 그림과 같다.

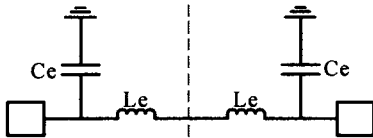


그림 4. 가로축이 우모드인 경우 등가회로

여기서, 세로축으로 우/기모드인 경우 각각의 등가회로는 그림 5에서와 같이 표현된다.

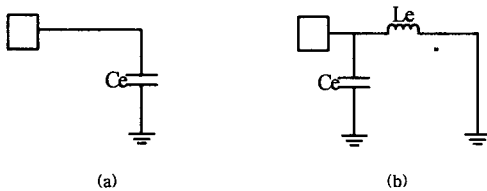


그림 5. (a) 세로축이 우 모드인 경우 등가회로
(b) 세로축이 기 모드인 경우 등가회로

그림 5의 두 등가회로는 전송선로의 각각의 입력 임피던스는 다음 식 1, 2, 3에서 보여진다.

$$Z_m = Z_{oe} \frac{Z_L + jZ_{oe} \tan \frac{\theta}{2}}{Z_{oe} + jZ_L \tan \frac{\theta}{2}} \quad (Z_L = \infty, 0) \quad (1)$$

$$Z_m = \frac{1}{j\omega C_e} \quad (Z_L = \infty) \quad (2)$$

$$Y_m = \frac{1}{j\omega L_e} + j\omega C_e \quad (Z_L = 0) \quad (3)$$

위 두식을 비교하여 Ce와 Le를 식4, 5와 같이 유도한다

$$C_e = \frac{Y_{oe}}{\omega} \tan \frac{\theta}{2} \quad (4)$$

$$L_e = \frac{Z_{oe}}{2\omega} \sin \theta \quad (5)$$

우 모드 임피던스(Zoe)와 우 모드 어드미턴스(Yoe)는 가로축이 우모드인 경우의 각각의 전송선로의 특성 임피던스와 특성 어드미턴스이다.

가로축이 기모드인 경우 그림 6과 같이 등가회로로 나타나며, 기모드에서 보이는 병렬 소자들은 우/기모드의 특성 임피던스의 차이를 나타내기 위해 들어간 소자이다. 여기서 기 모드 입력임피던스는 가로축이 기모드인 경우 입력임피던스를 증가 시켜주고, 기 모드 커패시턴스는 제안한 집중소자 결합기의 결합도를 나타내기 위해 쓰인 소자이다.

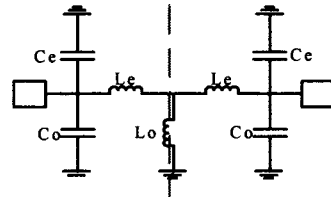


그림 6. 가로축이 기 모드인 경우 등가회로

세로축으로 우/기모드인 경우의 등가회로들은 그림 7에서 보인다.

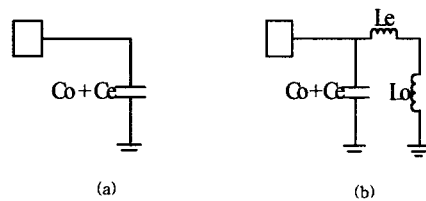


그림 7. (a) 세로축이 우 모드인 경우 등가회로
(b) 세로축이 기 모드인 경우 등가회로

소자 값의 유도는 앞에서 우모드인 경우와 동일한 방법으로 유도된다.

각각의 입력임피던스는 아래의 식 6, 7, 8과 같이 표현되어진다.

$$Y_m = Y_{oe} \frac{Y_L + jY_{oe} \tan \frac{\theta}{2}}{Y_{oe} + jY_L \tan \frac{\theta}{2}} \quad (Y_L = \infty, 0) \quad (6)$$

$$Y_m = j\omega(C_e + C_o) + \frac{1}{j\omega^2 L_e} \quad (Y_L = \infty) \quad (7)$$

$$Y_{in} = j\omega(C_e + C_o) + \frac{1}{j\omega(L_e + L_o)} \quad (Y_L = 0) \quad (8)$$

위 식을 비교하여 L_o , C_o 를 식 9, 10처럼 나타낸다.

$$C_o = -\frac{Y_{0e}}{\omega} \cot \frac{\theta}{2} + \frac{1}{\omega^2 L_e} - C_e \quad (9)$$

$$L_o = \frac{1}{\omega^2 (C_e + C_o) - \omega Y_{0e} \tan \frac{\theta}{2}} - L_e \quad (10)$$

같은 방법으로 그림 1(b)의 경우, 가로축이 우 모드 인 경우의 인덕터와 커패시터의 값은 다음과 같이 유도된다.

$$L_e = \frac{Z_{0e}}{2w} \sin \theta \quad (11)$$

$$C_e = \frac{Y_{0e}}{w} \tan \frac{\theta}{2} \quad (12)$$

가로축이 기 모드인 경우의 경우는 다음과 같이 유도된다.

$$L_o = \frac{1}{w^2 C_e - \frac{1}{L_e} + w Y_{0e} \cot \frac{\theta}{2}} \quad (13)$$

$$C_e = \frac{1}{w^2 L_e - \frac{1}{C_e - \frac{1}{w^2 L_o} - \frac{Y_{0e} \tan \frac{\theta}{2}}{w}}} \quad (14)$$

그림 1(c)의 경우, 가로축이 우 모드일때 다음과 같이 유도된다.

$$C_e = \frac{1}{2wZ_{0e}} \sin \theta \quad (15)$$

$$L_e = \frac{Z_{0e}}{w} \tan \frac{\theta}{2} \quad (16)$$

가로축이 기 모드인 경우는 다음과 같이 유도된다.

$$C_o = \frac{1}{w^2 L_e} - \frac{Y_{0e}}{w} \cot \frac{\theta}{2} \quad (17)$$

(18)

그림 2(d)인 경우, 가로축이 우 모드일때 다음과 같이 유도된다.

$$C_e = \frac{1}{2wZ_{0e}} \sin \theta \quad (19)$$

$$L_e = \frac{Z_{0e}}{w} \tan \frac{\theta}{2} \quad (20)$$

가로축이 기 모드인 경우는 다음과 같다.

$$L_o = \frac{1}{w^2 C_e - \left(\frac{w C_o - Y_{0e} \tan \frac{\theta}{2}}{w L_e (w C_o - Y_{0e} \tan \frac{\theta}{2}) - 1} \right)} \quad (21)$$

$$C_o = \frac{1}{w^2 L_e + \frac{w^2 L_o}{1 + w L_o Y_{0e} \tan \frac{\theta}{2}}} - C_e \quad (21)$$

$$L_o = \frac{1}{w Y_{0e} \cot \frac{\theta}{2} - \frac{1}{L_e}} \quad (22)$$

3. 시뮬레이션 및 측정

그림 1(a)는 각각 3dB 방향성 결합기는 설계주파수 2Ghz에서, 10dB 방향성 결합기는 설계주파수 100Mhz에서 설계하였으며, 각각의 소자값은 다음 표에서 보여진다.

표 1. π 형 CLC 구조의 방향성 결합기의 3dB, 10dB에서의 소자값

	3dB @2Ghz	10dB @100Mhz
Ce [pF]	3.85	44.16
Le [nH]	0.823	28.68
Co [pF]	1.59	10.61
Lo [nH]	0.17	30.012

그림 1(b), (d)는 각각 10dB 방향성 결합기를 설계주파수 100Mhz에서 설계하였으며, 소자값은 다음과 같다.

표 2. π , T형 LCL구조의 방향성 결합기의 10dB에서의 소자값

	그림1 (b) 10dB @100Mhz	그림1(d) 10dB @100Mhz
Ce [pF]	22.94	22.94
Le [nH]	55.2	110.41
Co [pF]	22.05	5.51
Lo [nH]	238.77	238.77

그림 1(c)는 각각 3dB 방향성 결합기는 설계주파수 2Ghz에서, 10dB 방향성 결합기는 설계주파수 100Mhz에서 설계하였으며, 각각의 소자값은 다음 표에서 보여진다.

표 3. T형 CLC구조의 방향성 결합기의 3dB, 10dB에서의 소자값

	3dB @2Ghz	10dB @100Mhz
Ce [pF]	3.85	44.16
Le [nH]	1.65	57.36
Co [pF]	1.59	10.61
Lo [nH]	0.676	124.05

그림 8(a)는 HFSS로 나타낸 2Ghz에서의 다층형 커플러의 모양이다. 유전율 7.8에 전체 사이즈는 3x3x0.5mm 이고, 그림 8(b)는 유전율 2.5에 31mil 기판으로 100Mhz에서 실제 제작한 모형이다.

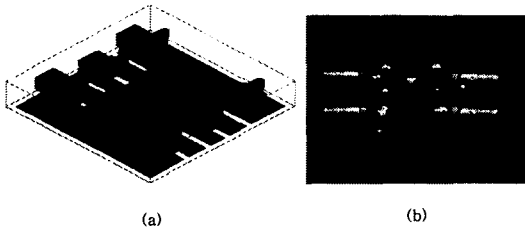


그림 8. (a) HFSS에서의 그림 (b) 실제 제작 모형

각 데이터의 비교는 100MHz는 실제 제작하여 측정 한 측정결과 이고, 2GHz는 전자장 상용 시뮬레이터 인 Ansoft사의 HFSS으로 시뮬레이션한 결과이다. 다음에 보여지는 그림은 6개의 집중소자 방향성 결합기의 측정 데이터이다.

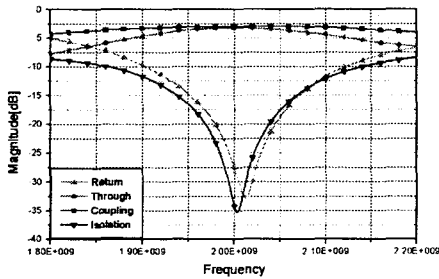


그림 9. π 형 CLC구조의 3dB 방향성 결합기 측정 데이터

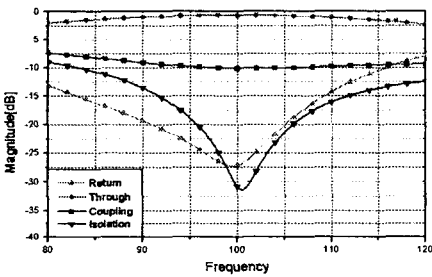


그림 10. π 형 CLC구조의 10dB 방향성 결합기 측정 데이터

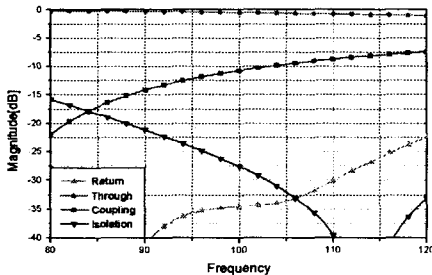


그림 11. π 형 LCL구조의 10dB 방향성 결합기 측정 데이터

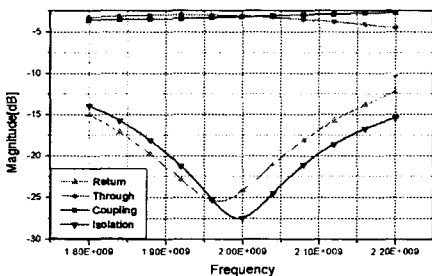


그림 12. T형 CLC구조의 3dB 방향성 결합기 측정 데이터

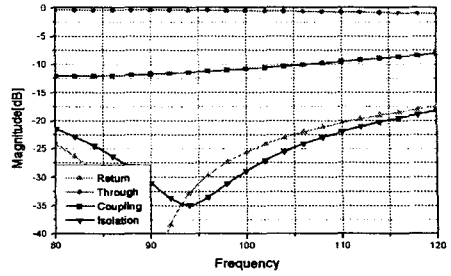


그림 13. T형 CLC구조의 10dB 방향성 결합기 측정 데이터

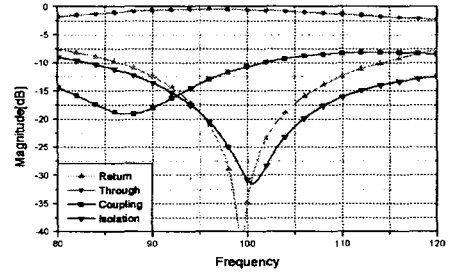


그림 14. T형 LCL구조의 10dB 방향성 결합기 측정 데이터

4. 결 론

본 논문에서는 평행 결합선로 이론에 근거한 새로운 집중소자형 방향성 결합기 등가회로에 대하여 논하였다. 새로운 집중소자형 방향성 결합기는 우/기 모드 계산법을 사용하여 상호 인덕턴스가 제거시켜 단지 자기 인덕턴스와 자기 커패시턴스만을 가지는 새로운 등가회로 모델들을 제시하고 논문의 타당성을 보이기 위해 각 등가회로 모델에 대해 3dB, 10dB 방향성 결합기를 설계하여 회로 시뮬레이션, 전자장 시뮬레이션, 제작 측정된 측정치와의 비교를 통해 논문의 정당성을 확인하였다. 등가화된 방향성 결합기는 전자장 시뮬레이션에서 보인 것 처럼 LTCC와 같은 다층구조의 기법을 통해 작은 사이즈의 칩으로 제작 가능할 것이라 기대하며 더 나아가 MMIC나 RFIC에 응용가능 할 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] Arai, S. et. Al. "A 900Mhz 90 degree hybrid for QPSK modulator," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp.857-860, 1991.
- [2] Hagerheiden, J., M. Ciminera, and G. Jue, "Improved planar spiral transformer theory applied to a miniature lumped element quadrature hybrid," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.MTT-45, pp.543-545, Apr. 1997.
- [3] Y-C. Chiang and C-Y Chen, "Design of lumped-element quadrature coupler," *Electron Lett.*, vol.34, pp.465-466, Mar. 1998.
- [4] Y-C. Chiang and C-Y Chen, "Design of a wide-band lumped-element 3-dB quadrature coupler," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.MTT-49, pp.476-479, Mar. 2001.
- [5] Shibata, K., et. al., "Microstrip spiral directional coupler," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.MTT-29, July, pp.680-689, 1981.
- [6] Rajesh Mongia, Inder bahi, and Prakash Bhartia "RF and Microwave Coupled Line Circuits," Artech House pp.181_193.1999.