평행 결합선로 이론에 근거한 MMIC 집중 소자형 방향성 결합기

論 文
53C-11-6

Lumped Element MMIC Direction Coupler Based on Parallel Coupled-Line Theory

康 明 洙† · 朴 准 奭* · 李 在 鶴** · 金 炯 碩***
(Myung-Soo Kang · Jun-Seok Park · Jae-Hak Lee · Hyeong-Seok Kim)

Abstract - In this paper, lumped equivalent circuits for a conventional parallel directional coupler are proposed. This equivalent circuits only have self inductance and self capacitance, so we can design exact lumped equivalent circuit. The equivalent circuit and design formula for the presented lumped element coupler is derived based on the even- and odd-mode properties of parallel-coupled line. By using the derived design formula, we have designed the 3dB and 4.7dB MMIC couplers at the center frequency of 3.4GHz and 5.6GHz respectively. Measurements for the designed MMIC directional couplers show at 4dB and 5.2dB-coupling value at the center frequency of 3.4GHz and 5.6GHz. Excellent agreements between simulation results and measurement results on the designed directional couplers show the validity of this paper

Key Words : Parallel Coupled-line, Lumped Equivalent Circuit, Lumped Element Directional Coupler, MMIC

1. 서 론

전자부품의 저가격화로 인해 각종 무선통신부품의 소형화와 집적화가 급격하게 진행되고 있다. 또한 무선 통신 단말기 기술의 발달과 소형화, 다른 기기와의 통합 추세로 인하여 신뢰성이 높고 광대역 특성을 가지며 작은 부피의 무선통신 부품에 대한 필요성이 증가하고 있다. 무선통신용 능동 부품의 대부분은 반도체 기술 및 패키지 기술의 급격한 발달로 인하여 저가격화 및 소형화가 실현되어 다양한 형태로 실제 시스템에 적용되고 있다. 기존의 단말기에 사용하던 세라믹 재료의 수동부품인 듀플렉서, 방향성 결합기, 대역통과 여파기는 능동부품과 비교하여 부피가 큰 제약을 가지고 있으나, 여파기 및 듀플렉서의 경우 SAW(Surface Acoustic Wave)나 FBAR(Film Bulk Acoustic Wave)와 같은 소형화 기술을 적용하여, 부피의 소형화를 이루었으며, 현재 다른 능동부품들과 합쳐져 하나의 칩으로 구현 되어 다양한 이동통신 및 무선통신 단말기 시스템에 적용되고 있다.[1]

본 논문에서는 이러한 무선통신 수동부품의 소형화와 다른 능동 부품들과의 집적화의 일환으로 무선 통신 시스템의 핵심 수동부품중의 하나인 방향성 결합기를 MMIC로 구현하였다. 또한 소형화를 위하여 방향성결합기의 집중정수소자 등가회로를 제시하고, 병렬 결합선로 이론을 바탕으로 집중소자만으로 구성된 결합기 설계 식을 유도하였다.

* 교신저자, 學生會員 : 國民大 工大 전자·정보통신공學科 석士課程
E-mail : trigan97@empal.com
† 正 會 員 : 國民大 工大 전자·정보통신공學科 助敎授 · 工博
** 正 會 員 : (주)웨이브아이시스 생산기술 센터장
*** 正 會 員 : 중앙대 전자전기공학부 교수
接受日字 : 2004年 6月 16日
最終完了 : 2004年 9月 24日

본 논문에서는 전송선로의 집중정수소자 등가모델 형태에 따라 π형 2종과 T형 2종, 총 4종류의 집중정수소자 결합선로 등가회로를 제시하고, 각각의 결합선로 등가회로에 대하여 병렬 결합선로의 우·기모드 조건에서의 입력 임피던스 또는 입력 어드미턴스를 추출하여 상호인덕턴스(Mutual Inductance)가 제거된 자기인덕턴스 (Self Inductance)와 커패시턴스만을 가지는 집중정수소자형 방향성 결합기 설계식을 유도하였다.[2]~[7].

본 논문에 제시된 집중정수소자형 방향성 결합기 설계 식을 사용하여 무선통신 단말기 시스템에 적용가능하고, 다른 회로와 집적화가 가능한 MMIC (Monolitic Microwave integrated circuit)공정을 적용하여, 본 논문에서 제시한 집중소자형인 T형으로 3.4GHz와 5.6GHz에서 각각 3dB와 4.7dB 결합량을 갖도록 설계하였다. MMIC 설계 규칙을 적용한 방향성 결합기를 상용 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 마지막으로 MMIC설계규칙을 적용하여 제작하였고, 그 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하여 나타내었다.

2. 집중소자형 방향성 결합기

2.1 평행 병렬 결합선로의 집중소자형 등가회로

본 논문에서 제시한 병렬평형 결합선로 방향성 결합기의 4가지 형태의 집중정수 소자 등가회로들을 그림 1에 나타내었다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 방향성 결합기의 등가회로는 병렬 결합선로의 우모드 전송선로에 대한 집중정수 등가회로의 형태에 따라 π형과 T형으로 구분된다. 본 논문에서는 π형과 T형 각각 2가지의 형태의 등가회로를 제시하였고,

각 π형과 T형 방향성 결합기는 결합기 회로에서 각 포트간 결합량을 결정하는 기모드 결합소자에 따라 CLC형과 LCL형으로 구분된다. 상호 인덕턴스(Mutual Inductance)를 갖는 기존의 집중정수 소자형 방향성 결합기와 비교하여 본 논문에서 제시한 집중소자형 방향성 결합기는 그림 1에 나타낸 바와 같이 자기 인덕턴스(Self Inductance)와 커패시터만을 포함하므로 용이하고 정확한 설계과정을 제공하는 장점을 갖는다.

그림 1에 나타낸 집중소자형 방향성 결합기의 L_o 와 C_o 각각 평행 결합선로 방향성 결합기 모델에서 우·기 모드의 특성 임피던스의 차이를 나타내고, 결합기의 결합도를 결정하는 기모드 집중소자 파라미터를 나타낸다. 그리고 L_e와 C_e는 평행 병렬 결합 선로의 우모드 전송선로의 집중소자 등가회로 파라미터를 나타낸다.

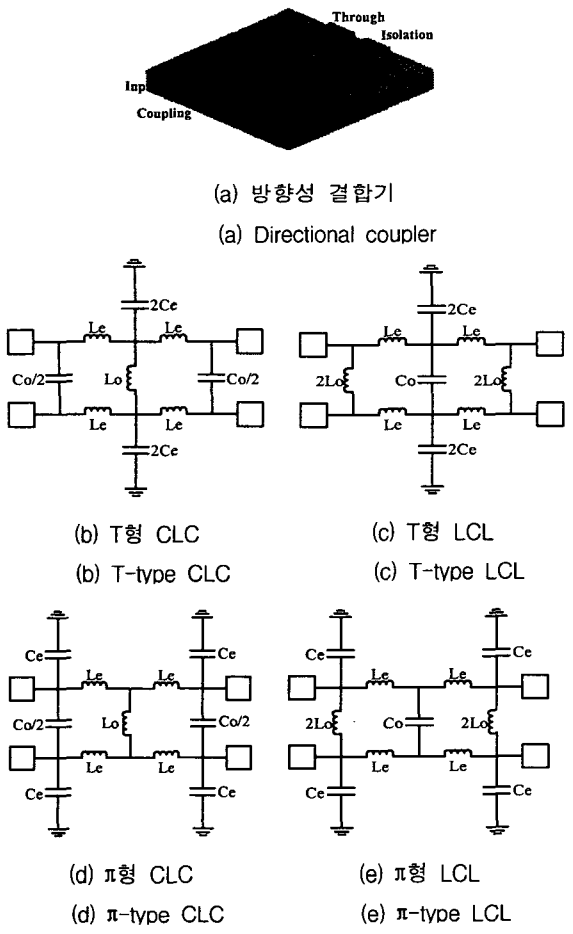


그림 1 집중소자형 방향성 결합기 회로
Fig. 1 Lumped-type directional couplers.

2.2 집중소자형 방향성 결합기 설계이론

그림 2.(a)에 나타낸 바와 같이 평행 결합 선로의 방향성 결합기는 두 개의 대칭면을 갖는다. 본 논문에서 제시한 집중소자형 방향성 결합기 회로 역시 결합선로형 방향성 결합기와 마찬가지로 그림 2(b)에 나타낸 바와 같이 두 개의 대칭면을 갖는다. 본 논문에서는 집중소자형 방향성 결합기 회로와 평행 결합선로형 방향성 결합기 회로에 대하여 각 우·기 모드 등가회로를 구하고 각 모드의 등가회로에서 입력 임피던스 또는 입력 어드미턴스사이의 등가관계를 이용하여 집중소자형 방향성 결합기의 설계 식을 유도한다.

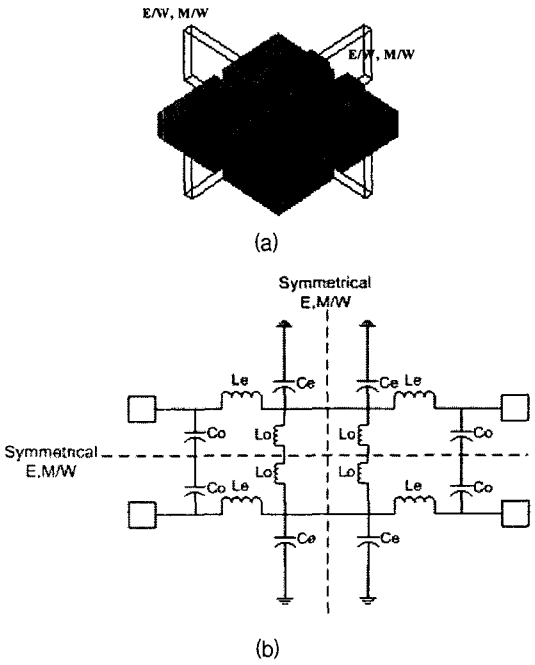


그림 2 (a) 평행 결합선로 방향성 결합기의 대칭면
(b) T형 CLC 방향성 결합기의 대칭면
Fig. 2 (a) Symmetrical planes of parallel coupler-line directional coupler, (b) Symmetrical planes of T-type CLC directional coupler.

그림 2.(a) T형 등가회로에 대해 유도하면, 먼저 가로축에 우 모드인 경우의 등가회로는 아래의 그림3(a)와 (b)로 나타낼 수 있다.

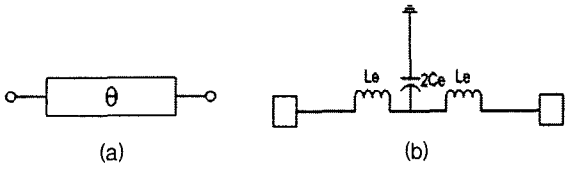
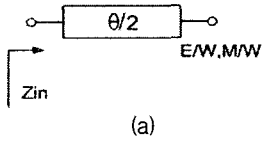
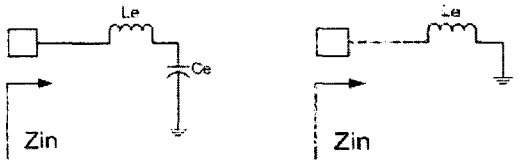


그림 3 (a) 병렬 결합선로 방향성 결합기의 우 모드 전송선로, (b) T형 CLC 방향성 결합기의 우 모드 등가회로
Fig. 3 (a) Even-mode transmission line of a parallel coupled-line directional coupler, (b) Even-mode equivalent circuit of T-type CLC coupler.

여기서, 세로축으로 우/기 모드인 경우 각각의 등가회로는 그림 4.에서와 같이 표현된다.





(b) (c)

그림 4 (a) 병렬 결합선로 방향성 결합기의 우 모드 전송선로, (b) T형 CLC 방향성 결합기의 우 모드 등가회로의 우 모드 종단회로, (c) T형 CLC 방향성 결합기의 우 모드 등가회로의 기 모드 종단회로.

Fig. 4 (a) Even-mode transmission line of a parallel coupled-line directional coupler, (b) Even-mode equivalent circuit of T-type CLC coupler with even-mode termination, (c) Even-mode equivalent circuit of T-type CLC coupler with odd-mode termination.

그림4의 두 등가회로와 전송선로의 입력 임피던스를 비교하여 각 소자 값을 유도하여 보자. 첫 번째, 기 모드 인 경우 그림 4 (a)의 전송선로의 입력임피던스는 식(1)과 같다.

$$Z_{in} = Z_{0e}\frac{Z_L + jZ_{0e}\tan\frac{\theta}{2}}{Z_{0e} + jZ_L\tan\frac{\theta}{2}} \qquad Z_L = 0$$
$$Z_{in} = jZ_{0e}\tan\frac{\theta}{2} \tag{1}$$

그림 4 (c) 등가회로의 입력임피던스는 식 (2)와 같다.

$$Z_{in} = jwL_e \tag{2}$$

식(1)과 식(2)의 등과 관계로부터 T형 CLC 방향성 결합기의 우 모드 인덕턴스(Le)를 유도하면 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$L_e = \frac{Z_{0e}}{w}\tan\frac{\theta}{2} \tag{3}$$

두 번째, 우 모두인 경우, 그림 4(a)의 전송선로 입력 임피던스는 식(4)와 같다.

$$Z_{in} = Z_{0e}\frac{Z_L + jZ_{0e}\tan\frac{\theta}{2}}{Z_{0e} + jZ_L\tan\frac{\theta}{2}} \qquad Z_L = \infty$$
$$Z_{in} = -jZ_{0e}\cot\frac{\theta}{2} \tag{4}$$

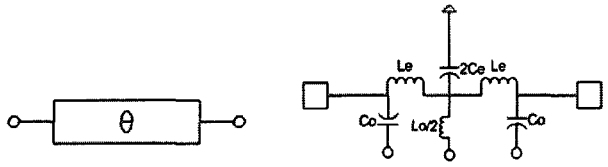
그림 4(b) 등가회로의 입력 임피던스는 식(5)와 같다.

$$Z_{in} = jwL_e + \frac{1}{jwC_e} \tag{5}$$

식(4)와 식(5)의 등과 관계로부터 T형 CLC 방향성 결합기의 우 모드 커패시턴스(Ce)를 유도하면 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$C_e = \frac{1}{2wZ_{0e}}\sin\theta \tag{6}$$

그림 1.(a) T형 등가회로에 대해 가로축이 기 모드인 경우의 등가회로는 아래의 그림과 같다.



(a) (b)

그림 5 (a) 병렬 결합선로 방향성 결합기의 기 모드 전송선로, (b) T형 CLC 방향성 결합기의 기 모드 등가회로

Fig. 5 (a) Odd-mode transmission line of a parallel coupled-line directional coupler, (b) odd-mode equivalent circuit of T-type CLC coupler.

여기서, 세로축으로 우/기 모드 일 때의 등가회로는 그림 6과 같이 표현된다.

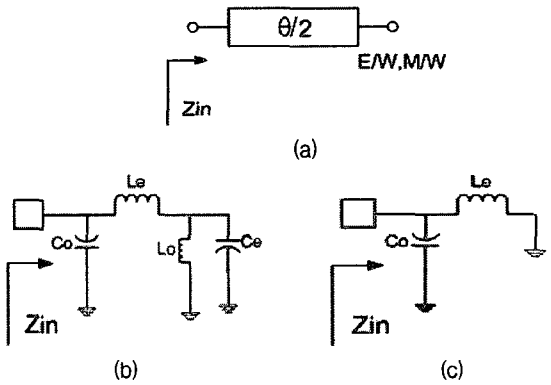


그림 6 (a) 병렬 결합선로 방향성 결합기의 기 모드 전송선로, (b) T형 CLC 방향성 결합기의 기 모드 등가회로의 우 모드 종단회로, (c) T형 CLC 방향성 결합기의 기 모드 등가회로의 기 모드 종단회로.

Fig. 6 (a) Odd-mode transmission line of a parallel coupled-line directional coupler, (b) Odd-mode equivalent circuit of T-type CLC coupler with even-mode termination, (c) Odd-mode equivalent circuit of T-type CLC coupler with odd-mode termination.

그림6의 두 등가회로와 전송선로의 입력 임피던스를 비교하여 각 소자 값을 유도하여 보자. 첫 번째, 기 모드 인 경우 그림 6 (a)의 전송선로의 입력임피던스는 식(7) 같다.

$$Y_{in} = Y_{0o}\frac{Y_L + jY_{0o}\tan\frac{\theta}{2}}{Y_{0o} + jY_L\tan\frac{\theta}{2}} \qquad Y_L = \infty$$
$$Y_{in} = -jY_{0o}\cot\frac{\theta}{2} \tag{7}$$

그림 6(c) 등가회로의 입력 임피던스는 식(8)와 같다.

$$Y_{in} = jwC_o + \frac{1}{jwL_e} \tag{8}$$

식(7)과 식(8)의 등과 관계로부터 T형 CLC 방향성 결합기의 기 모드 커패시턴스(Co)를 유도하면 식(9)로 나타낼 수 있다.

$$C_o = \frac{1}{w^2 L_e} - \frac{Y_{0o}}{w}\cot\frac{\theta}{2} \tag{9}$$

표 1 T형 집중소자 방향성 결합기 설계 수식

Table 1 Design Formulas of T-type Lumped directional coupler.

T형 CLC 방향성 결합기	T형LCL 방향성 결합기
$C_e = \frac{1}{2wZ_{0e}} sin\theta$	$C_e = \frac{1}{2wZ_{0e}} sin\theta$
$L_e = \frac{Z_{0e}}{w}\tan\frac{\theta}{2}$	$L_e = \frac{Z_{0e}}{w}\tan\frac{\theta}{2}$
$C_o = \frac{1}{w^2 L_e} - \frac{Y_{0o}}{w}\cot\frac{\theta}{2}$	$C_o = \frac{1}{w^2 L_e + \frac{w^2 L_o}{1 + wL_o Y_{0o}\tan\frac{\theta}{2}}} - C$
$L_o = \frac{1}{w^2 C_e - \left(\frac{wC_o - Y_{0o}\tan\frac{\theta}{2}}{wL_e\left(wC_o - Y_{0o}\tan\frac{\theta}{2}\right) - 1}\right)}$	$L_o = \frac{1}{wY_{0o}\cot\frac{\theta}{2} - \frac{1}{L_e}}$

표 2 π형 집중소자 방향성 결합기 설계 수식

Table 2 Design Formulas of π-type Lumped directional coupler.

π형 CLC 방향성 결합기	π형LCL 방향성 결합기
$C_e = \frac{Y_{0e}}{w}\tan\frac{\theta}{2}$	$C_e = \frac{Y_{0e}}{w}\tan\frac{\theta}{2}$
$L_e = \frac{Z_{0e}}{2w}\sin\theta$	$L_e = \frac{Z_{0e}}{2w}\sin\theta$
$C_o = -\frac{Y_{0o}}{w}\cot\frac{\theta}{2} + \frac{1}{w^2 L_e} - C_e$	$C_o = \frac{1}{w^2 L_e - \frac{1}{C_e - \frac{1}{w^2 L_o} - \frac{Y_{0o}}{w}\tan\frac{\theta}{2}}}$
$L_o = \frac{1}{w^2(C_e + C_o) - wY_{0o}\tan\frac{\theta}{2}} - L$	$L_o = \frac{1}{w^2 C_e - \frac{1}{L_e} + wY_{0o}\cot\frac{\theta}{2}}$

두 번째, 우 모두인 경우, 그림 6(a)의 전송선로 입력 임피던스는 식(10)과 같다.

$$Y_{in} = Y_{0o}\frac{Y_L + jY_{0o}\tan\frac{\theta}{2}}{Y_{0o} + jY_L\tan\frac{\theta}{2}} \quad Y_L = 0$$
$$Y_{in} = jY_{0o}\tan\frac{\theta}{2} \tag{10}$$

그림 6(b) 등가회로의 입력 임피던스는 식(11)과 같다.

$$Y_{in} = jwC_o + \frac{1}{jwL_e + \frac{1}{j(wC_e - \frac{1}{wL_o})}} \tag{11}$$

식(10)과 식(11)의 등과 관계로부터 T형 CLC 방향성 결합기의 우 모드 커패시턴스(Lo)를 유도하면 식(12)로 나타낼 수 있다.

$$L_o = \frac{1}{w^2 C_e - \left(\frac{wC_o - Y_{0o}\tan\frac{\theta}{2}}{wL_e\left(wC_o - Y_{0o}\tan\frac{\theta}{2}\right) - 1}\right)} \tag{12}$$

표 1과 표 2에 본 논문에서 제안한 4가지 종류의 집중소자형 방향성 결합기 구조에 대하여 위에서 언급한 방법으로 유도한 설계 수식을 정리하여 나타내었다.

2.3 MMIC 집중소자형 방향성 결합기 설계 및 측정

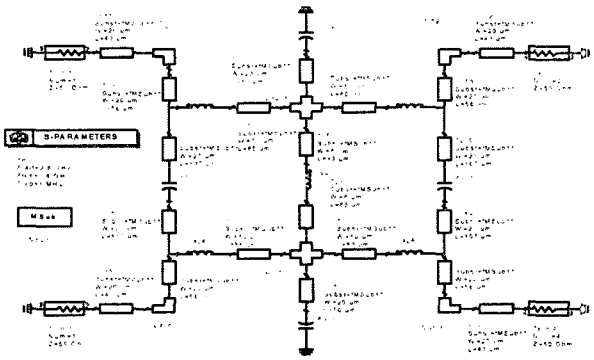
무선통신 단말기 시스템에 적용 가능한 방향성 결합기 구조의 설계 예로 MMIC 기술을 이용하여 소형 칩형태의 방향성 결합기를 제작하였다. 그림 1(b)의 T형 방향성결합기 회로를 각각 3dB 결합량을 갖는 방향성 결합기는 3.4GHz에서, 4.7dB 결합량을 갖는 방향성 결합기는 5.6 GHz에서 설계하였으며, 각각의 소자값은 다음 표에서 보여진다.

표 4 3.4GHz와 5.6GHz 대역 T형 집중소자 방향성 결합기 설계 결과(결합량 : 3dB & 4.7dB)

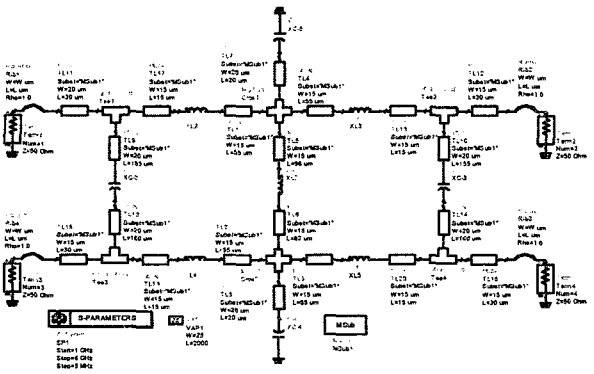
Table 4 Design results of 3.4GHz and 5.6GHz T type Lumped directional couplers. (Coupling value of 3dB & 4.7dB).

	3dB @3.4GHz	4.7dB @5.6GHz
Ce [pF]	1.149	0.5815
Le [nH]	0.98	0.73
Co [pF]	1.87	0.808
Lo [nH]	0.4	0.53

그림 8은 MMIC 방향성 결합기의 시뮬레이션 회로도이며, GaAs기판의 사양인 유전율12.9와 높이 95um를 적용하고 접합선로를 적용한 회로도이다. 그림 9.(a)(b)는 3.4GHz에서 설계한 방향성 결합기의 시뮬레이션과 실제 측정한 비교 데이터이다.



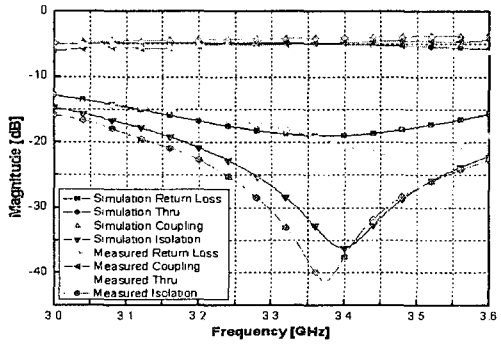
(a) 4dB 3.4GHz



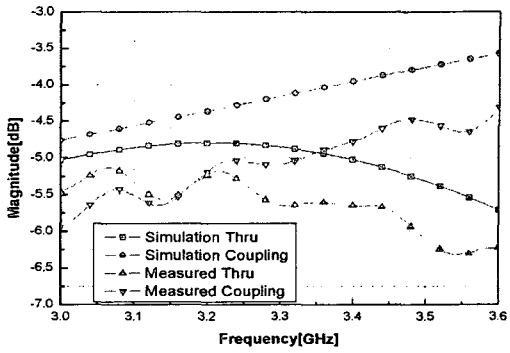
(b) 4.7dB 5.6GHz

그림 8 MMIC 집중소자형 방향성 결합기 회로
Fig. 8 MMIC Lumped-type directional couplers

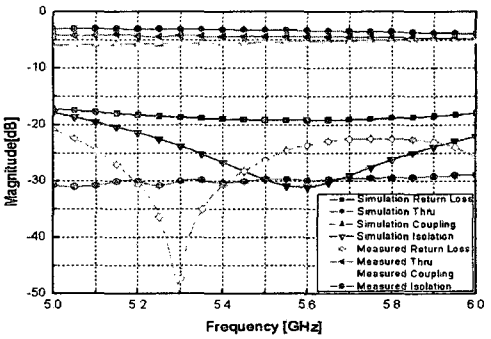
반사손실은 시뮬레이션에서 -19dB 측정한 데이터에서 -20.5dB, 결합량은 각각 -4dB, -5dB, 격리 특성은 각각 -36dB, -37dB를 나타내었다. 그리고 삽입손실은 각각 -5dB, -6dB를 나타내었다. 그림 9(c)(d)는 5.6GHz에서 설계한 방향성 결합기의 시뮬레이션과 실제 측정한 비교 데이터이다. 반사손실은 시뮬레이션에서-19.2dB 측정한 데이터에서 -24dB, 결합량은 각각 -5.2dB로 동일하였다. 격리 특성은 각각 -31dB, -30dB를 나타내었고 삽입손실은 각각 -3.3dB, -4.5dB를 나타내었다.



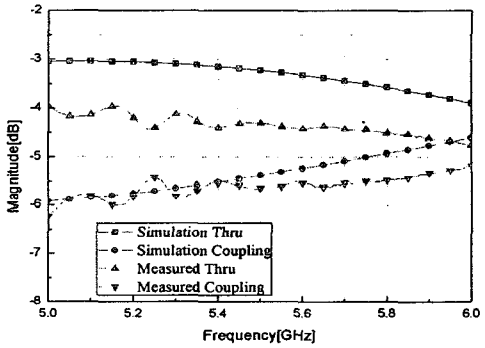
(a) 3dB 3.4GHz



(b) 3dB 3.4GHz

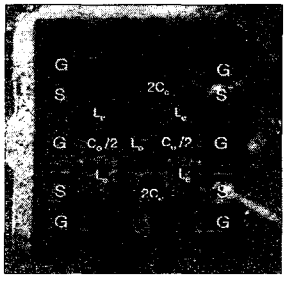


(c) 4.7dB 5.6GHz

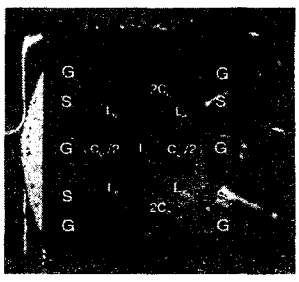


(d) 4.7dB 5.6GHz

그림 9 제작된 MMIC집중소자형 방향성 결합기 회로에 대한 측정결과와 시뮬레이션 결과 비교
Fig. 9 Comparisons between the measurement and simulations on the fabricated MMIC lumped-type directional coupleres



(a) 3dB 방향성 결합기
(a) 3dB directional coupler



(b) 4.7dB 방향성 결합기
(b) 4.7dB directional coupler

그림 10 제작된 MMIC 집중소자형 방향성 결합기 회로
Fig. 10 MMIC Lumped-type directional couplers.

그림 10은 다른 MMIC 회로에 적용하여 단일 칩으로 제작이 가능한 실제 제작된 집중소자형 MMIC 방향성 결합기 모습으로 칩 크기는 1×1mm이다.

3. 결 론

일반적인 평행 결합선로 방향성 결합기의 등가회로는 상호 인덕턴스로 인하여 수식의 유도가 어렵고, 실제 제작에 있어 많은 문제점을 가지고 있었다. 본 논문은 이러한 문제점을 해결하기 위해 임의의 집중소자를 추가하여 우 모드와 기 모드의 입력 임피던스 차이를 주었고 결합도를 나타 내었다. 또한 소자값을 계산하기 위해 방향성 결합기와 제시한 등가회로에 대해 우·기 모드 계산법을 이용하여 상호 인덕턴스를 제거하고 입력 임피던스 또는 어드미턴스의 비교를 통해 소자값을 유도 하였다. 그리고 최종 4종류의 자기 인덕턴스와 자기 커패시턴스만을 가지는 등가회로 모델을 제시하였다. 또한 제시한 방향성 결합기의 T형 모델에 대해 3dB와 4.7dB의 결합량을 갖는 방향성 결합기를 각각 3.4GHz와 5.6GHz에서 회로 시뮬레이션을 통해 접합선로를 고려하여 설계하였다. 또한 나리지온의 라이브러리를 이용하여 실제 MMIC로제작하여 결과의 타당성을 검증하였다. 이를 통해 단말기 시스템의 다른 부품들과의 집적화에 적용할 수 있을 것이다.

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 sπral 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 a wide-band lumped-element 3-dB quadrature coupler," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-49, pp. 476-479, Mar. 2001.

[4] Rajesh Mongia, Inder bahi, and Prakash Bhartia "RF and Microwave Coupled Line Circuits," Artech House pp. 181-193. 1999.

[5] T-Y. song, J-H. Kim and S-H. Kim, J-S. Park, J-B. Lim, "Design of a Novel Lumped Element Backward Directional Coupler Based on Parallel Coupled-Line Theory," IMS2002 pp. 213-216 2002.

[6] Y-C. Ching, C-Y. Chen, "Design of lumped element quadrature coupler" Electron Lett., vol. 34, pp. 465-466, Mar. 1998.

[7] K. Shibata et al., "Microstrip spiral directional coupler," IEEE trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-29, pp. 680-689, Jul. 1981.

[8] 박준석, 송택영. "평행 결합선로 이론에 근거한 새로운 집중 소자형 방향성 결합기", 한국전자파학회 논문지, Vol. 14, No. 10, pp. 1036-1043, 2003년 10월.

저 자 소 개

강 명 수(康 明 洙)

1978년 12월 23일생. 2003년 순천향 대학교 전자공학과 졸업. 2003년~현재 국민대학교 대학원 전자공학과 석사과정

Tel : 02-910-5072, Fax : 02-910-4646

E-mail : trigan97@empal.com

박 준 석(朴 准 奭)

1969년 8월 12일생. 1996년 국민대학교 전자공학과 대학원 졸업(공박). 1997년 UCLA Post Doc. 1998년~2003년 순천향대학교 정보기술 공학부 조교수. 2003~현재 국민대 전자정보기술공학부 조교수

Tel : 02-910-4829, Fax : 02-910-4646

E-mail : jspark@kookmin.ac.kr

이 재 학(李 在 鶴)

1964년 8월 12일생. 2001년 서울대학교 전기공학과 대학원 졸업(공박). 1990년~2001년 엘지종합기술원 MTS. 2001년~2004년 (주)웨이브아이시스 연구소장. 2004년~현재 (주)웨이브아이시스 생산기술 센터장.

Tel : 02-500-4072, Fax : 02-500-4719

E-mail : jhlee@wavics.com

김 형 석 (金 炯 碩)

1962년 10월 9일생. 1985년 서울대 전기공학 공학사 1987년 동 대학원 전기공학 공학석사, 1990년 동 대학원 공학박사, 1990년~2002년 : 순천향대 정보기술공학부 부교수, 1997년~1998년 : R.P.I 미국 방문교수, 2002년~현재 : 중앙대학교 전자전기공학부 부교수, 주관심분야: 전자장 및 전자파 수치해석, RF및무선통신, 전자장 교육, RF 및 마이크로웨이브 소자 해석 및 설계

Tel : 02-820-5287, Fax : 02-825-1584

E-mail : kimcaf2@cau.ac.kr