

복합 유전체기판상에 결합 마이크로스트립 선로의 Closed-form 모드 파라미터

정회원 문 승 찬*

Closed-form Mode Parameters of Coupled Microstrip Lines on Composite Dielectric Substrates

Seung Chan Moon* *Regular Member*

요 약

결합 마이크로스트립 선로의 총 부유용량을 여러가지 부유용량으로 나눈 closed-form 해석방법을 이용하여 복합 유전체기판상에 대칭 및 비대칭 결합 마이크로스트립 선로의 모드 파라미터를 제안하였다. 제안한 해석방법을 이용하여 계산한 결과와 이미 발표된 해석방법과 비교하여 타당성을 확인하였다.

closed-form 해석방법은 광대한 수치적 계산시간을 줄일수있어, 초고주파 시스템의 경량 및 소형화 추세로 인한 MIC 및 MMIC의 CAD 프로그램으로 가능성을 확인하였다.

ABSTRACT

The mode parameters of coupled microstrip lines on composite dielectric substrates are derived by using the closed-form expressions which are based on dividing the total capacitance of the coupled lines into various basic capacitances.

The derived formulas have been found in good agreement with the previously obtained results.

Closed-form expressions are very useful for a CAD program for the MIC and MMIC applications.

I. 서 론

초고주파 수동소자로서 결합 마이크로스트립 선로는 필터, 방향성 결합기 및 임피던스 변환기 등과 같은 중요한 전송선로로 널리 이용되고 있다.

결합 마이크로스트립 선로는 두 모드의 장 분포(field distribution)가 다르기 때문에 결합 마이크로스트립 선로를 이용한 방향성 결합기의 모드 위상속도가 서로 다르다. 이러한 모드 위상속도의 차이가 증가할수록 방향성 결합기의 격리도와 방향성도가 저하된다.^[1]

결합 마이크로스트립 선로의 모드 위상속도의 차이를 줄이거나 같게하기 위해서 복합 유전체기판을 이용

한 여러 가지 해석방법들이 발표된 바 있다.^[2-3] 이들 해석방법들은 유전체기판의 수 또는 전송선로의 수에 관한 이론적 제한을 두지 않으며, 해석방법의 정확성과 신뢰성은 매우 높다.

그러나 광대한 수치적 계산을 요구하기 때문에 초고주파 CAD 프로그램으로 수행하는데 비실용적인 단점이 있다.^[4]

closed-form 해석방법^[5]은 마이크로스트립 선로의 총 부유용량을 여러가지 부유용량으로 나눈 근사식이지만 계산시간을 줄일수있는 간단한 설계 방정식으로 제공한다는 장점때문에 초고주파 CAD 프로그램으로 유용하게 이용되고 있다.

* 영동전문대학 정보통신과(scmoon@yeongdong.ac.kr) 정회원
논문번호: 98309-0721, 접수일자: 1998년 7월 21일

R.Garg^[6]는 대칭 결합 마이크로스트립 선로, S.S. Bedair^[7]는 비대칭 결합 마이크로스트립 선로, A.K. Verma^[8]는 다층 유전체기판에 여러가지 모양을 갖는 마이크로스트립 패치, B.Rawat^[4]는 대칭 3 선 마이크로스트립 결합기를 closed-form 해석방법으로 각각 발표하였다.

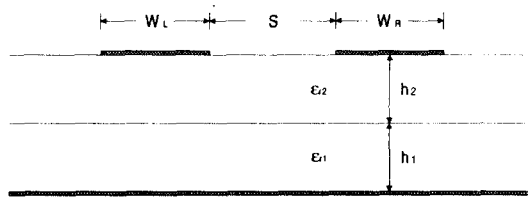
그러나 closed-form 해석방법을 이용하여 복합 유전체기판상에 결합 마이크로스트립 선로의 모드 파라미터에 관한 연구가 발표된 적은 거의 없다.

본 논문에서는 closed-form 해석방법을 이용하여 복합 유전체기판상에 대칭 및 비대칭 결합 마이크로스트립 선로의 모드 파라미터를 제안하였다.

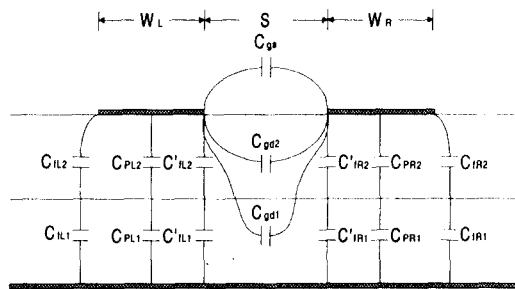
제안한 해석방법을 이용하여 계산한 결과와 이미 발표된 해석방법^[7,9]과 비교하여 타당성을 확인하였다.

제안한 closed-form 해석방법은 광대한 수치적 계산 시간을 줄일 수 있어, 초고주파 시스템의 경량 및 소형화 추세로 인한 MIC 및 MMIC의 CAD 프로그램으로 가능함을 확인하였다.

II. 복합 유전체기판상에 결합 마이크로스트립 선로의 모드 파라미터



(a)



(b)

그림 1. (a) 복합 유전체기판상에 결합 마이크로스트립 선로 (b) 여러가지 부유용량

Fig. 1 (a) Coupled microstrip lines on composite substrates (b) Various capacitances

그림 1(a)는 복합 유전체기판상에 결합 마이크로스트립 선로이며, 결합선로의 폭 $W_Y (Y=L, R)$, 결합선로사이의 간격 S , 유전율 $\epsilon_n (n=1, 2)$ 및 기판높이 $h_i (i=1, 2)$ 를 나타내었다. 여기서 유전체기판은 무손실이며 선로의 두께는 무시하였다.

그림 1(b)은 결합 마이크로스트립 선로의 부유용량이며 결합선로의 총 부유용량을 여러가지 기본 부유용량으로 나누어 나타내었다.

이들 부유용량을 이용한 각 선로의 총 부유용량은 다음과 같다.

$$C_{LL} = C_{\pi L} + C_{PL} + C'_{\pi L} + C_{gd} + C_{ga} \quad (1a)$$

$$C_{RR} = C_{\pi R} + C_{PR} + C'_{\pi R} + C_{gd} + C_{ga} \quad (1b)$$

$$C_{LR} = C_{gd} + C_{ga} \quad (1c)$$

여기서 $C_{PY} (Y=L, R)$ 은 복합 유전체상에 마이크로스트립 선로의 왼쪽과 오른쪽 평행판 부유용량이다.

평행판 부유용량 C_{PY} 은

$$C_{PY} = \frac{C_{PY1} C_{PY2}}{C_{PY1} + C_{PY2}} \quad (Y=L, R) \quad (2)$$

이며, 여기서

$$C_{PYi} = \epsilon_0 \epsilon_n \frac{W_Y}{H_i} \quad (Y=L, R, i=1, 2)$$

가장자리 부유용량 $C_{\pi Y} (Y=L, R)$ 는 다음과 같다.

$$C_{\pi Y} = \frac{C_{\pi Y1} C_{\pi Y2}}{C_{\pi Y1} + C_{\pi Y2}} \quad (Y=L, R) \quad (3)$$

$$C_{\pi Yi} = 0.5(C_{mYi} - C_{PYi}) \quad (Y=L, R, i=1, 2) \quad (4)$$

여기서, C_{PYi} 는 식(2)로 주어지며, C_{mYi} 은 마이크로스트립 선로의 총 부유용량으로 다음과 같다.

$$C_{mYi} = \frac{\epsilon_{re(m)}(W_Y, h_i, \epsilon_n)}{C_v Z_m(W_Y, h_i, \epsilon_n = 1)} \quad (5)$$

여기서 $Z_m(W_Y, h_i, \epsilon_n = 1)$ 과 $\epsilon_{re(m)}(W_Y, h_i, \epsilon_n)$ 은

$$Z_m(W_Y, h_i, \epsilon_n = 1) = \begin{cases} 60 \ln \left[\frac{8h_i}{W_Y} + \frac{W_Y}{4h_i} \right] & (W_Y/h_i \leq 1) \\ 120 \pi / \left[\frac{W_Y}{h_i} + 1.393 + 0.677 \ln \left(\frac{W_Y}{h_i} + 1.444 \right) \right] & (W_Y/h_i \geq 1) \end{cases} \quad (6)$$

$$\epsilon_{re(m)}(W_Y, h_i, \epsilon_n) = 0.5 [(\epsilon_n + 1) + (\epsilon_n - 1) F(W_Y/h_i)] \quad (7)$$

이며,

$$F(W_Y/h_i) = \begin{cases} (1 + 12 h_i / W_Y)^{-1/2} + 0.04(1 - W_Y)^2 & (W_Y/h_i \leq 1) \\ (1 + 12 h_i / W_Y)^{-1/2} & (W_Y/h_i \geq 1) \end{cases}$$

이다.

$C_{\Omega 2}$ 는 유전율 ϵ_{r2} 과 기판높이 h_2 을 갖는 가장자리 부유용량으로 구해진다. 또한 $C_{\Omega 1}$ 은 유전율 ϵ_{r1} 과 기판높이 $h_1 + h_2$ 을 갖는 가장자리 부유용량(그림 2(a))과 유전율 ϵ_{r1} 과 기판높이 h_2 을 갖는 가장자리 부유용량(그림 2(b))을 각각 식(4)에 대입하고 그 결과값을 빼면 구할수있다.

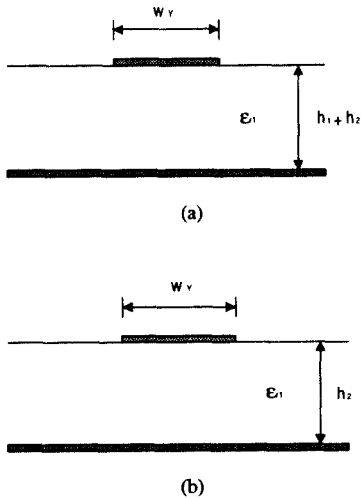


그림 2. (a) 유전율 ϵ_{r1} 과 기판높이 $h_1 + h_2$ 를 갖는 가장자리 부유용량 (b) 유전율 ϵ_{r1} 과 기판높이 h_2 를 갖는 가장자리 부유용량

Fig. 2 (a) Fringe capacitance with a ϵ_{r1} and $h_1 + h_2$ (b) Fringe capacitance with a ϵ_{r1} and h_2

가장자리 부유용량 $C'_{\Omega Y}$ 는 가장자리 부유용량 $C_{\Omega Y}$ 을 구하는 방법과 유사하게 구할수있다.^[7]

$$C'_{\Omega Y} = \frac{C'_{\Omega 1} C'_{\Omega 2}}{C'_{\Omega 1} + C'_{\Omega 2}} \quad (Y = L, R) \quad (8)$$

유전체 영역에서 간격 부유용량 C_{gd} 은 다음과 같다.

$$C_{gd} = C_{gd1} + C_{gd2} \quad (9)$$

$$C_{gdi} = \sqrt{C_{gdLi} C_{gdRi}} \quad (i = 1, 2) \quad (10)$$

여기서

$$C_{gdYi} = 0.5(C_{asYi} - C_{asYi}) \quad (Y = L, R, i = 1, 2) \quad (11)$$

이다.

S.S.Bedair^[7]가 제안한 식(11)에서 부유용량 C_{gdYi} ($Y = L, R, i = 1, 2$)는 선로폭이 같은 대칭 결합스트립 선로의 기모드와 우모드 부유용량을 각각 계산하고 그 결과값의 평균값으로 구하였다.

그러나 본 논문에서는 결합 마이크로스트립 선로에서 구한 실험식^[6]을 이용하여 보다 간단히 구할수 있는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$C_{gdYi} = \frac{\epsilon_o \epsilon_{ri}}{\pi} \ln \left[\coth \left(\frac{\pi s}{4h} \right) \right] + 0.65 C_{\Omega Yi} \left(\frac{0.02}{s/h} \sqrt{\epsilon_{ri}} + 1 - \epsilon_{ri}^{-2} \right) \quad (12)$$

공기영역에서 간격 부유용량 C_{gd} 은 비대칭 코플라너 스트립 선로구조^[7]을 이용하여 계산할수있다.

복합 유전체기판상에 결합 마이크로스트립선로의 자기 인덕턴스 L_{LL} , L_{RR} 및 상호 인덕턴스 L_{LR} 은 식(1)에서 유전율을 공기($\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 1$)로 대치할 때 자기 부유용량 C_{LL}^a , C_{RR}^a 및 간격 부유용량 C_{LR}^a 로부터 다음과 같다.^[7]

$$L_{LL} = \frac{10 C_{RR}^a}{9 \Delta C^a} \quad (13a)$$

$$L_{RR} = \frac{10 C_{LL}^a}{9 \Delta C^a} \quad (13b)$$

$$L_{LR} = \frac{10 C_{LR}^a}{9 \Delta C^a} \quad (13c)$$

여기서 $\Delta = C_{LL}^a C_{RR}^a - (C_{LR}^a)^2$ 이다.

식(13)에서 인덕턴스 L_{LL}, L_{RR}, L_{LR} 의 단위는 nH/Cm 이며, 부유용량 $C_{LL}^a, C_{RR}^a, C_{LR}^a$ 의 단위는 pF/Cm 이다.

복합 유전체기판상에 비대칭 결합 마이크로스트립 선로의 C-모드와 II-모드 위상속도와 특성 임피던스는 다음과 같다.^[7]

$$V_{RC,II} = \frac{C_V}{\sqrt{\epsilon_{rec,C,II}}} \quad (14)$$

$$Z_{CL} = \frac{C_V}{\sqrt{\epsilon_{rec}}} \left(L_{LL} - \frac{L_{LR}}{R_{II}} \right) \quad (15a)$$

$$Z_{III} = \frac{C_V}{\sqrt{\epsilon_{reII}}} \left(L_{LL} - \frac{L_{LR}}{R_C} \right) \quad (15b)$$

$$Z_{CR} = -R_c R_{II} Z_{CL} \quad (15c)$$

$$Z_{IR} = -R_c R_{II} Z_{III} \quad (15d)$$

여기서

$$\epsilon_{rec,C,II} = 2C_V [L_{LL} C_{LL} + L_{RR} C_{RR} - 2L_{LR} C_{LR} \pm \lambda]^{-1}$$

$$\lambda = \sqrt{4(L_{LR} C_{RR} - L_{LL} C_{CR})(L_{LR} C_{LL} - L_{RR} C_{LR}) + (L_{RR} C_{RR} - L_{LL} C_{LL})^2}$$

$$R_{C,II} = \frac{(L_{RR} C_{RR} - L_{LL} C_{LL}) \pm \lambda}{2(L_{LR} C_{RR} - L_{LL} C_{LR})}$$

이며, C_V 는 자유공간에서 빛의 속도이다.

III. 모드 파라미터의 계산

표 1. 모드 임피던스의 비교

Table 1. Comparison of the mode impedances

S (mm)	paper[9]				paper[7]				This paper			
	Z_{CL}	Z_{CR}	Z_{III}	Z_{IR}	Z_{CL}	Z_{CR}	Z_{III}	Z_{IR}	Z_{CL}	Z_{CR}	Z_{III}	Z_{IR}
0.1	75.50	43.90	35.00	20.70	74.50	42.15	34.45	19.49	75.61	43.58	33.60	19.37
0.2	71.43	42.86	39.64	24.30	70.81	41.50	38.85	22.77	71.98	42.73	37.58	22.31
0.3	68.57	42.14	42.29	26.43	68.04	40.90	41.58	25.05	69.06	41.95	39.94	24.26
0.4	66.43	41.43	44.43	27.86	65.90	40.40	43.51	26.69	65.16	40.31	41.58	25.70
0.5	64.26	40.71	46.43	29.29	64.28	40.01	44.96	27.99	64.14	40.80	42.81	26.80
0.6	63.21	40.00	47.50	30.35	62.99	39.67	46.10	29.04	63.82	40.38	43.74	27.67

본 논문에서 제안한 closed-form 해석방법을 이용하여 단일 유전체기판 및 복합 유전체기판상에 결합 마이크로스트립 선로의 모드 파라미터를 계산하였다. 표 1은 유전율 $\epsilon_r = 9.6$, $W_L/W_R = 0.2$, 간격(s)의 함수로 단일 기판상에 비대칭 결합 마이크로스트립 선로의 모드 임피던스를 계산하였고 이미 발표된 것^[7,9]과 비교하였다.

서로 다른 유전율을 갖는 복합기판상에 결합 마이크로스트립 선로는 두 모드(대칭인 경우, 기모드와 우모드, 비대칭인 경우 C-모드와 II-모드)의 위상속도가 상층기판의 유전율과 높이, 하층기판의 유전율과 높이에 따라 변한다.

그림 3은 복합 유전체기판상에 대칭 및 비대칭 결합 마이크로스트립 선로의 모드 위상속도(Vp)를 나타내었다. 복합 유전체기판상에서 상층과 하층기판의 유전율이 각각 $\epsilon_{r2}, \epsilon_{r1}$ 인 경우, 기판의 전체높이 $h_T = h_1 + h_2$ 를 고정시키고 상층과 하층기판 높이를 변화시켜 나타내었다. 여기서 기판높이의 비가 $h_1/h_T = 0$ 인 경우는 유전율 ϵ_{r2} 인 단층기판을 갖는 결합 마이크로스트립 선로가 되고 기판높이의 비가 $h_1/h_T = 1$ 인 경우는 유전율 ϵ_{r1} 인 단층기판을 갖는 결합 마이크로스트립 선로가 되므로 그림 3에 나타내지 않았다. 그림 3에서 상층과 하층기판의 높이변화에 따라 두 모드의 위상속도 차이가 줄어들거나 증가하여 어떤조건에서는 같아짐을 알 수 있다.

그림 4은 복합 기판상에 대칭 결합 마이크로스트립 선로의 모드 임피던스를 나타내었다.

그림 5은 결합선로 간격(S)의 변화에 따른 복합 기판상에 비대칭 결합 마이크로스트립 선로의 모드 임피던스를 나타내었다.

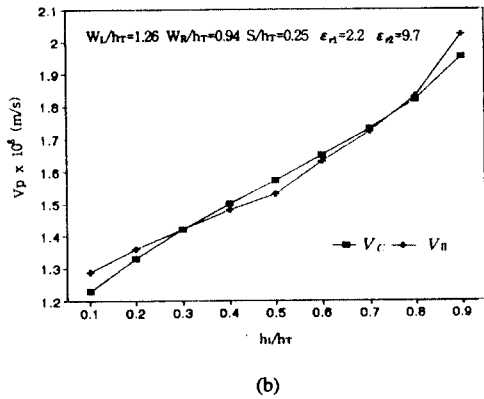
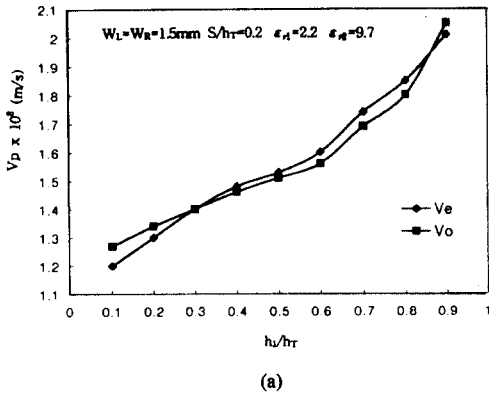


그림 3. 기판높이(h_1/h_T)의 변화에 따른 모드 위상속도
(a) 대칭 결합선로 (b) 비대칭 결합선로
Fig. 3 Mode phase velocities vs. height ratio(h_1/h_T)
(a) Symmetrical coupled lines
(b) Asymmetrical coupled lines

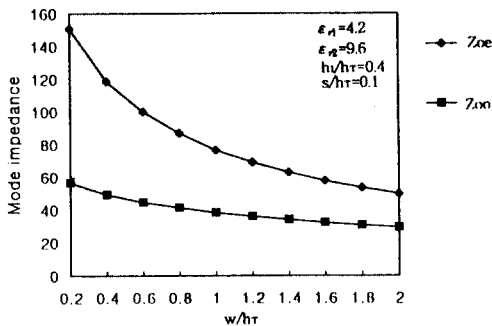


그림 4. 복합기판상에 대칭결합 마이크로스트립 모드 임피던스
Fig. 4 Symmetrical coupled microstrip mode impedances on composite substrates

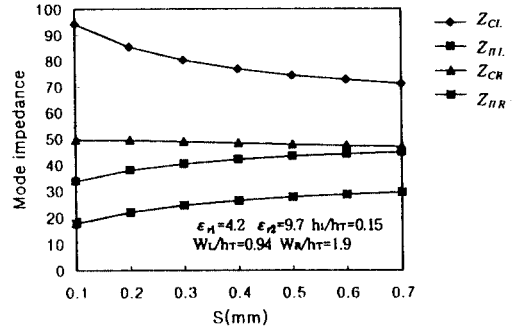


그림 5. 복합기판상에 비대칭 결합 마이크로스트립 모드 임피던스
Fig. 5 Asymmetrical coupled microstrip mode impedances on composite substrates

IV. 결론

이동통신 및 초고주파 통신시스템의 수동회로 소자로서 결합 마이크로스트립 선로는 결합선로의 폭과 간격을 조절하여 임피던스 변환과 정합이 용이하기 때문에 중요한 전송선로로 널리 이용되고 있다.

본 논문에서 제안한 closed-form 해석방법을 이용하여 복합 유전체기판상에 대칭 및 비대칭 결합 마이크로스트립 선로의 모드 파라미터를 구하였다.

상층기판의 높이와 유전율 및 하층기판의 높이와 유전율을 적절히 조절하여 결합 마이크로스트립 선로의 모드 위상속도 차이를 줄이거나 같게 할 수 있어 방향성 결합기의 격리도와 방향성도를 개선시킬 수 있을 것으로 믿는다.

본 논문에서 제안한 closed-form 해석방법은 광대한 수치적 계산을 줄일 수 있어 초고주파 시스템의 소형 및 집적화 추세로 인한 MIC 및 MMIC의 CAD 프로그램으로 매우 유용하리라 판단된다.

참고 문헌

1. M.Kobayashi and R.Terakado, "Method for equalizing phase velocities of coupled microstrip lines by using anisotropic substrate," IEEE Trans on. Microwave Theory and Tech., Vol.MTT-28, No.7, pp. 719-722, 1980.
2. J.P.Gib and C.A.Balanis, "Pulse distortion on multi-layer coupled microstrip lines," IEEE Trans on. Microwave Theory and Techniques, Vol.37, No.10, pp.

- 1620-1627, 1989.
3. Y.Xu, K.Wu, and R.G.Bosisio, "An efficient recursive technique for calculation of planar multiple strips on composite substrates for M(h)MIC and high-speed interconnects," IEEE Trans on.MTT-S Digest, pp.320-332, 1994.
 4. B.Rawat and L.Yu, "Development of semi-empirical design equations for symmetrical three-line microstrip couplers", IEEE Trans on. Microwave Theory and Techniques, Vol.44, pp.469-472, 1996.
 5. Gupta, K.C., R.Garg and I.J.Bahl "Microstrip lines and slotlines" Artech house, 2nd ed., ch.8, 1996.
 6. Garg, R., and I.J.Bahl, "Characteristics of coupled microstrip lines," IEEE Trans on.Microwave Theory and Techniques, Vol.27, pp.700-705, 1979.
 7. S.S.Bedair, "Characteristics of some asymmetrical coupled transmission lines," IEEE Trans on. Microwave Theory and Techniques, Vol.MTT-32, pp. 108-110, Jan. 1984.
 8. A.K.Verma and Z.Rostamy, "Static capacitance of some multilayered microwave capacitors," IEEE Trans on. Microwave Theory and Techniques, Vol.5, pp.1144-1151, 1995.
 9. R.H.Jansen, "Fast accurate hybrid mode computation of nonsymmetrical coupled microstrip characteristics," in Proc.7th Eur.Microwave Conf., pp.135-139, 1977.

문 승 찬(Seung Chan Moon)

정회원

현재: 영동전문대학 정보통신과 조교수
한국통신학회논문지 제22권 9호 참조