울산대학교 연구논문집 제18권(자연과학·공학편) 제1호 pp.15~20. 1987.
UOU Report Vol.18.(Natural Science and Engineering) No.1. pp.15~20. 1986.
University of Ulsan.

비균질매질에서 지수형 전송선로를 이용한 방향성결합기의 산란파라미터

최 재 하
전자 및 전산기 공학과
(1986. 9. 30. 접수)

〈요 약〉

균일한 선로를 사용한 결합기보다 더욱 평탄한 주파수 응답을 얻기 위하여 비균질매질에서 결합지수형 방향성결합기에 관한 해석을 하고 있으며, S-파라미터를 구했다. 이들 해석은 마이크로파 방향성결합기를 설계하는데 사용된다. 이에 따라 실계된 결합기는 균일한 선로를 이용한 다른 결합기들과 비교하여 매우 개선된 특성을 나타내었다. 실제로 측정한 결과치는 이론치와 상당히 일치하는 결과를 얻었다.

The Scattering Parameters of Directional Couplers Using Exponential Lines in Inhomogeneous Media

Choi, Jae-Ha
Dept. of Electronics and Computer Engineering
(Received September 30, 1986)

〈Abstract〉

In order to obtain a much flatter frequency response than uniform lines coupler, coupled exponential transmission lines in inhomogeneous media a analyzed and scattering parameters are obtained. This analysis is used to design microwave directional couplers. The designed couplers have much improved coupling characteristics compared with other couplers using uniform lines. Practical measurements show very good agreement with theoritical results.

I. 서 론

마이크로스트립을 이용한 방향성결합기는 여러가지 형태로 제작되어 왔으며, 마이크로스트립 선로의 형태에 따라 균일한 형태를 갖는 선로구조와 불균일한 형태의 구조로 나눌 수 있다.

불균일한 전송선로(NUL)에 대한 해석이나 응용은 지금까지 많이 보고 되어 있으며,[1]~[6] 대부분의 경우 이의 상황한 해석은 지수형 및 Bessel 전송선로에서 사용하다.[1] 불균일한 결합전송선로(CNUTL)에서도 위하는 성능을 얻기 위하여 수십만 수 있도록 부가적으로 설계파라미터들이 제공된다. 따라서 CNUTL 방향성결합기를 사용하면 균일한 결합전송선로(CUTL)의 방향성결합기에 비하여 더 넓은 대역폭을 얻을 수 있다. 지금까지 보고된 CNUTL의 해석방법은 매신이 비균질이며, 전송모드의 위상속도등이 서로 다른 마이크로스트립회로에는 응용할 수 없었다. 본 논문에서는 비균질매질에서의 결합지수형 전송선로(CETL)의 전송모드에 대한 해석을 유도하며, 이러한 선로를 이용하여 방향성결합기를 설계하였다. 실제로 설계된 CETL 방향성결합기는 균일한 선로를 이용한 결합기에 비하여 넓은 주파수 범위에서 더 평탄한 주파수응답을 얻을 수 있었다.

Ⅱ. 비균질매질에서 CETL의 해석

그림 1(a)와 같은 CETL에 대한 1차 미분방정식은

$$\frac{\partial v}{\partial x}=-L\frac{\partial i}{\partial t} \tag{1a}$$

$$\frac{\partial i}{\partial x}=-C\frac{\partial v}{\partial t} \tag{1b}$$

여기서

$$v=\begin{bmatrix} v_{\mathrm{I}} \\ v_{\mathrm{II}} \end{bmatrix},\quad i=\begin{bmatrix} i_{\mathrm{I}} \\ i_{\mathrm{II}} \end{bmatrix}$$

이다. v_{I}과 i_{I}은 각각 선로 Ⅰ의 x점에서의 순간전압과 전류이며, v_{II}와 i_{II}는 선로 Ⅱ의 x점에서의 순간전압과 전류이다.

$$L=\begin{bmatrix} L_{11}(x) & L_{12}(x) \\ L_{21}(x) & L_{22}(x) \end{bmatrix}$$

$$C=\begin{bmatrix} C_{11}(x) & C_{12}(x) \\ C_{21}(x) & C_{22}(x) \end{bmatrix}$$

L, C 행렬식에서 대각선요소는 자기인덕턴스 및 커패시턴스를 나타내며, 나머지요소는 상호인덕턴스 및 커패시턴스를 나타낸다. 두 개의 동일한 결합선로에 대하여 두 개의 대각선요소는 동일하며, 나머지요소들 역시 동일하다.

반사대칭성에 따라 CETL의 특성은 그림 1(b) 및 (c)에서 보는 바와 같이 두 개의 mode로 나타낸다. 스트립도체들의 전위가 동위상이면 even mode, 역위상이면 odd mode가 되며, 본 논문에서는 첨자 e와 o를 사용하여 각각 even 및 odd mode를 나타내었다.

전송선로의 특성임피던스는

$$Z_o=\frac{1}{VC} \tag{2}$$

로 표시되며, $V=1/\sqrt{\mu\epsilon}$이므로 even 및 odd mode의 경우 스트립도체와 도체기판 사이의 커패시턴스를 구하면 된다.

even 및 odd mode의 전압 $V_{e,o}$ 및 $i_{e,o}$는 선로의 총 전압 및 전류에 관계된다.

$$v_{e,o}=\frac{1}{2}(v_{\mathrm{I}}\pm v_{\mathrm{II}}) \tag{3a}$$

$$i_{e,o}=\frac{1}{2}(i_{\mathrm{I}}\pm i_{\mathrm{II}}) \tag{3b}$$

$v_{e,o}$ 및 $i_{e,o}$에 관한 미분방정식은 식 (1), (2)에서 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial v_{e,o}}{\partial x}=-L_{e,o}(x)\frac{\partial i_{e,o}}{\partial t} \tag{4a}$$

$$\frac{\partial i_{e,o}}{\partial x}=-C_{e,o}(x)\frac{\partial v_{e,o}}{\partial t} \tag{4b}$$

여기서

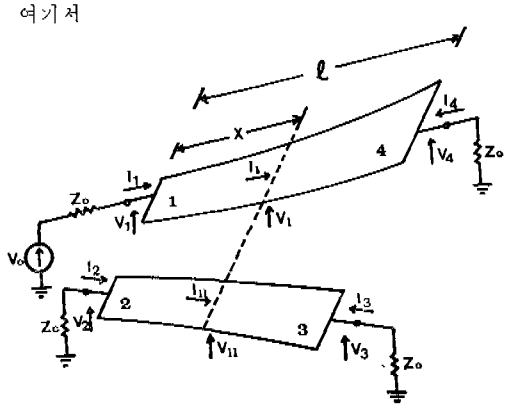


그림 1(a) 마이크로스트립 CETL

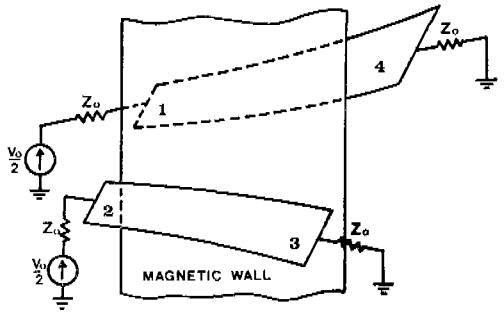


그림 1(b) 정전압발전기에 의한 even mode의 여진

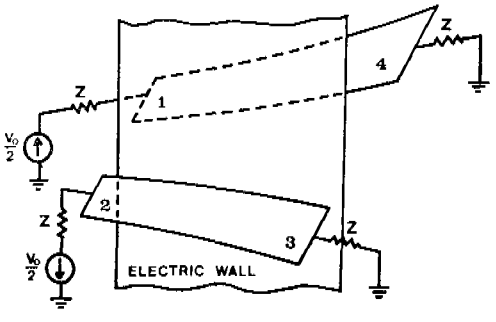


그림 1(c) odd mode의 여진

$$L_{e,o}(x)=L_{11}(x)\pm L_{12}(x)$$

$$C_{e,o}(x)=C_{11}(x)\pm C_{12}(x)$$

+ 및 −기호는 각각 even 및 odd mode에 대한 것이다.

CETL에서 인덕턴스 $L_{e,o}(x)$와 커패스턴스 $C_{e,o}(x)$는 거리 x에 따라 변한다. 즉,

$$L_{e,o}(x) = L_{e,o}e^{\alpha_{e,o}x}$$
$$C_{e,o}(x) = C_{e,o}e^{-\alpha_{e,o}x}$$

상수 α_e 및 α_o는 선로의 폭과 선로 간격의 지수함수적인 변화에 따른다.

$e^{-j\omega t}$에 대한 정상상태의 해는 각 mode에 대한 단일 ETL에 대한 것과 유사하다.

$$V_{e,o}(x) = V^{+}_{1e,1o}e^{\alpha_{e,o}x/2}e^{-j\beta_{e,o}x} + V^{-}_{1e,1o}e^{\alpha_{e,o}x/2}e^{j\beta_{e,o}x} \quad (5)$$

$$I_{e,o}(x) = \frac{V^{+}_{1e,1o}}{Z_{e,o}(x)}e^{\alpha_{e,o}x/2}e^{-j\beta_{e,o}x} - \frac{V^{-}_{1e,1o}}{Z^{*}_{e,o}(x)}e^{\alpha_{e,o}x/2}e^{-j\beta_{e,o}x} \quad (6)$$

여기서

$$\beta_{e,o} = \sqrt{\beta^2_{oe,oo} - (\alpha_{e,o}/2)^2}$$

은 even 및 odd 위상상수이며,

$$\beta_{oe,oo} = \omega\sqrt{L_{e,o}C_{e,o}}$$

는 CUTL에 일치하는 even 및 odd 위상상수이다.

또한

$$Z_{e,o}(x) = Z_{oe,oo}e^{\alpha_{e,o}x}$$

는 임의의 x에서의 even 및 odd 특성임피던스이며,

$$Z_{oe,oo} = \sqrt{\frac{L_{e,o}}{C_{e,o}}}e^{-j\theta_{e,o}}$$

는 $x=0$에서의 even 및 odd 특성임피던스이며,

$$\theta_{e,o} = \tan^{-1}(-\alpha_{e,o}/2\beta_{e,o})$$

이다. 각 선로에서의 전압, 전류는

$$V_{\mathrm{I,II}} = V_e \pm V_o$$
$$I_{\mathrm{I,II}} = I_e \pm I_o$$

Ⅲ. CETL 방향성결합기

결합기의 특성은 산란계수를 사용하여 적절히 표현할 수 있다. 결합기와 같은 4-port 소자의 산란계수를 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \quad (7)$$

CETL의 대칭성에 따라

$$S_{11}=S_{22},\ S_{21}=S_{12},\ S_{31}=S_{24},\ S_{41}=S_{32}$$

및

$$S_{33}=S_{44},\ S_{13}=S_{24},\ S_{23}=S_{14},\ S_{43}=S_{34}$$

비종속적인 산란계수는 S_{11}, S_{21}, S_{31}, S_{41}, S_{13}, S_{23}, S_{33} 및 S_{43}이다.

각 여진 mode에 대해서, 2-port 회로망인 단일 ETL의 모든 식들이 CETL의 각 선로들에 모두 유효하다. 중첩의 원리를 적용하면, 산란 파라미터 S_{11}, S_{21}, S_{31}, S_{41}은

$$S_{11,21} = \frac{1}{2}\cdot\frac{1}{1+Z_o/Z_{oe}}\cdot \frac{(1-Z_o/Z_{oe})e^{j2\beta_e l}+\rho_{2e}(1+Z_o/Z^{*}_{oe})}{(e^{j2\beta_e l}-\rho_{1e}\rho_{2e})} \pm \frac{1}{2}\cdot\frac{1}{1+Z_o/Z_{oo}}\cdot \frac{(1-Z_o/Z_{oo})e^{j2\beta_o l}+\rho_{2o}(1+Z_o/Z^{*}_{oo})}{(e^{j2\beta_o l}-\rho_{1o}\rho_{2o})} \quad (8)$$

$$S_{31,41} = \frac{1}{2}\cdot\frac{1}{1+Z_o/Z_{oe}}\cdot \frac{(1+\rho_{2e})e^{j\beta_e l}e^{\alpha_e l/2}}{(e^{j2\beta_e l}-\rho_{1e2e})} \pm \frac{1}{2}\cdot\frac{1}{1+Z_o/Z_{oo}}\cdot \frac{(1+\rho_{2o})e^{j\beta_o l}e^{\alpha_o l/2}}{(e^{j2\beta_o l}-\rho_{1o}\rho_{2o})} \quad (9)$$

여기서

$$\rho_{1e,1o} = \frac{Z_o/Z^{*}_{oe,oo}-1}{Z_o/Z_{oe,oo}+1}$$
$$\rho_{2e,2o} = \frac{Z_o e^{-\alpha_{e,o}l}/Z_{oe,oo}-1}{Z_o e^{-\alpha_{e,o}l}/Z^{*}_{oe,oo}+1}$$

그 밖의 산란계수들, 즉 $S_{33,43}$ 및 $S_{13,23}$는 각각 식 (8)과 (9)에서 taper rate $\alpha_{e,o}$를 각 mode에 대하여 바꾸기만 하면 구할 수 있다.

이상의 해석으로 부터 even 및 odd 임피던스에 대한 두 개의 독립된 taper rate를 가정할 수 있다. odd mode의 정전용량이 even mode보다 크므로[8]

$$Z_e(x) \geq Z_o(x),\quad 0 \leq x \leq l$$

가 되며, 또한 정합의 최적조건은 $Z_o = \sqrt{Z_{oe}\cdot Z_{oo}}$이므로

$$Z_{oe}e^{\alpha_e x}Z_{oo}e^{\alpha_o x} = Z_o^2 \quad (10)$$

이 된다. 식 (10)은 $\alpha_o = -\alpha_e$ 일 때 만족하여 $Z_{oe}\cdot Z_{oo} = Z_o^2$이 되며, 여기서 Z_o는 결합기의 각 port에서의 종단임피던스 또는 시스템의 특성임피던스를 의미한다. 임의의 x점에서의 even 및 odd 임피던스는

$$Z_{oo}(x)=Z_{oo}e^{-\alpha x} \qquad (11a)$$

$$Z_{oo}(x)=\frac{Z_o^2}{Z_{oo}}e^{\alpha x} \qquad (11b)$$

이다. Z_o가 결정되면, 설계에 필요한 파라미터는 Z_{oo}, α 및 결합기의 길이 l등이 된다.

다음과 같은 특별한 경우 식(11)파라미터의 섭근된 형태의 해는 식 (8)과 (9)로 부터 구할 수 있다.

1) 균질의 매질인 경우 CETL 방향성결합기에서는 $\beta_e=\beta_o$

2) 비균질의 매질인 경우 CUTL 방향성결합기에서는 $\alpha_e=\alpha_o=0$

3) 균질의 매질인 경우 CUTL 방향성결합기에서는 $\beta_e=\beta_o$ 및 $\alpha_e=\alpha_o=0$

Ⅳ. 마이크로스트립 지수형결합기

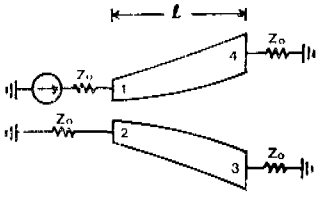
결합도가 10.5dB±0.5dB이며, 3GHz를 중심으로 하여 그 주변을 등사대역으로 갖는 방향성결합기를 설계한다고 할 때 다음과 같은 2가지 방법이 이용된다.

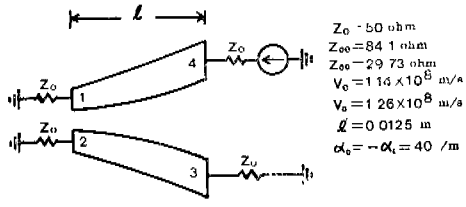
(a) source가 loose coupling side에 있는 경우에 Z_{oe}, α_e, V_e, Z_{oo}, α_o, V_o 및 l은 그림 2와 같이 주어지며, 산란파라미터에 대한 계산치가 데시벨로 주어져 있다. 1~7.5 GHz의 주파수범위에서 원하는 결합계수의 3 dB이내에서 S_{14}가 변하도록 한다.

(b) source가 tight coupling side에 있는 경우에 그림 3에 보인 것과 같이 설합된 등은 (a)의 경우와 비슷한데 반하여 반사계수는 개선된다. 1~10 GHz의 주파수범위에서 원하는 결합계수의 3dB이내에서 S_{21}이 변하도록 한다.

odd 및 even 특성임피던스의 taper rate의 값은 마이크로스트립 응용에 적합하나. 그림 2 및 그림 3에서 유의해야 할 점은 결합계수 S_{21} 및 S_{34}는 균일한 선로서 얻은 것 보다 더욱 평탄한 주파수특성을 갖는다는 것이다. 그러나 높은 주파수대에서는 S_{24} 및 S_{31}의 상승에 기인하여 설합기의 방향성은 저하된다. 이는 비균질의 매질에서 even 및 odd mode의 위상속도가 같지 않음에 따라 나타나는 결합기의 고유한 특성이다.

실제의 마이크로스트립 방향성결합기를 $\epsilon_r=10$인 유전체기판에 구성하였으며, 마이크로스트립 결합





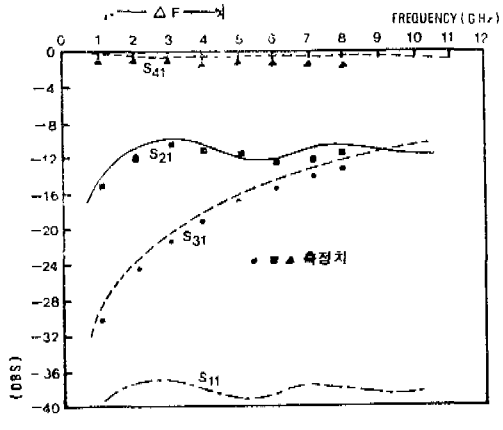


그림 2 비균질매질의 CETL 방향성 결합기의 산란 파라미터 S_{14}, S_{24}, S_{34}, 및 S_{44}

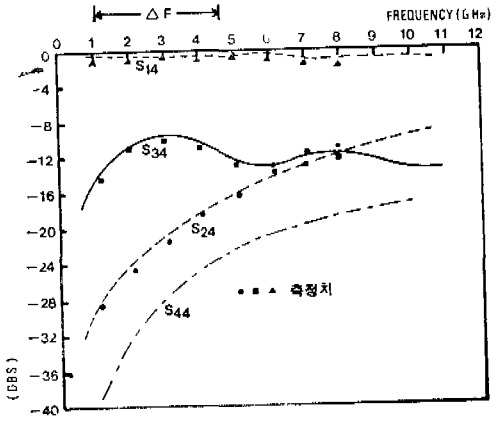


그림 3 비균질매질의 CETL 방향성 결합기의 산란 파라미터 S_{11}, S_{21}, S_{31}, 및 S_{41}

표 1

x/l	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$Z_{oe}(\times)\Omega$	84.10	80.00	76.1	72.39	68.86	65.5	62.31	59.27	56.38	53.63	51.01
$Z_{oo}(\times)\Omega$	29.73	31.25	32.85	34.54	36.31	38.17	40.13	42.18	44.35	46.62	49.01
w/h	0.655	0.725	0.78	0.835	0.885	0.92	0.99	0.995	1.01	1.04	1.055
s/h	0.065	0.09	0.135	0.195	0.28	0.4	0.58	0.85	1.27	2.15	5.0
w(mm)	0.416	0.46	0.495	0.530	0.562	0.584	0.629	0.632	0.641	0.66	0.67
s(mm)	0.041	0.057	0.086	0.124	0.178	0.254	0.368	0.54	0.807	1.365	3.175
$v_e\times10^9$(m/s)	0.114	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113	0.114	0.114	0.114	0.115	0.116
$v_o\times10^9$(m/s)	0.131	0.131	0.131	0.131	0.13	0.129	0.128	0.127	0.124	0.123	0.12

기의 구조적인 칫수와 even 및 odd mode 저항형 특성임피던스의 관계는 중요하지 않다. 근사적으로 선로를 따라 각각의 x 점에서 균일한 결합선로에 사용되는 방정식이 유효하다고 가정하였다. 마이크로스트립회로의 영대는 다음과 같은 단계를 거쳐서 얻었다.

(1) 길이 l은 같은 간격으로 적당히 나누며, $Z_{oe}(x)$ 및 $Z_{oo}(x)$의 값은 표 1 및 그림 4에서 주어진 것과 같이 x의 각 값에서 계산한다.

(2) 이에 일치하는 값의 w 및 S의 값을 얻는다.

(3) x, w, 및 S의 값에 따라 작성되는 점들과 이 점들을 곡선으로 연결함으로써 최종적으로 마이크로스트립 방향성결합기의 형태를 얻는다.

이러한 과정에 따라 마이크로스트립 결합기를 설계하였으며, 측정한 S-파라미터들을 그림 2와 그림 3에 나타내었다. 이 결과를 보면 계산치와 측정치들이 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 2와 그림 3에 이 결합기를 적용시킬 수 있는 주파수범위를 나타내었다. 본 논문에서는 측정시 중심주파수를 3GHz로 하였으며, 마이크로스트립선로의 그기는 l 12.5 mm, h -0.635mm, w=0.62mm 로 하였으며, 선로의 특성임피던스는 50Ω이다.

V. 결 론

본 논문에서는 비균일 매질에서의 CETL 특성에 대한 해석을 다루었으며, 마이크로파 방향성결합기에 대한 정확한 설계파라미터들을 제시하였다. CETL을 이용한 마이크로스트립 결합기는 균일한 선로를 사용한 방향성결합기에 비하여 더욱 평탄한 주파수응답을 나타내었다. 그러나 높은 주파수대에서는 even 및 odd mode의 위상속도가 달라짐에 따라 방향성결합기의 방향성(directivity)이 저하되는 현상이 나타났다. 이를 개선하기 위해서는 전송 mode 들의 위상속도를 같게 해야 할 필요가 있으며, 앞으로 이에 관한 방법이 제시된다면 더욱 넓은 주파수범위에서 평탄한 주파수 특성과 좋은 방향성을 갖는 방향성결합기를 설계할 수 있을 것이다.

References

(1) H.J. Carlin and G.I. Zysman, "Linear phase microwave networks," in roc. Symposium on Generalised Networks. New York: Polytechnic Institute of Brooklyn, Apr. 1966, pp. 193—226.

(2) C.P. Womack, "The use of exponential transmission lines in microwave components," IRE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-10, pp. 124—132, Mar. 1962.

(3) R.P. Arnold, W. Bailey, and R. Vaitkus, "Normalized impedence graphs for exponential transmission lines," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-22, pp. 946—965, Nov. 1974.

(4) R.N. Ghose, Microwave Circuit Theory and Analysis. New York. McGraw-Hill. 1963, ch. 12.

(5) C.B. Sharpe, "An equivalence principle for non-uniform transmission line directional couplers," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-15, pp. 398—405, July 1967.

(6) A.K. Sharma and B. Bhat, "Analysis of

coupled non-uniform transmission line two-port networks," Arch. Elek. Ubertragung, vol. 32, pp. 334—337, 1978.

(7) L. S. Napoli and J. J. Hughes, "Characteristics of coupled microstrip lines," RCA Rev. vol. 31, pp. 479—498, Sept. 1970.

(8) S. Yamamoto, T. Azakami, and K. Itakura, "Coupled non-uniform transmission lines and its applications," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-15, pp. 220—231, Apr. 1967.