

論 文

비균질 매질내에서 대칭 및 비대칭구조를 갖는
3선 4포트 스트립선 결합회로의 설계

正會員 陳 年 鋼*

Design of the Symmetrical and Non-symmetrical
Interdigitated Three-Line Four-port Microstrip
Line Couplers in an Inhomogeneous Medium

Youn Kang CHIN,* Regular Member

요 약 현재 실용화 하고 있는 4선 4포트 마이크로 스트립선결합기보다 1회선이 더 적지만 그 특성이 비등하면서 더 간단한 구조를 갖는 대칭 및 비대칭 3선 4포트 결합기의 해석과 설계방법을 제시하였다. 유선율이 2.55이고 10인 유전체에 3, 6 과 10dB용 결합기를 설계하는데 필요한 표와 도표를 구했다.

ABSTRACT Analysis and design procedures for the symmetrical and non-symmetrical interdigitated four-port microstrip couplers consisting of symmetrical three lines is presented. The configuration is simple and a lesser number of bond wires are required as compared to the four-line couplers which are used. Physical dimensions of 3, 6 and 10dB couplers with substrates having typical dielectric constant values of 2.55 and 10 can be found by using the tables and charts.

1. 서 론

초고주파 집적회로 (MIC; Microwave Integrated Circuit)에 적합한 방향성 결합기나 기타 필터등의 설계를 목적으로 복직선로 결합기 (Multiple line coupler)에 관한 연구가 계속되고 있다⁽¹⁻²⁶⁾. 여러 개의 마이크로 스트립선 (Microstrip-line)을 서로 교대로 연결한 깎지긴 방향성 결합기(Interdigitated directional cou-

pler)를 사용하면 결합도를 가장 효율적으로 높일 수 있을 뿐 아니라 주파수특성도 우수하기 때문에 MIC에 매우 적합하다. 이의 중요한 장점은 그 크기가 작고 종전의 2 선로에 의한 결합기보다 도체간의 간격을 비교적 더 넓게 할 수 있다는 점이다.

Lange⁽⁵⁾는 깎지긴 3dB 4선 마이크로 스트립선 결합기를 제시하였으나 전자기이론에 입각한 엄격한 설계자료는 제시하지 못했다. 그후 Waugh와 LaCombe⁽⁶⁾는 다른 형태의 3dB Lange 결합기를 제시하였다. Ou⁽⁷⁾는 우수개의 임의수의 선로로 구성된 결합기를 설계하는 일반적인 식을 유도했다. 기타 Paolino⁽⁸⁾와 Rizzoli등⁽⁹⁾ 외에 많

* 檀國大學校工科學電子工學科
Dept. of Electronic Engineering
Dankook University, Seoul 140, Korea.
論文番號 : 85-35(接受 1985. 8. 27)

은 사람들^(10, 11, 12, 14, 15, 16)이 Lange 결합기에 관한 여러가지 설계방법을 제안했다. 그러나 이들의 대부분의 논문들은 바로 이웃 도선간의 개폐 시턴스만을 고려한 해석에 기초를 둔 것으로 정확한 해석이 될 수 없었다. Shibata 등⁽⁷⁾은 나선형(Spiral) 구조를 갖는 방향성 결합기를 제안했다. 잔⁽⁸⁾은 n 개의 선로로 구성된 결합 전송구조의 임피던스와 어드미턴스를 컴퓨터 프로그램에 의하여 편리하게 구할 수 있는 방법을 제시했다. 본 논문에서는 MIC를 위한 대칭 및 비대칭까지의 3선 4 포트(Port) 구조를 갖는 마이크로 스트리프 결합기에 관한 해석과 설계방법을 제시했다. 이는 그림 1 처럼 도체화를 밑면으로 갖는 유전체위에 3 개의 마이크로 스트리프 선을 놓아 각각 3선 4 포트 결합기이다. 이의 상점을 4 개의 마이크로 스트리프 선을 사용하여 3 dB Lange 결합기보다 1 개의 선로가 적으므로 선간을 연결하는 본드선(Bond wire)의 수도 줄게 되므로 그 구조가 간단하면서도 Lange 결합기와 대등한 특성을 갖는 점이다.

Yamamoto 등⁽¹⁹⁾과 Pavlidis 등⁽²⁰⁾이 3선 결합기

에 관한 정질을 연구했고 Tulaja 등⁽²¹⁾은 알루미늄(Alumina) 유전체위에 3 dB 결합기를 실험적으로 실현했으나 설계방법은 제시하지 못했다. Tripathi 등⁽²²⁾은 이에 관한 해석을 노르말 모우드 정수(Normal mode parameters), 고유벡터 및 모우드 특성임피던스등을 사용하여 정확하게 행렬(Matrix) 형태로 표현했다. 그러나 이를 실험하기 위해서는 노르말 모우드 정수를 구하는 것이다. 본 논문에서는 대칭 2선 마이크로 스트리프 선 결합회로의 모우드 정수를 구하는 Bryant와 Weiss⁽²²⁾의 컴퓨터 프로그램을 복직선로 결합회로에 확장응용하여 모우드 정수와 특성임피던스를 구했다. 산란정수의 계산결과를 살펴 보면 4 포트의 등가임피던스가 대칭인 경우에는 Cristal의 조건⁽²⁰⁾에 의하여 선로의 특성임피던스를 구할 수 있으나 4 포트의 등가임피던스가 비대칭일 경우에는 Cristal의 조건은 선로간의 분리도(Isolation)는 커져 버려 결합조건은 되지 못함을 알 수 있다. 따라서 Chin의 임피던스 재정규화 방법(IRP; Impedance Renormalization Procedure)⁽²³⁾에 의해서 구할 수 있다.

2. 해석과 설계

2.1 해석

각지점 3선 4 포트의 등가임피던스는 다음과 같은 산란행렬(Scattering matrix)에 의하여 각 산란정수를 구하면 그 결합도(coupling)와 수파 손실등을 분석할 수 있다.

$$[S] = [U]^{-1} [Y_n] [U] + [Y_n]^{-1} \quad (2-1)$$

$$= [Z_n]^{-1} [U] + [Z_n] [U]^{-1}$$

여기에서 $[Y_n]$ 과 $[Z_n]$ 는 각각 부하로 정규화한 어드미턴스와 임피던스 매트릭스이고 $[U]$ 는 단위 매트릭스임.

위자가 제시한 바 있는 그림 2와 같은 비대칭 2선 4 포트 결합회로를 위한 산란정수⁽²⁴⁾에 관한 식을 각지점 3선 4 포트에 적용하면 매우 편리하다. 즉, 비대칭 2선 4 포트 결합회로의 산란정수는 다음과 같다;

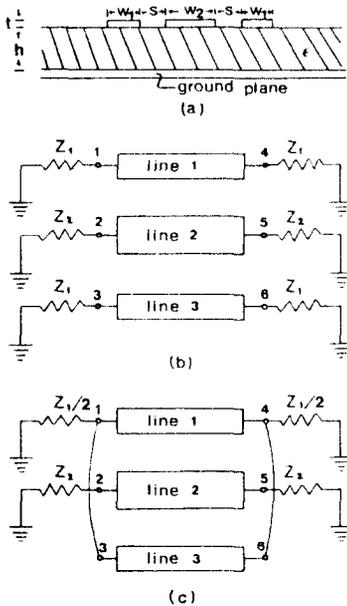


그림 1 (a) 3선 마이크로 스트리프 구조의 도면적 (b) 결합된 3선 6 Port의 equivalent circuit (c) 3선 4 Port의 equivalent circuit
The three-line coupled microstrip structure.

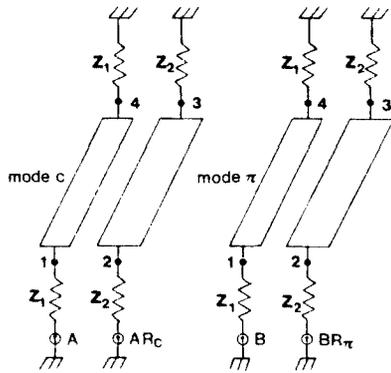


그림 2 산란상수 유도란 위한 설명도.
Sources and terminations used to drive the scattering parameters: (a) total signal input 1 V at port 1, zero at all the other ports. (b) total signal input 1 V at port 2, zero at all the other ports.

$$S_{11} = S_{44} = A\Gamma_c + B\Gamma_\pi$$

$$= \frac{1}{R_c - R_\pi} (R_c\Gamma_\pi - R_\pi\Gamma_c)$$

$$S_{12} = S_{21} = S_{34} = S_{43} = (AR_c\Gamma_c + BR_\pi\Gamma_\pi) \sqrt{\frac{Z_{10}}{Z_{20}}}$$

$$= \sqrt{-R_cR_\pi} \frac{\Gamma_c - \Gamma_\pi}{R_c - R_\pi} \quad (2-2)$$

$$S_{14} = S_{41} = AT_c + BT_\pi$$

$$= \frac{R_cT_\pi - R_\piT_c}{R_c - R_\pi}$$

$$S_{13} = S_{31} = S_{24} = S_{42} = (AR_cT_c + BR_\piT_\pi) \sqrt{\frac{Z_{10}}{Z_{20}}}$$

$$= \sqrt{-R_cR_\pi} \frac{T_c - T_\pi}{R_c - R_\pi}$$

$$S_{22} = S_{33} = AR_c\Gamma_c + BR_\pi\Gamma_\pi$$

$$= \frac{R_c\Gamma_c - R_\pi\Gamma_\pi}{R_c - R_\pi} \quad (2-2)$$

$$S_{23} = S_{32} = AR_cT_c + BR_\piT_\pi$$

$$= \frac{R_cT_c - R_\piT_\pi}{R_c - R_\pi}$$

여기에서

$$A \triangleq \frac{R_\pi}{R_c - R_\pi}, \quad B \triangleq \frac{R_c}{R_c - R_\pi}$$

Γ_c 와 Γ_π 및 T_c 와 T_π 는 각각 mode c와 π 에 대한 반사계수 및 전송계수임.

위의 식들에 $Z_1/Z_2 = -2/R_{vb}R_{vc}$ (여기에서 Z_1 과 Z_2 는 각각 선로 1과 2의 부하) $R_c = R_{vb}$ 와 $R_\pi = R_{vc}$ 를 대입하면 Tripathi^[14]가 구한 결과와 동일하게 된다. 대신인 경우에는 부하 Impedance를 $Z_2 = Z_1/2$ 가 되도록 하면 즉,

$\sqrt{Z_{b1}Z_{c1}}/2 = \sqrt{Z_{b2}Z_{c2}}$ ^[25]이면 중심주파수 ($\beta_a + \beta_b + \beta_c$)1/2 = $\pi/2$ 에서 결합기는 정합(Matching)이 되고 분리도도 최대가 됨을 알 수 있으나 비대칭인 경우에는 Cristal의 조건에 의한 값, 즉 $Z_{10} = Z_1/2 = \sqrt{Z_{b1}Z_{c1}}/2$ 와 $Z_{20} = Z_2 = \sqrt{Z_{b2}Z_{c2}}$ 를 취하면 중심주파수에서 분리도가 최대가 되나 결합기의 정합은 얻을 수 없다.

위에서 Z_x 의 x 는 a, b, c의 3개별 mode를 나타내고 $j = 1, 2, 3$ 는 세 선로를 나타내고 Z_i 의 i 는 각각의 경우의 특성임피던스를 나타낸다. 따라서 최대의 분리도를 유지하면서 정합을 시키기 위해서는 저자가 제시한 임피던스 재정규화방법^[23]을 사용해야 한다.

2.2 설계

3 dB, 6 dB 및 10 dB의 결합도를 갖는 각각 3선 4포트 마이크로 스트립 결합기 (Interdigitated three-line four-port microstrip coupler)는 다음과 같은 절차에 의하여 구하여진다. 즉, 처음에는 사용코지 하는 유전체(예를들면, $\epsilon_r = 10$ 이나 $\epsilon_r = 2.55$)의 높이에 관하여 정규화한 임의의 횡수, 예를 들면 w_1/h , w_2/h 와 s/h 의 값을, 노르만 모우드정수 및 특성임피던스를 구하는 컴퓨터 프로그램(Bryant와 Weiss^[22]의 프로그램을 확장한)에 대입하여 모우드 정수를 구한 다음, 이를 Tripathi^[21]가 제시한 임피던스나 어드미턴스식에 대입하면 임피던스와 어드미턴스 값을 얻는다. 부하 $Z_1/2 = Z_2 = 50\Omega$ 를 위의 값과 함께 식(2-1)에 적용하면서 원하는 결합도(Coupling)를 얻을때까지 반복하면 표 2-1과 같은 결과를 얻는다. 이 표를 살펴보면 결합도는 도선간의 간격(s/h)에 의해서 결정되고 또 대칭구조(symmetrical structure)인 경우에는 R_{vb} 와 R_{vc} 의

표 2-1 대칭 및 비대칭 짝지향 결합기의 설계치
Design Parameters of Symmetrical and Nonsymmetrical Intdigitated Couplers Consisting of Symmetrical Three Lines.

(1) 3 dB Case with $\epsilon_r = 10$.

Dimensions (where $w_1 = w_3$, h is thickness of subs.)			Effective Dielectric Constants			Effective Velocity ($\times 10^8$ m/sec)			Voltage Ratio (where $R_{va} = 0$.)		Mode-line Characteristic Impedance (Ohms) (where $Z_{a1} = Z_{a3}$, $Z_{a2} = 0$, $Z_{b1} = Z_{b3}$, $Z_{c1} = Z_{c3}$)						Absolute Scattering Parameters at Center Frequency (dB) with $Z_1 = Z_2 = 50 \Omega$			
w_1/h	s/h	w_2/h	ϵ_a	ϵ_b	ϵ_c	v_a	v_b	v_c	R_{vb}	R_{vc}	Z_{a1}	Z_{b1}	Z_{b2}	Z_{c1}	Z_{c2}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	
.078	.039	.078	5.5102	6.2999	5.5001	1.2771	1.1944	1.2783	1.0031	-2.1906	63.107	213.737	234.836	31.963	35.118	-31.47	-3.16	-2.96	-19.86	
		.117	5.5114	6.3244	5.5002	1.2770	1.1921	1.2783	1.0037	-1.8523	63.778	219.387	203.936	33.711	31.337	-31.0	-3.03	-3.05	-21.72	
		.156	5.5131	6.3595	5.5002	1.2768	1.1888	1.2783	1.0046	-1.5280	64.558	226.204	173.616	35.916	27.566	-30.63	-2.95	-3.11	-24.34	
		.195	5.5143	6.3821	5.5003	1.2767	1.1867	1.2783	1.0052	-1.3769	64.965	230.025	159.187	37.179	25.730	-29.29	-3.09	-2.95	-28.34	
		.234	5.5160	6.4150	5.5003	1.2765	1.1837	1.2783	1.0062	-1.2058	65.456	235.006	142.566	38.842	23.563	-30.17	-2.95	-3.1	-28.25	
		.273	5.5171	6.4363	5.5004	1.2763	1.1817	1.2783	1.0069	-1.1165	65.722	237.944	133.753	39.827	22.388	-29.98	-2.97	-3.08	-29.32	
		.312	5.5187	6.4675	5.5005	1.2762	1.1788	1.2783	1.0080	-1.0077	66.051	241.910	122.855	41.157	20.907	-29.82	-3.0	-3.03	-29.86	
		.351	5.5198	6.4878	5.5006	1.2760	1.1770	1.2783	1.0087	-.9475	66.234	244.316	116.749	41.963	20.052	-29.55	-3.04	-3.0	-29.5	
		.390	5.5214	6.5177	5.5007	1.2759	1.1743	1.2782	1.0098	-.8709	66.466	247.638	108.886	43.069	18.938	-29.29	-3.09	-2.95	-28.34	
		.429	5.5224	6.5372	5.5008	1.2757	1.1725	1.2782	1.0105	-.8270	66.598	249.691	104.330	43.749	18.280	-29.14	-3.13	-2.92	-27.43	
		.468	5.5239	6.5659	5.5010	1.2756	1.1700	1.2782	1.0117	-.7695	66.767	252.570	98.307	44.694	17.396	-28.9	-3.2	-2.86	-26.13	
		.507	5.5249	6.5847	5.5012	1.2754	1.1683	1.2782	1.0125	-.7357	66.864	254.374	94.737	45.281	16.864	-28.75	-3.24	-2.83	-25.34	
		.546	5.5264	6.6125	5.5014	1.2753	1.1658	1.2782	1.0136	-.6906	66.991	256.931	89.930	46.104	16.137	-28.54	-3.31	-2.77	-24.25	

(Cont.)

(2) 6 dB case with $c = 10$

w_1/h	s/h	w_2/h	ϵ_a	ϵ_b	ϵ_c	v_a	v_b	v_c	R_{vb}	R_{vc}	Z_{a1}	Z_{b1}	Z_{b2}	Z_{c1}	Z_{c2}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}
.125	.187	.125	5.5772	6.6487	5.5037	1.2695	1.1627	1.2779	1.0289	-1.5771	79.916	161.762	131.246	51.765	42.000	-28.75	-6.17	-1.25	-21.57
		.156	5.5793	6.6699	5.5042	1.2692	1.1608	1.2778	1.0305	-1.4470	80.003	164.130	122.362	52.523	39.157	-28.38	-6.04	-1.28	-22.35
		.187	5.5815	6.6899	5.5048	1.2690	1.1591	1.2778	1.0320	-1.3430	80.009	166.180	115.164	53.241	36.897	-28.13	-5.97	-1.3	-22.99
		.218	5.5836	6.7092	5.5053	1.2687	1.1574	1.2777	1.0335	-1.2570	80.196	167.996	109.125	53.924	35.028	-27.96	-5.92	-1.32	-23.49
		.250	5.5857	6.7279	5.5059	1.2685	1.1558	1.2776	1.0351	-1.1839	80.292	169.634	103.935	54.575	33.438	-27.81	-5.9	-1.33	-23.86
		.312	5.5897	6.7638	5.5072	1.2680	1.1527	1.2775	1.0382	-1.0650	80.471	172.510	95.363	55.789	30.840	-27.58	-5.89	-1.33	-24.19
		.374	5.5936	6.7983	5.5085	1.2676	1.1498	1.2773	1.0412	-.9712	80.629	174.994	88.478	56.901	28.769	-27.43	-5.92	-1.32	-24.12
		.406	5.5955	6.8150	5.5092	1.2674	1.1484	1.2773	1.0428	-.9310	80.701	176.125	85.496	57.423	27.875	-27.35	-5.94	-1.31	-23.97
		.437	5.5973	6.8315	5.5099	1.2672	1.1470	1.2772	1.0443	-.8945	80.767	177.195	82.759	57.925	27.054	-27.29	-5.97	-1.3	-23.78
		.468	5.5991	6.8477	5.5107	1.2670	1.1457	1.2771	1.0458	-.8610	80.829	178.211	80.235	58.408	26.297	-27.23	-6.00	-1.29	-23.56
		.546	5.6025	6.8794	5.5122	1.2666	1.1430	1.2769	1.0488	-.8017	80.941	180.107	75.718	59.320	24.939	-27.13	-6.07	-1.27	-23.04
		.624	5.6073	6.9254	5.5147	1.2660	1.1392	1.2766	1.0532	-.7275	81.080	182.677	69.988	60.571	21.206	-26.97	-6.2	-1.24	-22.23

(3) 10 dB case with $\epsilon_r = 10$

w_1/h	s/h	w_2/h	ϵ_a	ϵ_b	ϵ_c	v_a	v_b	v_c	R_{vb}	R_{vc}	Z_{a1}	Z_{b1}	Z_{b2}	Z_{c1}	Z_{c2}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}
.156	.468	.125	5.7318	6.8363	5.5339	1.2522	1.1466	1.2744	1.0888	-1.3159	87.704	129.052	92.448	67.815	44.580	-25.29	-10.43	-.46	-21.91
		.156	5.7305	6.8228	5.5333	1.2524	1.1477	1.2745	1.0898	-1.3290	88.694	129.675	93.816	68.732	43.726	-26.74	-10.57	-.44	-21.82
		.250	5.7342	6.9113	5.5423	1.2520	1.1404	1.2734	1.0982	-1.0393	88.540	134.913	76.993	70.205	40.065	-26.36	-10.12	-.49	-22.01
		.312	5.7364	6.9474	5.5464	1.2517	1.1374	1.2730	1.1075	-.9509	88.522	136.817	71.714	70.863	37.143	-26.30	-10.06	-.49	-21.91
		.374	5.7388	6.9806	5.5503	1.2515	1.1347	1.2725	1.1067	-.8802	88.520	138.457	67.436	71.478	34.814	-26.27	-10.04	-.5	-21.73
		.468	5.7411	7.0116	5.5542	1.2512	1.1322	1.2721	1.1107	-.8217	88.527	139.906	63.846	72.055	32.882	-26.25	-10.06	-.5	-21.52
		.624	5.7476	7.0962	5.5655	1.2505	1.1254	1.2708	1.1221	-.6913	88.527	143.481	55.649	73.591	28.542	-26.25	-10.22	-.48	-20.88
		.780	5.7516	7.1476	5.5726	1.2501	1.1214	1.2700	1.1294	-.6276	88.607	145.43	51.538	74.479	26.394	-26.27	-10.38	-.47	-20.48
		.936	5.7569	7.2192	5.5829	1.2495	1.1158	1.2688	1.1397	-.5529	88.659	147.931	46.608	75.647	23.834	-26.27	-10.65	-.45	-19.97
		1.092	5.7601	7.2641	5.5894	1.2491	1.1123	1.2681	1.1462	-.5128	88.690	149.391	43.903	76.333	22.433	-26.25	-10.85	-.44	-19.69

크기가 공허 거의 1이 됨을 알 수 있다. 이 표는 초고주파용으로 많이 사용되는 $\epsilon_r = 10$ 인 알루미늄(Alumina)와 $\epsilon_r = 2.55$ 인 테프론(Teflon)에 대한 결합기의 설계자료이다.

이 자료를 도표로 표시하면 그림(3), (4)와 같다. 이 결합기의 길이는 중심주파수에 의해서 결정되며 주파수특성은 $\theta = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} (\sqrt{\epsilon_{ra}} + \sqrt{\epsilon_{rb}} + \sqrt{\epsilon_{rc}}) \ell / 3$ 의 함수로 표시할 수 있다.

이 함수는 그림 5와 같다. 여기에서 a, b, c 는 모드(mode)를 표시하고 ℓ 은 길이이다.

따라서 표 2-1이나 그림 3을 사용하여 Teflon($\epsilon_r = 2.55$) 10dB 약저절 3절 4 포트 마이크로 스트린 결합기를 설계하면 $w_1/h = 0.858$, $w_2/h = 1.716$, $s/h = 0.429$ 이다. 삼단정수의 수와

(Cont.)

(4) 6 dB case with $\epsilon_r = 2.55$

w_1/h	s/h	w_2/h	ϵ_a	ϵ_b	ϵ_c	v_a	v_b	v_c	R_{vb}	R_{vc}	Z_{a1}	Z_{b1}	Z_{b2}	Z_{c1}	Z_{c2}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}
663	.117	.780	1.8276	2.1084	1.7822	2.2176	2.0646	2.2457	1.0581	-1.7476	80.148	165.022	152.568	46.770	43.240	-25.66	-5.59	-1.47	-21.00
		.975	1.8301	2.1173	1.7840	2.2161	2.0603	2.2445	1.0645	-1.5155	80.462	166.944	134.665	49.240	39.719	-25.63	-5.61	-1.45	-22.25
		1.170	1.8333	2.1299	1.7869	2.2142	2.0542	2.2427	1.0737	-1.2625	80.795	169.573	114.925	52.397	35.511	-25.63	-5.71	-1.40	-23.90
		1.365	1.8350	2.1379	1.7888	2.2131	2.0504	2.2415	1.0794	-1.1351	80.956	171.193	104.878	54.205	33.207	-25.65	-5.79	-1.36	-24.72
		1.560	1.8372	2.1492	1.7917	2.2118	2.0450	2.2397	1.0877	-.9847	81.140	173.465	92.894	56.561	30.290	-25.65	-5.94	-1.31	-25.3
		1.755	1.8385	2.1564	1.7936	2.2110	2.0416	2.2385	1.0928	-.9042	81.236	174.889	86.404	57.935	28.623	-25.65	-6.05	-1.27	-25.26
		1.950	1.8400	2.1666	1.7963	2.2101	2.0367	2.2369	1.1002	-.8046	81.353	176.906	78.299	59.754	26.447	-25.63	-6.23	-1.22	-24.72

(5) 10 dB case with $\epsilon_r = 2.55$

w_1/h	s/h	w_2/h	ϵ_a	ϵ_b	ϵ_c	v_a	v_b	v_c	R_{vb}	R_{vc}	Z_{a1}	Z_{b1}	Z_{b2}	Z_{c1}	Z_{c2}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}
.858	.429	.429	1.8792	2.1260	1.7946	2.1870	2.0561	2.2379	1.0966	-2.2472	86.946	125.363	154.470	59.689	73.548	-24.90	-10.6	-.46	-20.34
		.858	1.8853	2.1527	1.8071	2.1834	2.0433	2.2302	1.1233	-1.4085	87.337	130.823	103.488	65.295	51.652	-24.24	-9.93	-.51	-22.63
		1.287	1.8883	2.1675	1.8144	2.1817	2.0363	2.2257	1.1390	-1.1431	87.546	133.196	86.708	68.001	44.267	-24.19	-9.95	-.50	-23.54
		1.716	1.8917	2.1873	1.8239	2.1797	2.0271	2.2199	1.1604	-.8930	87.777	135.996	70.458	71.100	36.836	-24.19	-10.20	-.47	-23.84
		2.145	1.8934	2.1991	1.8294	2.1787	2.0216	2.2165	1.1734	-.7788	87.892	137.563	62.855	72.717	33.226	-24.18	-10.44	-.45	-23.53
		2.574	1.8954	2.2154	1.8356	2.1776	2.0142	2.2122	1.1913	-.6524	88.024	139.623	54.257	74.674	29.018	-24.12	-10.85	-.42	-22.90
		3.003	1.8964	2.2253	1.8407	2.1770	2.0097	2.2097	1.2022	-.5891	88.094	140.851	49.789	75.742	26.774	-24.05	-11.14	-.39	-22.45
		3.432	1.8977	2.2391	1.8462	2.1762	2.0035	2.2064	1.2173	-.5115	88.177	142.524	44.374	77.082	23.989	-23.93	-11.60	-.36	-21.88

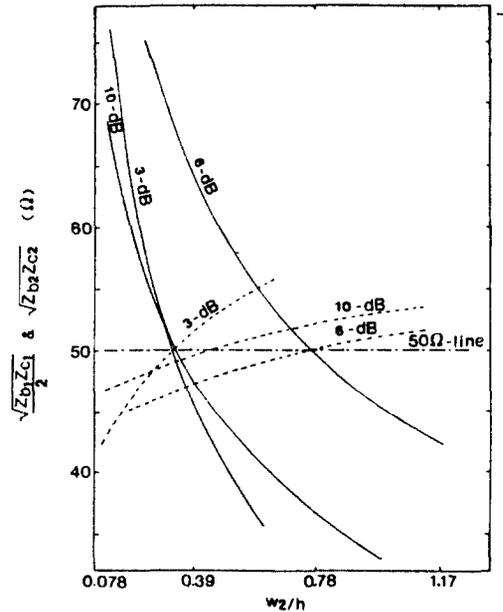


그림 3 알루미늄까지진 3선 결합기 설계
Design curves for alumina ($\epsilon_r=10$) interdigitated three-line couplers (where, $w_1/h = 0.078$ and $s/h = 0.039$ for 3-dB, $w_1/h = 0.125$ and $s/h = 0.187$ for 6-dB, $w_1/h = 0.156$ and $s/h = 0.468$ for 10-dB).
..... $Z_{10} = \sqrt{Z_{b1} Z_{c1}} / 2$
—— $Z_{10} = \sqrt{Z_{b2} Z_{c1}}$

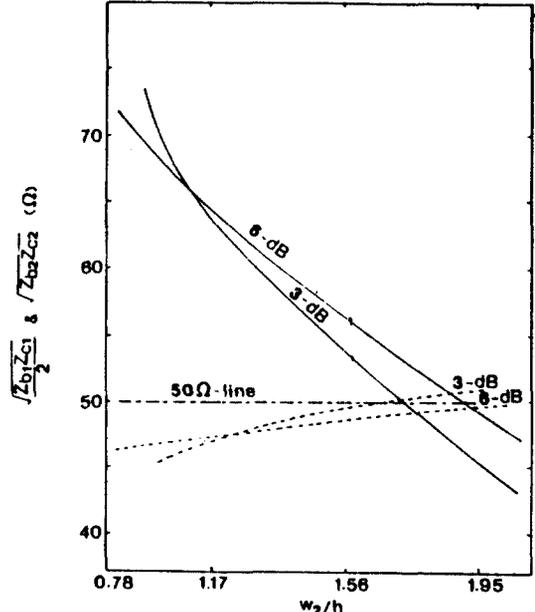


그림 4 테프론용 3선 결합기 설계
Design curves for teflon ($\epsilon_r=2.55$) interdigitated three-line couplers (where, $w_1/h = 0.663$ and $s/h = 0.117$ for 6-dB, $w_1/h = 0.858$ and $s/h = 0.429$ for 10-dB).
..... $Z_{10} = \sqrt{Z_{b1} Z_{c1}} / 2$
—— $Z_{10} = \sqrt{Z_{b2} Z_{c1}}$

수 특성은 그림 5와 같다.

같은 방법으로 원하는 결합도를 갖는 비 대칭

까지진 3선 4 포트 마이크로 스트립 결합기 (또는 임피던스 정합회로)를 설계할 수 있다. 그러나 산란정수를 살펴보면 비대칭인 경우는 대칭

인 경우와 달리 Cristal 조건인 $Z_1 = \sqrt{Z_{b1} Z_{c1}} / 2$ 와 $Z_2 = \sqrt{Z_{b2} Z_{c2}}$ 이 임피던스 정합 ($S_{ij} = 0$) 을 만족할 수 없으나 최대분리(Maximum Isolation; $S_{14} = 0$) 의 조건은 만족할 수 있음을 다음 예제를 통하여 알 수 있다. 이 경우의 임피던스 정합을 저자가 제시한 바 있는 다음과 같은 상관정수⁽²³⁾의 식을 사용하여 $S_{ij} = 0$ 의 조건을 만족하는 Z_1 과 Z_2 의 값을, 식(2-3)과 식(2-4)를 비교해 몇 번 반복하면 Z_1 과 Z_2 는 어느 일정한 값으로 수렴함으로 최적의 값을 얻는다.

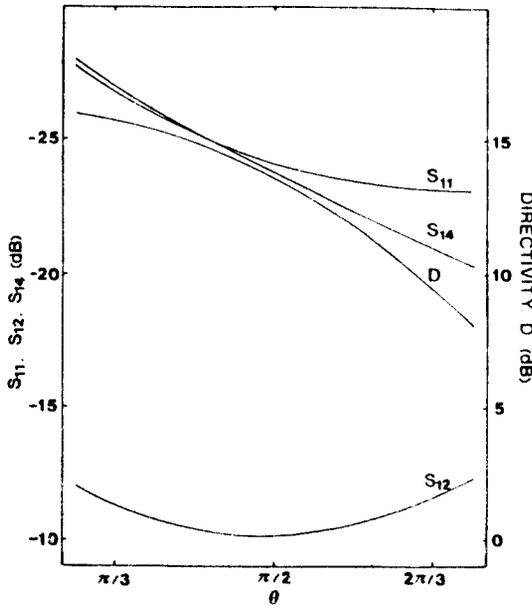


그림 5 결합도, 반사계수, 분리도 및 방향성
Coupling |S₁₂|, reflection coefficient |S₁₁|, isolation |S₁₄| and directivity D vs normalized frequency θ for nominal 10-dB coupling with $\epsilon_r = 2.55$ (where $w_1/h = 0.858$, $w_2/h = 1.716$, $s/h = 0.429$), when terminated in $Z_1 = Z_2 = 50$ ohms.

$$S'_{11} = S'_{44} = [(Z_{d1} + Z_{s1} S_{11})(Z_{s1} + Z_{d1} S_{11}) - Z_{s1} Z_{d1} S_{11}^2] / \Delta$$

$$S'_{14} = S'_{41} = [Z_{s1} S_{14} (Z_{s1} + Z_{d1} S_{11}) - Z_{d1} S_{14} (Z_{d1} + Z_{s1} S_{11})] / \Delta$$

$$S'_{12} = S'_{21} = S'_{34} = S'_{43} = [2 S_{12} (Z_{s1} + Z_{d1} S_{11}) - 2 Z_{d1} S_{14} S_{13}] / \Delta$$

$$S'_{13} = S'_{31} = S'_{24} = S'_{42} = [2 S_{13} (Z_{s1} + Z_{d1} S_{11}) - 2 Z_{d1} S_{14} S_{14}] / \Delta$$

$$= [2 S_{13} (Z_{s1} + Z_{d1} S_{11}) - 2 Z_{d1} S_{14} S_{14}] / \Delta$$

$$S'_{22} = S'_{33} = S_{22} - [Z_{d1} (Z_{s1} + Z_{d1} S_{11}) (S_{12}^2 + S_{13}^2) - 2 Z_{d1}^2 S_{12} S_{13} S_{14}] / \Delta \quad (2-3)$$

$$S'_{23} = S'_{32} = S_{23} - [2 Z_{d1} (Z_{s1} + Z_{d1} S_{11}) S_{12} S_{13} - Z_{d1}^2 S_{14} (S_{12}^2 + S_{13}^2)] / \Delta$$

여기에서 $\Delta = (Z_{s1} + Z_{d1} S_{11})^2 - Z_{d1} S_{14}^2$

$$S'_{11} = S'_{44} = S_{11} - Z_{d2} [(Z_{s2} + Z_{d2} S_{22}) (S_{12}^2 + S_{13}^2) - 2 Z_{d2} S_{12} S_{13} S_{23}] / \Delta$$

$$S'_{12} = S'_{21} = S'_{34} = S'_{43} = Z_{s2} S_{12} / 2 + Z_{d2} [Z_{s2}^2 (S_{12} S_{22} + S_{13} S_{23}) + Z_{d2}^2 (S_{12} S_{22} - S_{13} S_{23}) + Z_{s2} Z_{d2} S_{12} (S_{22}^2 - S_{23}^2 + 1)] / (2\Delta)$$

$$S'_{13} = S'_{31} = S'_{24} = S'_{42} = Z_{s2} S_{13} / 2 - Z_{d2} [Z_{s2}^2 (S_{12} S_{23} + S_{13} S_{22}) + Z_{d2}^2 (S_{12} S_{23} - S_{13} S_{22}) + Z_{s2} Z_{d2} S_{13} (S_{22}^2 - S_{23}^2 + 1)] / (2\Delta) \quad (2-4)$$

$$S'_{14} = S'_{41} = S_{14} - Z_{d2} [2 S_{13} S_{12} (Z_{s2} + Z_{d2} S_{22}) - Z_{d2} S_{23} (S_{12}^2 - S_{13}^2)] / \Delta$$

$$S'_{22} = S'_{33} = [(Z_{d2} + Z_{s2} S_{22})(Z_{s2} + Z_{d2} S_{22}) - Z_{s2} Z_{d2} S_{22}^2] / \Delta$$

$$S'_{23} = S'_{32} = [Z_{s2} S_{23} (Z_{s2} + Z_{d2} S_{22}) - Z_{d2} S_{23} (Z_{d2} + Z_{s2} S_{22})] / \Delta$$

여기에서 $\Delta = (Z_{s2} + Z_{d2} S_{22})^2 - (Z_{d2} S_{23})^2$

$$Z_{si} \triangleq \sqrt{\frac{Z_{i0}}{Z_i}} + \sqrt{\frac{Z_i}{Z_{i0}}}$$

$$Z_{di} \triangleq \sqrt{\frac{Z_{i0}}{Z_i}} - \sqrt{\frac{Z_i}{Z_{i0}}}$$

예제 : $\epsilon_r = 10$ 인 알루미늄(Alumina)의 유선체인 경우, $w_1/h = w_3/h = 0.078$, $w_2/h = 0.117$, $s/h = 0.039$ (그림 1 참조) 이면 표 2-1에 의해 식(2) TEM 모드별 모우트 상수(Quasi-TEM normal parameter)를 얻을 수 있다. 이 값들을

식(2-2)에 대입하면 다음과 같은 3dB비대칭 까지인 3선 4 포트 결합기의 산란정수를 구할 수 있다. 여기에서 Z_1/Z_2 는 $-2/R_{vb} R_{vc}$ ($R_c=R_{vb}$ 이고 $R_\pi=R_{vc}$) 이고 $Z_1\sqrt{Z_{b1}Z_{c1}}/2=43\Omega$ 과 $Z_2=\sqrt{Z_{b2}Z_{c2}}=79.94\Omega$ 이다. 이 값들을 초기값으로 사용하면 최대분리 조건을 만족하므로 매우 편리함을 알 수 있다. 이 값에 대한 산란정수는 다음 표 1 과 같으며 저자의 IRP방법에 의하여 구한 최적부하의 값, $Z_1=54\Omega$ 과 $Z_2=65.7\Omega$ 에 대한 산란정수의 값은 표 2 와 같다.

위의 표를 비교하면 결합기의 성합이 매우 크게 향상됨을 알 수 있으며 이를 정규화한 주파수의 함수로 도시하면 그림 6 과 같다.

표 1

$ S_{11} $	$ S_{12} $	$ S_{14} $	$ S_{13} $	$ S_{22} $	$ S_{23} $
.2190	.6994	.0245	.6797	.1473	.6872

표 2

$ S_{11} $	$ S_{12} $	$ S_{14} $	$ S_{13} $	$ S_{22} $	$ S_{23} $
.0272	.7165	.0277	.6965	.0324	.6963

4. 실험

앞절에서 설명한 이론적인 설계치를 실증하고자 높이 $h=1.524\text{mm}$ 인 테프론(Teflon, $\epsilon_r=2.55$)을 사용하여 3선 4 포트 마이크로 스트립 방향성 결합기를 설계했다. 실험의 편의를 위하여 50Ω 의 부하를 갖는 10dB대칭형 결합기를 설계의 예로 삼았다. 그 설계치는 표 2-1에 의하여 구하면 다음과 같다.

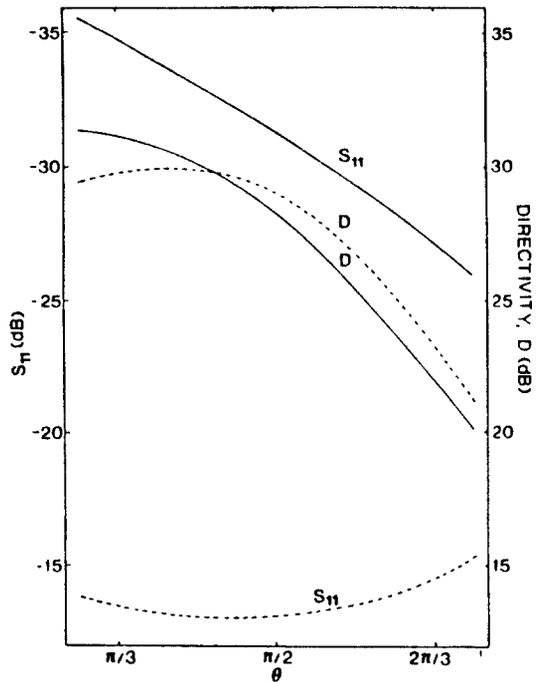
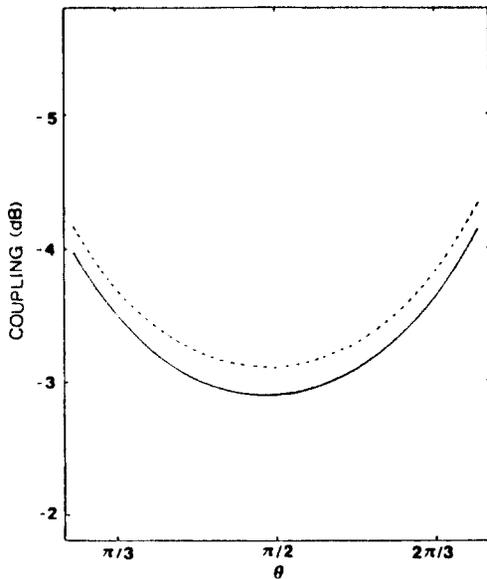


그림 6 (a) 비대칭 까지인 결합기의 결합도
Coupling $|S_{12}|$ vs normalized frequency θ for the non-symmetrical interdigitated three-line structure with $\epsilon_r=10$.
..... Characteristic terminations, $Z_{10}=43$ ohms and $Z_{20}=79.94$ ohms.
..... Optimized terminations, $Z_1=54$ ohms and $Z_2=65.7$ ohms.

(b) 비대칭 까지인 결합기의 반사계수와 방향성
Reflection coefficient $|S_{11}|$ and directivity D vs normalized frequency θ for the non-symmetrical interdigitated three-line structure with $\epsilon_r=10$.
..... Characteristic terminations, $Z_{10}=43$ ohms and $Z_{20}=79.94$ ohms.
..... Optimized terminations, $Z_1=54$ ohms and $Z_2=65.7$ ohms.

$$w_1 = w_3 = (0.858)(1.524\text{mm}) = 1.3076\text{mm}$$

$$s = (0.429)(1.524\text{mm}) = 0.6538\text{mm}$$

결합에 직접관계되는 길이 l ($=\lambda_g/4$) 을 중심주파수 $f_0 = 4\text{GHz}$ 에 맞추도록 계산하면 다음과 같다 (그림 7 참조).

$$l = \frac{3 \times 10^{11}}{4 f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} = 13.37(\text{mm})$$

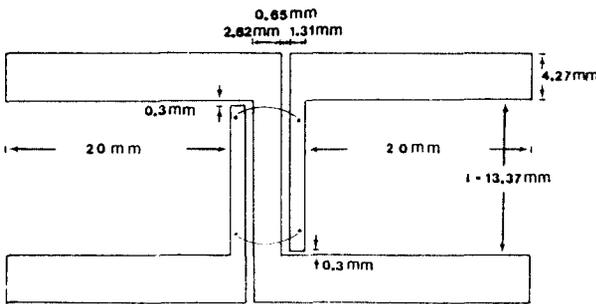


그림 7 도체판을 갖는 Teflon ($\epsilon_r=2.55$) 위에 설계된 10-dB 대칭형 방향성 결합기의 평면도
The plane section of 10-dB symmetrical coupler designed on Teflon ($\epsilon_r=2.55$) with the copper ground.

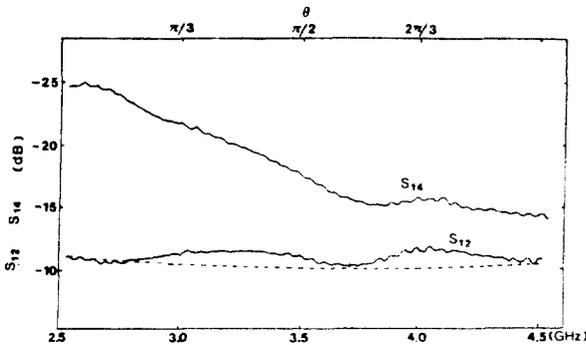


그림 8 결합도 ($|S_{12}|$)와 분리도 ($|S_{14}|$)의 이론치와 이론치 (실선은 실험치이며 점선은 이론치임).
The theoretical and measured values of coupling ($|S_{12}|$) and isolation ($|S_{14}|$).

여기에서 $\epsilon_{eff} = (\epsilon_a + \epsilon_b + \epsilon_c) / 3$ (표 2-1 참고) 결합도 ($|S_{12}|$)와 분리도 ($|S_{14}|$)에 관한 이론적 계산치와 실험적인 결과는 그림 8과 같다. 이론과 실험이 잘 일치됨을 알 수 있다. 그러나 결합도의 실험치에 리플(ripple)이 생기고 분리도가 이론치보다 -5dB 정도의 차이가 생기는 것은 부식(Etching)에 의한 설계치의 오차와 불연 수열 및 두 마이크로 스트리프전선을 연결하는 본딩선(Bonding wire)에 의한 처리 기술의 미숙함에

그 원인이 있다고 사료된다. 특히 본딩선에 의한 리액턴스(Reactance)의 영향은 이론적 설계에서는 무시했기 때문에 이에 관한 연구는 또하나의 좋은 연구분야가 될 것으로 생각한다. 마이크로파와 길이 사용주파수가 높은 경우에 이와 같은 현상을 정확히 해석한다는 것은 매우 어려운 일이다.

5. 결 론

세계의 마이크로 스트리프전선으로 이루어진 대칭 및 비대칭 4포트 방향성 결합기(Symmetrical and non-symmetrical interdigitated four-port directional couplers)에 관한 해석과 설계에 관하여 소개했다.

조그슈파에서 많이 사용하는 유전율이 2.55인 테플론과 유전율이 10인 아루미나이트 경우에 대한 3, 6 및 10dB 결합기를 설계하는데 필요한 자료를 표와 도표로 표시했다. 또 최대 분리도를 유지하면서 최적 임피던스 적합치를 구하는 방법을 제시했다.

이러한 자료는 마이크로파 식각회로(MIC)를 설계하고 연구하는 공학도와 연구원에게 유익하리라 믿는다.

본 논문은 한국과학재단의 연구비에 의하여 행하여진 논문입니다.

참 고 문 헌

- (1) Tripathi, V. K., "Equivalent circuits and characteristics of inhomogeneous nonsymmetrical coupled-line two-port circuits," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-25, pp. 140-142; February 1977.
- (2) LaCombe, D. and Cohen, J., "Octave-band microstrip DC blocks," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-20, pp. 555-55; August 1972.
- (3) Rizzoli, V., "Analysis and design of microstrip DC block," Microwave Jour., Vol. 20, pp. 109-110; June 1977.
- (4) Kajfez, et al., "Asymmetric microstrip DC block with rippled response," IEEE, MTT S Intl Microwave Symp. Digest, pp. 301-303; 1981.
- (5) Lange, J., "Interdigitated stripline quadrature hybrid."

- IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-17, pp. 1150-1151; December 1969.
- (6) Waugh, R. and Lacombe, D., "Unfolding the Lange coupler," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-20, pp. 777-779; November 1972.
 - (7) Ou, W.P., "Design equation for an interdigitated directional coupler," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-23, pp. 253-255; February 1975.
 - (8) Paolino, D.D., "Design more accurate interdigitated couplers," Microwaves, pp. 34-38; May 1976.
 - (9) Rizzoli, V. and Lipparini, A., "The design interdigitated couplers for MIC applications," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-26, pp. 7-15; January 1978.
 - (10) Rizzoli, V., "Stripline interdigitated couplers; analysis and design considerations," Electronics Letters, Vol. 11, pp. 392-393; August 1975.
 - (11) Malherbe, J.A.G., "Interdigital directional couplers with an odd-or even-number of lines and unequal characteristic impedances," Electronics Letters, Vol. 12, pp. 464-465; September 1976.
 - (12) Hewitt, S.J. and Pengelly, R.S., "Design data for interdigital directional couplers," Electronics Letters, Vol. 12, pp. 86-87; February 1976.
 - (13) Tulaja, V., Schiek, B. and Kohler, J., "An interdigitated 3-dB coupler with three strips," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-26, pp. 643-645; September 1978.
 - (14) Presser, A., "Interdigitated microstrip coupler design," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-26, No. 10, pp. 801-805, October 1978.
 - (15) Tajima, Y. and Kamihashi, S., "Multiconductor couplers," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-26, pp. 795-801; October 1978.
 - (16) Kajfez, D., Paunovic, Z. and Pavlin, S., "Simplified design of Lange coupler," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-26, No. 10, pp. 806-808; October 1978.
 - (17) Shibata, K., Hatori, K., Tokumitsu, Y. and Komizo, H., "Microstrip spiral directional coupler," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-29, pp. 680-689, July 1981.
 - (18) 진년강, "일반화한 n선로 결합전송구조의 회로망 합성," 대한전자공학회지, 제22권, 제3호, pp. 281-287; 1985년 5월.
 - (19) Yamamoto, S., Azakami, T., and Itakura, K., "Coupled strip transmission line with three center conductors," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-14, pp. 446-461; October 1966.
 - (20) Pavlidis, D. and Hartnagel, H.L., "The Design and performance of three-line microstrip couplers," IEEE Trans. Microwave Theory and techniques, Vol. MTT-24, pp. 631-640; October 1976.
 - (21) Tripathi, V.K., "On the analysis of symmetrical three-line microstrip circuits," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-25, pp. 726-729; September 1977.
 - (22) Bryant, T.G. and Weiss, J.A., "MSTRIP (Parameters of microstrip)," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-19, pp. 418-419; April 1971.
 - (23) Chin, Y.K. and Tripathi, V.K., "Analysis of the general nonsymmetrical directional coupler with arbitrary terminations," IEEE Proc., Vol. 129, Pt. H, No. 6, pp. 360-362, December 1982.
 - (24) 진년강, "비대칭 방향성 결합기의 임피던스 정합방법," 대한전자공학회지, Vol. 33, No. 10, pp. 593-598; 1984년 10월.
 - (25) Tripathi, V.K., "The scattering parameters and directional coupler analysis of characteristically terminated three-line structures in an inhomogeneous medium," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-29, pp. 22-26; January 1981.
 - (26) Tripathi, V.K., Chin, Y.K., and Lee, H., "Interdigital multiple coupled microstrip DC blocks", 12th European Microwave Conference, September 1982, in Helsinki, Finland.
 - (27) Levy, R., "Transmission-line directional couplers for very broad band operation," Proc. Inst. Elec. Eng., Vol. 112, pp. 469-476; March 1965.
 - (28) Tajima, Y. and Kamihashi, S., "Multiconductor couplers," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-26, pp. 795-801; October 1978.
 - (29) Collier, R.J. and El-Deeb, N.A., "On the use of a microstrip three-line system as a six-port reflectometer," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-27, pp. 847-853; October 1979.
 - (30) Cristal, E.G., "Coupled-transmission-line directional couplers with coupled lines of unequal characteristic impedance," IEEE Trans. microwave Theory and techniques, Vol. MTT-14, pp. 337-346; July 1966.



陳年綱 (Youn Kang CHIN) 正會員
 1934年3月11日生
 韓國航空大學通信工學科卒業
 美國 Oregon 州立大學 (工學碩士)
 美國 Oregon 州立大學 (工學博士)
 韓國航空大學通信·電子工學科教授
 英國航空電子研究所 研修
 美國 Cubic 通信電子會社 (研究員)
 現在: 檀國大學校電子工學科教授
 韓國通信學會會長