

진화 알고리즘을 이용한 고 지향성을 갖는
마이크로스트립 방향성 결합기의 최적설계

채수정¹, 임창환¹, 정현교¹, 김형석², 박준석², 이정해³
¹서울대학교, ²순천향대학교, ³홍익대학교

Optimization of A Microstrip Directional Coupler
with High Performance Using Evolution Strategy

Soo-Jeong Chae¹, Chang-Hwan Im¹, Hyun-Kyo Jung¹, Hyeong-Seok Park², Jun-Seok Park², Jeong-Hae Lee³
¹Seoul National University, ²Soonchunhyang University, ³Hongik University

Abstract -본 논문에서는 마이크로스트립 방향성 결합기의 지향성을 향상시키기 위한 최적설계를 수행하였다. 제안된 설계는 기존의 지향성을 향상시키기 위한 다른 시도들과는 달리 하우징 구조를 설계함으로써 비교적 제작하기가 쉬운 장점이 있다. 최적화를 위해서 결정론적 알고리즘과 결합된 (1+1)진화 알고리즘을 적용하였으며, 최적화결과 보다 향상된 방향성 결합기의 특성을 얻을 수 있었다. Ansoft-HFSS를 이용하여 해석결과와 타당성을 검증하였다.

에서의 Full wave 해석에 의해 검증되었으며, 그 결과 기존의 다른 구조를 가지는 방향성 결합기보다 지향성이 탁월히 향상되었음을 확인할 수 있었다.

2. 해석모델과 문제정의

그림 1은 여러 가지 형태의 마이크로스트립 방향성 결합기의 단면구조를 보여주고 있다. 그러나 단지 유전체 기판의 구조를 개선함으로써 얻을 수 있는 지향성의 향상은 한계가 있음에 다양한 시뮬레이션과 최적화 기법을 통해 밝혀졌다[5]. 그림 1에서의 여러 단면구조 중 리지(Ridge)타입II는 다른 구조(최대 5~8dB)보다 약간 높은 지향성(약 10dB)을 가지고 있으므로 본 논문에서는 설계할 모델의 기본적인 구조로 리지 타입II를 설정하였다. 본 논문에서는 결합기의 지향성을 향상시키기 위해 리지 타입II 구조 위에 홈이파인 하우징 구조를 도입하였다.

1. 서 론

마이크로스트립 방향성 결합기는 다른 회로들과 결합이 용이하고 비교적 제작이 쉬우므로 다양한 초고주파 응용분야에 널리 사용되고 있다. 모든 병렬선로 결합기는 각각 다른 특성 임피던스를 가지는 기모드와 우모드를 가지고 있다. TEM 결합기는 각각의 모드에 대해서 같은 위상속도(Phase velocity)를 가지지만, 마이크로스트립과 같은 Quasi-TEM 결합기는 각각의 모드에 대해 다른 위상속도를 가지게 된다. 특히 마이크로스트립 방향성 결합기는 비균질한 유전체 구조의 특성에 의해 낮은 지향성(Directivity)을 가지게 된다. 또한 방향성 결합기의 지향성은 결합도(Coupling)가 낮아지거나 유전체의 유전율이 증가되면 더욱 나빠지게 된다[2]. 이점이 바로 마이크로스트립보다 훨씬 제작이 어렵고 비용이 많이 드는데도 불구하고 스트립라인 구조를 사용하는 이유이다.

그림 2는 이 논문에서 제안한 제시한 구조의 단면을 보여주고 있다. 이 그림에서 점선 AA'은 우모드나 기모드나에 따라 PMC(perfect magnetic condition) 또는 PEC(perfect electric condition)이 적용된다. 또한 양쪽구조가 대칭이므로 유한요소해석을 이용하여 절반해석이 가능하며, 그때의 점선 AA'는 각각의 모드에 따라 Dirichlet 또는 Neumann 경계조건으로 처리되어진다.

방향성을 향상시키기 위한 노력으로 re-entrant mode 구조가 시도되었다[3],[4]. 하지만 이 구조는 비록 지향성의 향상은 가져왔으나 추가적인 다른 문제점이 발생되었다. 또한 마이크로스트립 리지(Ridge)구조를 이용하는 방법들도 시도되었다[5],[6]. 그러나 이 방법 또한 제작비용이 많이 드는 도전층을 추가시키지 않으면 지향성이 충분히 향상되지 않는다[5].

마이크로스트립 유효 유전율은 각각의 모드에 따라 식 (1),(2)와 같이 계산되어진다.

$$\epsilon_{eff} = \frac{C_e}{C_{e1}} \quad (1)$$

$$\epsilon_{effo} = \frac{C_o}{C_{o1}} \quad (2)$$

여기서 C_e, C_o 는 우모드와 기모드에서의 정전용량(Capacitance)이며 C_{e1}, C_{o1} 은 공기 층에서의 정전용량을 나타낸다.

본 논문에서는 홈이 파인 하우징 구조(Grooved housing structure)로 제작된 마이크로스트립 방향성 결합기를 2D 유한요소해석을 통한 최적화 알고리즘을 이용하여 설계하였다. 즉, 최적화된 하우징 구조가 마이크로스트립 구조 위에 붙어있음으로써 지향성이 탁월히 향상될 수 있음을 보여줄 것이다. 또한 본 논문에서는 제안된 모델의 치수를 구하기 위해서 결정론적 알고리즘과 결합된 (1+1)진화 알고리즘이 이용되었다[7],[8]. 이 과정에서 다루어야 할 최적화 문제는 결합도 계수(Coupling factor)와 매칭 임피던스를 각각 20dB과 50[Ω]으로 유지하면서 우 모드와 기 모드 위상속도의 차이를 줄이는 다중목적(Multi-Objective)문제이어서 매우 복잡하므로, 이에 적합한 효과적인 방법을 제시하였다. 또한 각각의 모드에 대한 위상속도와 특성 임피던스를 구하기 위해 2D 유한요소해석(FEA)을 사용하였다.

방향성 결합기의 각각의 모드에 대한 커패시턴스를 계산하기 위해서는 먼저 유한 요소법을 이용하여 결합기 내에 저장된 에너지를 먼저 계산해야 한다[9],[10]. 매질에 상관없이 결합기 내에 저장된 에너지는 다음 식과 같다.

$$W = \frac{1}{2} \int \epsilon_o \epsilon_r \nabla u \cdot \nabla u \, dS \quad (3)$$

여기서 ϵ_o 는 공기 층에서의 유전율이며, ϵ_r 는 비유전율. 그리고 u 는 전위(Electrical scalar potential)이다. 에너지를 구한 후 정전용량은 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$C = \frac{2W}{(\Delta u)^2} \quad (4)$$

여기서 Δu 는 두 도체사이의 전위차(Potential difference)를 의미한다.

최적화된 결과는 Ansoft-HFSS를 이용한 850MHz

또한 우 모드와 기 모드의 특성임피던스 Z_{0e} , Z_{0o} 는 다음 식과 같이 계산되어 질 수 있다.

$$Z_{0e} = (v_0 \sqrt{C_e C_{e1}})^{-1} = \frac{\sqrt{\epsilon_{effe}}}{v_0 C_e} \quad (5)$$

$$Z_{0o} = (v_0 \sqrt{C_o C_{o1}})^{-1} = \frac{\sqrt{\epsilon_{effo}}}{v_0 C_o} \quad (6)$$

여기서 v_0 은 공기 중에서의 위상속도이다.

식(5), (6)으로부터 각각 결합도 계수 k 와 특성임피던스 Z_0 값은 다음 식과 같이 계산되어 질 수 있다.

$$k = \frac{Z_{0e} - Z_{0o}}{Z_{0e} + Z_{0o}} \quad (7)$$

$$Z_{0e} Z_{0o} = Z_0^2 \quad (8)$$

본 논문의 주요 관심은 특성 임피던스 Z_0 과 결합도 계수 K 의 값을 유지하면서 결합기의 지향성을 향상시키는 데 있다. 그러므로 최적화된 결과는 다음 세 가지 조건을 만족해야 한다.

$$\epsilon_{effe} = \epsilon_{effo} \quad (9)$$

$$K = -20 \log k = \text{Const.} \quad (10)$$

$$Z_0 = \sqrt{Z_{0e} Z_{0o}} = 50 \Omega \quad (11)$$



그림 1. 다양한 방향성 결합기 구조 (a) 일반적 구조 (b) Ridge I (c) Ridge II (d) 홈이파인 구조

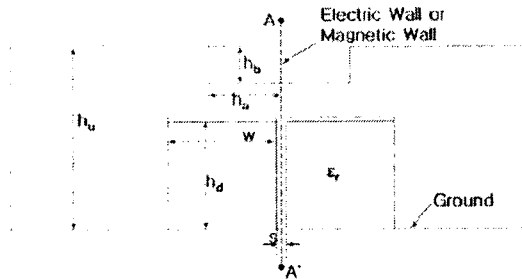


그림 2. 홈이 파인 하우징 구조를 갖는 마이크로스트립 방향성 결합기의 단면모습

3. 최적화 방법

본 논문에서의 최적화 문제는 다목적적(Multi-objective) 문제이므로 우리는 다음과 같이 목적함수를 정의하였다.

$$F_1 = a_1 |\epsilon_{effo} - \epsilon_{effe}| + a_2 |Z_0 - 50| + a_3 |K - K_0| \quad (12)$$

여기서 a_1 , a_2 , a_3 는 적당한 가중치계수(Weighting factor)이며 K_0 은 결합도 계수이다. 여러 번의 시뮬레이션을 통하여 식(12)의 마지막 항은 다른 항들에 비해 설계변수에 매우 민감한 것을 알 수 있었으며, 그 값을 일정하게 유지한다는 것은 어려운 일임을 알았다. 그래서 본 논문에서는 마지막 항을 목적함수에서 제거하고 제약조건으로 사용하였다. 이로 인해 목적함수는 다음과 같이 줄어들었다.

$$F_2 = a_1 |\epsilon_{effo} - \epsilon_{effe}| + a_2 |Z_0 - 50|$$

$$\text{with } K_{0m} < K < K_{0M} \quad (13)$$

여기서 K_{0m} , K_{0M} 은 각각 결합도 계수의 상한 값과 하한 값을 나타낸다. 또한 이 제약조건을 만족하지 못하는 목적함수는 0으로 놓았으며, 가중치 계수 a_1, a_2 는 각각 100과 1로 정하였다. 시뮬레이션 결과 결합도 계수를 목적함수에서 뺀 후 수렴특성이 훨씬 향상되었다. 그러나 K 의 값이 늘어남에 따라 우 모드와 기 모드의 유효 유전율의 차이가 줄어들기 때문에 최적값이 K_{0M} 근처로 수렴하려는 문제점이 생기게 되었다. 그러므로 진화 알고리즘을 이용한 최적화 절차 후에 더욱 정확한 최적 결과를 얻기 위해 결정론적 알고리즘이 사용되었다.

4. 최적화 결과

최적화를 위해서 5개의 설계변수가 사용되었다. 각각은 유전체 기판의 너비(w)와 높이(h_u), 두 개의 Ridge 구조의 거리(s), 홈이 파인 하우징 구조의 치수(h_a, h_b)이며, 이는 그림 2에 명시되어 있다. 하우징의 높이(h_u)는 $(1.7 \times h_d)$ 로 고정시켰으며 비유전율은 2.2이다.

표 1은 설계변수들의 변화범위이며, 표 2는 최적화 결과를 보여주고 있다. 최적화 결과 만족스러운 특성을 얻을 수 있었다.

표 1. 설계변수의 범위

Variable	w (mm)	h_u (mm)	s (mm)	h_a (mm)	h_b (mm)
Min.	0.5	0.8	0.1	0.5	0.1
Max.	2	1.2	0.4	1.2	0.5

표 2. 최적화 결과

parameters	Values
w (mm)	1.05
h_u (mm)	0.915
s (mm)	0.242
h_a (mm)	1.07
h_b (mm)	0.312
ϵ_{effo}	1.238587
ϵ_{effe}	1.238580
$\epsilon_{effe} - \epsilon_{effo}$	-7e-6
Z_0 (Ω)	49.974
C (dB)	19.5

그림 3은 최적 결과 근처에서의 홈 깊이 h_b 가 유효 유전율에 미치는 영향을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 유효 유전율의 감쇄 비율이 각각 틀리므로 서로 매칭되는 점을 찾을 수 있으며, 우 모드 유전율이 h_b 에 더 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 또한 결합기의 지향성은 홈 깊이 h_b 에 민감하므로 하우징을 잘 제작하는 것이 얼마나 중요한지를 알 수 있다.

그림 4는 중심주파수 850MHz에서의 Full wave 시뮬레이션 결과이다. 이 그림에서 보듯이 계산되어진 지향성은 30(dB)이 넘는 것을 알 수 있다.

표 3에서는 앞에서 언급한 방향성 결합기와 하우징 없이 최적화된 결합기와 지향성이 비교되어 있다. 이 결과로부터 본 논문에서 제안된 구조가 방향성 결합기의

지향성을 탁월하게 향상시킨다고 결론지을 수 있다.

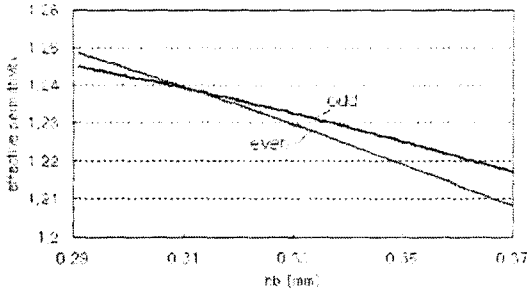


그림 3. 하우징 구조의 홈깊이 h_b 가 유전율에 미치는 영향

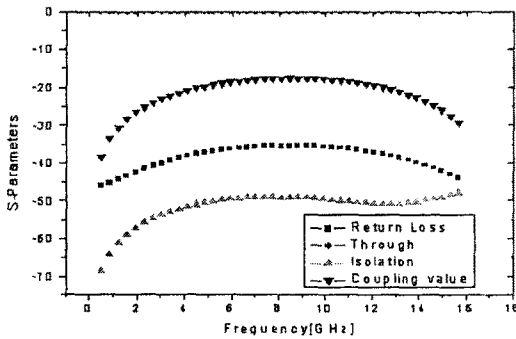


그림 4. 시뮬레이션 결과

표 3.

하우징 구조가 있는 결합기와 없는 결합기의 결과비교

Housing	groove	typical
Coupling (dB)	18	22
Directivity (dB)	31	9
Return loss (dB)	35	35

3. 결 론

본 논문에서는 고 지향성을 얻기 위해 홈이 파인 하우징 구조를 가지는 마이크로스트립 방향성 결합기의 최적 설계를 제시하였으며, 결정론적 알고리즘과 결합된 (1+1)ES를 적용하여 지향성을 향상시키는 최적 설계 변수들을 구하였다. 이 모델은 기존의 다른 방향성 결합기보다 훨씬 제작하기가 쉽다는 장점이 있으며 탁월한 지향성을 보여주고 있다. 최적화된 결과는 Ansoft-HFSS를 이용한 full-wave 해석에 의해 검증되었으며 향상된 특성을 얻을 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] Terry Edwards, *Foundations for Microstrip Circuit Design*: Second Edition. John Wiley & Sons, Inc., 1992, ch. 6.
 [2] Steven L. March, Phase velocity compensation in parallel coupled microstrip, *IEEE MTT S Dig.*, pp. 410-412, 1982.
 [3] L. Lavendol and J. J. Taub, Re-entrant directional coupler using strip transmission, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT 13, pp. 700-7

01, September 1965.
 [4] Pavo, A. M., and Sutton, S. K., A microstrip re-entrant mode quadrature coupler for hybrid and monolithic circuit applications, *IEEE MTT S International Microwave Symp.*, 1990, Dig., pp. 573-576, 1990.
 [5] A. G. Engel, Jr., et al., Frequency and Time Domain Characterization of Microstrip-Ridge Structures, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-41, No. 8, pp. 1251-1262, August 1993.
 [6] Luis Valor and Juan Zapata, A simplified Formulation to Analyze Inhomogeneous Waveguides with Lossy Chiral Media Using the Finite Element Method, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT 46, No. 2, pp. 185-187, February 1998.
 [7] D. B. Fogel, *Evolutionary Computation.*, New York: IEEE Press, 1995.
 [8] K. Press, et al., FEM & Evolution Strategies in the Optimal Design of Electromagnetic Devices, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 26, no.5, pp.2181-2183, September 2000.
 [9] P. P. Silvester and R. L. Ferrari, *Finite Elements for Electrical Engineers*: Third Edition. Cambridge University Press, 1996, ch. 2.
 [10] Nathan Ida and J. P. A. Bastos, *Electromagnetics and Calculation of Fields*: Second Edition. Springer-Verlag New York, Inc., 1997, ch. 3.
 [11] I. Park, B. Lee, S. Hahn, Design sensitivity analysis for nonlinear magnetostatic problems using finite element method, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 28, no. 2, pp. 1533-1536, March 1992.