

강유전체를 사용한 90° 하이브리드 구조의 위상 변위기 설계

김영태*, 류한철**, 이수재**, 곽민환**, 문승언**, 김형석*, 박준석*
 순천대학교 정보기술공학부*, 한국전자통신연구원**

A design of 90° hybrid phase shifter using ferroelectric materials

Young-tae Kim, Han-Cheol Ryu, Su-Jae Lee, Min-Hwan Kwak, Seung-Eon Moon,
 Hyeong-seok Kim, Jun-Seok Park
 Soonchunhyang Univ., ETRI

Abstract - In this paper, we were designed the ferroelectric phase shifter using 3-dB, 90° branch-line hybrid coupler with two ports terminated in symmetric phase-controllable reflective networks. The design of phase shifter is based on reflection theory of terminating circuits. In order to find the optimum conditions of reflect phase, the effect of a change of capacitance and transmission line connected with two coupled ports of a coupler have been investigated. To obtain more accurate design parameters, finite element method is applied. We were showed large phase variation with small capacitance variation in the parallel connection of capacitor and transmission line by using EM-simulation and circuit-simulation.

$$\Gamma = \frac{jX - Z_0}{jX + Z_0} = \frac{X^2 - Z_0^2 + j2Z_0X}{X^2 + Z_0^2} \quad (1)$$

와 같이 표현할 수 있다. 포트 2와 3에서의 위상 변화는 다음과 같다.

$$\angle \phi = \tan^{-1} \left(\frac{2Z_0X}{X^2 - Z_0^2} \right) \quad (2)$$

1. 서 론

마이크로파 시스템의 구성요소로서 위상 변위기는 레이다 시스템, 각종 마이크로파 계측기와 측정장비에 사용되고 있다. 일반적으로 위상 변위기는 페라이트 소자[1]를 이용하거나 반도체 소자[2]를 이용한 위상 변위기가 쓰이고 있으나 페라이트 소자를 이용한 위상 변위기는 제어신호에 대한 응답이 느리기 때문에 빠른 빔 스캐닝(beam scanning)이 요구되는 시스템에서는 사용하기가 힘들고 반도체 위상 변위기는 응답 속도는 빠르나 마이크로파 및 밀리미터파 대역에서 손실이 크며 파워 수용능력이 떨어지는 단점이 있다. 위에서 언급한 이러한 단점들을 보완하기 위해서 최근에는 강유전체를 이용한 위상 변위기[3]가 많이 연구되고 있다. 본 논문에서는 낮은 유전율의 변화를 갖는 3-dB 90° 하이브리드 구조의 위상 변위기를 설계하기 위해서 위상 변화 이론에 대해서 살펴 보았으며 하이브리드 양쪽 출력단에 캐패시턴스와 선로가 병렬로 연결되어 있는 구조를 설계하였다. 임피던스에 해당하는 선로 폭을 유한요소법을 활용하여 추출하였으며 전자장 및 회로 시뮬레이션을 통해 위상변화와 산란행렬을 계산하여 본 논문에서 제시된 방법을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 반사 구조를 이용한 위상 변위 원리

반사 구조를 이용한 3-dB 90° 하이브리드 위상 변위기의 가장 일반적인 구조는 종단된 두 개의 대칭 포트가 리액턴스의 변화에 의해 위상을 조절할 수 있는 구조이다. 3-dB 90° 하이브리드 구조의 위상 변위기는 그림 1과 같다. 그림 1과 같은 구조에서 위상변화의 원리를 살펴보면 포트 2와 3의 리액턴스 값을 같다고 가정하고 2, 3번 포트에 대한 반사계수(Γ)를 구하면

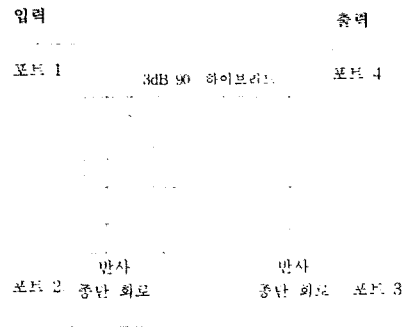


그림. 1 3-dB 90° 하이브리드 구조의 위상 변위기

3-dB 90° 하이브리드 구조의 위상변화 원리는 그림 1에서 입력포트 1로 임의의 신호가 0°의 위상을 가지고 입력 되었을때 리액턴스에 의한 반사로 포트 2에서 -90°- ϕ 의 위상을 가지고 반사가 일어나고 포트 3에서는 -180°- ϕ 의 위상을 가지고 반사가 일어나게 된다. 이들 반사신호에 대한 위상의 관계를 알아보면 포트 2의 -90°- ϕ 의 위상을 가진 입력신호에 의하여 입력포트1 -180°- ϕ 의 위상을 가진 신호가 발생하고 포트 4는 포트 2에 대한 출력포트이므로 포트 4에서는 -270°- ϕ 위상을 갖는 신호가 발생한다. 마찬가지로 포트3에 의해 입력 포트 1에서는 -360°- ϕ 이고 포트 4에서는 -270°- ϕ 의 위상차를 갖는 신호가 발생한다. 리액턴스에 대한 반사와 신호들에 대하여 중첩의 원리를 적용하면 입력포트 1는 위상의 관계가 180°이므로 서로 상쇄되고 포트 4만으로 신호가 출력된다. 위에서 설명한 반사원리에 의해 포트 4에 출력되는 위상의 변화는 하이브리드 종단의 캐패시터와 선로의 길이에 따라 변하게 된다. 본 논문에서는 위에서 설명한 원리를 이용하여 리액턴스 성분인 캐패시터의 변화에 따른 원리를 적용하여 위상 변위의 최적점, 즉 낮은 캐패시턴스의 변화에서 가장 큰 위상이 변화되는 지점을 추출하였다.

2.2 3-dB 90° 하이브리드 구조의 위상 변위기 최적 설계

일반적으로 3-dB, 90° 하이브리드 구조의 위상 변위기는 반사중단 회로에 그림 2와 같이 캐패시터와 선로가 직렬로 연결되어 있는 구조이다. 그림 2에서 입력 임피던스는 반사중단 회로에서 선로가 단락되어 있으므로 전체 리액턴스는 다음과 같다

$$X = \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (3)$$

여기서 ωL 은 $Z_s \tan \theta$ 와 같이 표현할 수 있다.

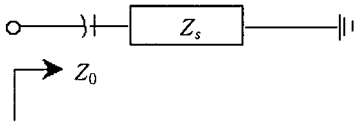


그림 2. 캐패시터와 선로가 직렬로 구성된 중단 회로

각 선로의 길이에 대한 캐패시턴스의 변화에 따른 위상 변화는 그림 3과 같다. 그림 3에서의 캐패시턴스의 변화는 0 pF부터 0.6 pF까지이며 선로의 길이(θ)는 10°에서 50°까지이며 동작 주파수는 10 GHz이다.

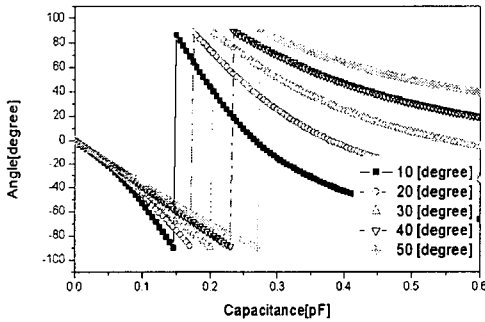


그림 3. 각 선로의 길이에 대한 캐패시턴스 변화에 해당하는 위상변화

위의 그림에서 보는 바와 같이 각 선로의 길이에 따른 위상의 변화는 캐패시턴스의 변화에 따라 위상의 전체적인 특성은 거의 변화하지 않음을 알 수 있다. 강유전체를 이용한 위상 변위기 제작시 그림 3과 같은 캐패시턴스의 변화를 위해서는 아주 높은 DC 전압을 인가해야 한다. 설계시 이러한 문제점을 해결하기 위해서 그림 4와 같이 캐패시터와 선로를 병렬로 구성하여 임의의 캐패시터에서 전체적인 위상 변위 특성을 이동할 수 있도록 설계하였다.

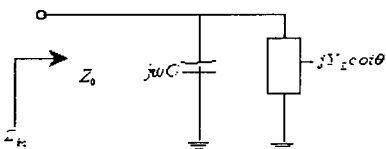


그림 4. 캐패시터와 선로가 병렬로 구성된 중단 회로

그림 4의 경우 전체 어드미턴스(Y)는 $j(\omega C - Y_L \cot \theta)$ 와 같으며 입력 임피던스는 다음과 같이

표현할 수 있다.

$$Z_{in} = \frac{1}{Y} = \frac{1}{j(\omega C - Y_L \cot \theta)} \quad (4)$$

식(4)와 특성 임피던스(Z_0)를 이용하면 반사계수와 전파가 반사되는 위상을 구할 수 있다. 캐패시턴스의 작은 변화에 따라 큰 위상 변위를 위해 각각의 캐패시턴스에서 위상의 변화율이 가장 극심한 부분의 중심이 되는 지점을 식(4)에 의해 결정할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{Y_L}{\omega C} \right) \quad (5)$$

표. 1 각각의 캐패시턴스에서 최적 위상변화를 위한 선로 길이

캐패시턴스[pF]	선로의 길이 θ [degree]
C=2	9.043061079
C=3	6.056610594
C=4	4.549865309
C=5	3.642646888
C=6	3.036788653

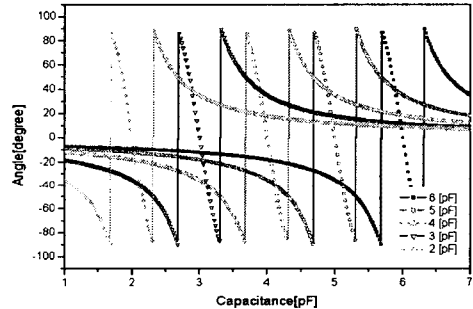


그림 5. 표 1에 의해 계산된 각 캐패시턴스의 변화에 따른 위상 변화율에 대한 위상 변화율

표 1은 동작 주파수가 10 GHz이고 특성 임피던스(Z_0)와 부하 임피던스(Z_L)가 50 Ω 일 경우 병렬 캐패시턴스가 2 pF부터 6 pF일 경우 식(5)을 사용하여 위상변화의 최적점인 선로의 길이를 계산한 결과이다. 그림 5은 표. 1에 의해서 구해진 선로의 길이에서 캐패시턴스 변화에 따른 위상의 변화를 나타내고 있으며 각각의 캐패시턴스에 대한 위상변화의 최적점 즉 위상이 0°가 되는 점을 정확히 계산할 수 있다. 낮은 캐패시터 변화에 의해서도 위상이 180° 이상 크게 변화는 것을 확인할 수 있었다.

2.2 설계 파라미터 추출 및 시뮬레이션 결과

3-dB 90° 하이브리드 구조의 위상 변위기를 설계하기 위해서는 50 Ω 과 35.36 Ω 에 해당하는 선로 폭을 결정해야 한다. 본 연구에서 구현할 위상 변위기는 그림 6에서 보는바와 같이 산화물 단결정 기판(MgO)위에 얇은 강유전체 박막이 성장되어 있는 구조로서 기판에 비해 박막의 두께가 매우 얇기 때문에 기존의 방법인 실험식 등을 이용해서 선로 폭을 결정하기 매우 힘들다. 좀 더 정확한 선로 폭을 결정하기 위해서 본 논문에서는 유한요소법(4)을 활용하여 선로 폭을 결정하였다. 마이

크로스스트립 구조에서 기판은 비유전율은 9.8인 MgO를 사용하였다. 박막은 비유전율이 900일 경우 박막 및 메탈 성장시 공정상의 문제를 고려하여 50(Ω)와 35.36(Ω)의 선로 폭을 추출하였다.

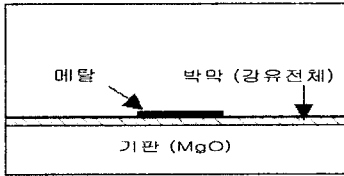


그림 6. 강유전체 구조의 마이크로스트립

유한요소법은 해석 영역을 세분화하여 계산하는 수치해석 알고리즘이기 때문에 그림 6와 같은 구조에서는 박막과 박막 부근을 세분화 하는게 매우 중요하다. 일반적으로 MgO의 비유전율이 10정도이지만 강유전체의 비유전율은 300~3000까지 매우 큰 유전율을 갖기 때문에 전파가 박막과 박막 근처에서 급격히 변화하므로 박막부근에서의 영역 세분화가 임피던스에 해당하는 정확한 선로를 추출하는 가장 큰 요인이 된다. 그림 7는 그림 6의 구조를 유한요소법 해석을 위해 해석 대상을 세분화 한 것이다.

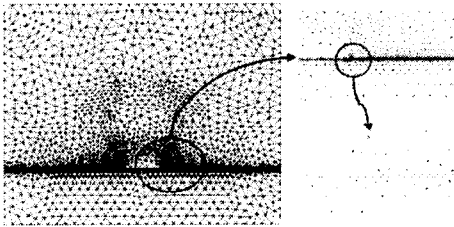


그림 7. 정확한 설계 파라미터 추출을 위한 해석 영역 세분화.

표 2은 각 임피던스에 해당하는 폭과 비유전율을 나타내며 주파수가 10 GHz일 경우 $\lambda/4$ 일 경우를 나타낸다. 여기서 λ 는 파장을 의미한다. 표 2의 경우 메탈의 두께는 2(μm)이고 박막의 두께는 0.8(μm)이다.

표 2. 선로의 임피던스에 해당하는 설계 파라미터

임피던스 [Ω]	선로 폭 [micron]	길이 [micron]	유효유전율
50	341	2719.25	7.597
35.36	748	2713.85	7.627

표 2에 의해 추출된 파라미터를 검증하기 위해서 3-dB 90° 하이브리드 구조를 3-D 전자기 프로그램인 HFSS를 이용하여 계산하였다. 그림 6의 결과에서 알 수 있듯이 주파수 10 GHz에서 3-dB 90° 하이브리드 특성을 확인할 수 있었으며 본 논문에서 제시된 2-D 유한요소법 프로그램을 활용한 설계 파라미터 추출 방법이 정확함을 확인할 수 있었다. 그림 7은 위상의 변화에 따른 주파수에 대한 산란행렬의 특성을 확인하기 위해서 표 2에 의해 결정된 결과를 이용하여 각각의 캐패시턴스에서 주파수 변화에 따른 산란행렬을 AnSoft사의 Serenade를 이용한 회로 시뮬레이션 결과이다. 동작 주파수 10 GHz에서 삽입손실 0.5 dB와 반사손실 30 dB이상의 결과를 확인할 수 있었다.

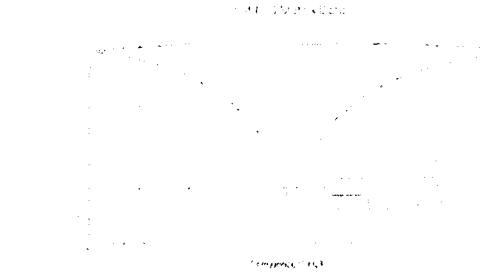


그림 8. 3-D 전자기장 시뮬레이션(HFSS)을 이용한 3-dB, 90° 하이브리드 산란행렬

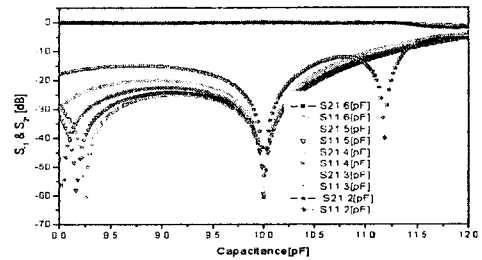


그림 9. 회로 시뮬레이션(Serenade)을 이용한 3-dB, 90° 하이브리드 구조의 위상 변위 산란행렬

3. 결 론

본 논문에서는 3-dB, 90° 하이브리드 구조를 이용한 강유전체 위상 변위기를 설계하였다. 정확한 설계 파라미터의 추출하기 위해서 유한요소법을 활용하였으며 각 임피던스에 해당하는 파라미터의 검증에 위해 HFSS를 활용하여 3-dB, 90° 하이브리드를 시뮬레이션 한 결과 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 낮은 캐패시터의 변화에서도 큰 위상을 변화시킬 수 있는 캐패시터와 선로를 병렬로 연결하여 적점을 추출하였다. 그 결과 낮은 캐패시터에서 180°이상의 큰 위상이 변화되었으며 시뮬레이션 결과 삽입손실 0.5 dB와 반사손실 30 dB이상의 결과를 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제시한 반사이론을 이용한 위상 변위기 설계이론은 구조가 간단하기 때문에 하이브리드 구조뿐만 커플러 타입의 위상 변위기나 다양한 loaded 구조등에도 적용할 수 있을 것으로 생각된다. 향후 강유전체를 사용한 위상 변위기를 직접 제작하여 검증할 계획이다.

(참 고 문 헌)

- [1] G.T. Roome and H.A. Hair, "Thin Ferrite Devices for Microwave Integrated Circuits", IEEE Trans on Microwave Theory and Tech, vol MTT-16, pp 411-420, 1968
- [2] C.L. Chen, "A Low-Loss Ku-Band Monolithic Analog Phase Shifter", IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., vol. MTT-35, pp 315-320, 1987
- [3] D.F. Franco, N.G. Alexopoulos, "Planar Microwave Integrated Phase-Shifter Design with High Purity Ferroelectric Material", IEEE Trans on Microwave Theory and Tech., vol. MTT-35, pp. 315-320, 1987
- [4] Jianming Jin, "The Finite Element Method in Electromagnetics", Wiley & Sons, 1993