슬롯-결합 선로를 이용한 광대역 90° 쉬프만 위상천이기

Broadband 90° Schiffman Phase Shifter Using Slot-Coupled Lines

이 승 엽

Seung-Yeop Rhee

요 약

본 논문에서는 슬롯-결합 선로를 이용한 개선된 쉬프만 위상천이기를 제안하고자 한다. 제안된 쉬프만 위상천이기는 일반적인 결합 선로와 결합 선로 바로 밑에 단순한 직사각형 모양의 슬롯으로 이루어졌다. 슬롯과 결합된 결합 선로의 두 독립적인 전송 모드인 우 모드와 기 모드의 임피던스와 위상 특성을 계산하여 제안된 쉬프만 위상천이기의 위상 특성을 해석하였다. 본 논문에서는 일반 결합 선로로는 구현이 어려운 높은 임피던스 비를 갖는 90° 쉬프만 위상천이기를 제작하였다. 동작 중심 주파수는 2.4 GHz로 하였다. 실험 결과, 대역폭은 위상 오차 $\pm 5^\circ$ 의 위상천이기에서 약 74.2 %의 밴드폭을 얻었다. 또한, 측정 반사 특성은 동작 대역에서 15.0 dB 이하이며, 삽입 손실은 1.5 dB 이하로 측정되었다.

Abstract

In this paper, an improved Schiffman phase shifter is proposed using slot-coupled lines. It consists of the typical coupled lines and a simple rectangular slot which is placed in the ground plane underneath the coupled lines. Phase responses of the slot-coupled Schiffman phase shifter are analyzed in consideration of the phase velocity of two independent transmission modes and the characteristic impedance of slot-coupled line. The 90° Schiffman phase shifters with high impedance ratio is realized at 2.4 GHz, which cannot be implemented with the conventional coupled lines. The measured results show that the bandwidth is around 74.2 % within the phase errors $\pm 5^\circ$. The measured return loss is found to be better than 15.0 dB and insertion loss is less than 1.5 dB over the operating frequency band.

Key words : Schiffman Phase Shifter, Slot-Coupled Lines, Broadband

I. 서 론

위상천이기는 기본적인 마이크로파 소자이며, 레이다 및 위상 배열 안테나의 중요한 소자이기 때문에 현재에도 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 위상천이기 중에 쉬프만 위상천이기에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있는 데, 그 이유는 쉬프만 위상천이기 구조가 다른 위상천이기보다 간단하고 제작이 간

편하다는 장점을 가지고 있기 때문이다.

그러나 쉬프만 위상천이기는 광대역의 특성을 얻기 위하여 결합 선로의 결합계수 즉 임피던스 비가 높아야 한다^[1]. 이 때 쉬프만 위상천이기는 결합 선로 간의 간격이 너무 좁아져 일반 기판 제작 공정상의 한계로 인해 실제로 제작이 어려워지는 단점을 갖는다.

이런 쉬프만 위상천이기의 단점을 극복하기 위해 많은 연구가 최근까지도 진행되고 있다^{[1]~[5]}. 이들

「이 연구는 전남대학교 2010학년도 연구년 교수 연구비의 지원으로 연구되었음.」

전남대학교 전자통신공학과(Department of Electronic Communication Engineering, Chonnam University)

· Manuscript received July 3, 2012 ; Revised September 7, 2012 ; Accepted September 10, 2012. (ID No. 20120703-078)

· Corresponding Author : Seung-Yeop Rhee (e-mail : yrsry@chonnam.ac.kr)

연구 중 대표적인 것으로 2011년 Z. Zang 등이 이빨 모양의 마이크로스트립 선로와 특정 모양이 있는 접지 면을 이용하여 광대역 특성을 얻었다^[4]. 또한 2006년 Y. X. Guo 등이 공진기 형태를 접지 면에 부착하고, 그 사이에 슬롯을 만들어 대역폭 특성을 개선하고자 하는 연구를 하였다^[5]. 그러나 이들 연구는 구조가 매우 복잡하기 때문에 설계 시 많은 설계 파라미터를 필요로 하는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 쉬프트만 위상천이기가 갖는 이러한 문제점을 해결하기 위해 결합 선로 바로 밑의 접지 면에 단순한 직각사각형의 슬롯을 만들어 결합 선로의 임피던스 비를 높이는 방법을 제안하고자 한다. 접지 면에 위치한 슬롯에 의해 결합 선로가 가지고 있는 두 독립적인 전송 모드인 우(even) 모드와 기(odd) 모드의 특성 임피던스와 위상 속도의 변화를 크게 변화시킬 수 있다. 이러한 결과로부터 슬롯폭의 치수를 변화시키면 일반적인 결합 선로로는 어려운 임피던스 비를 구현할 수 있다^{[6][7]}. 본 논문은 이러한 슬롯-결합 선로의 성질을 쉬프트만 위상천이기를 설계에 적용하여, 유전율에 대한 선택 및 위상 오차에 대한 설계의 폭을 넓힐 수 있음을 확인하고자 한다.

II. 해 석

그림 1은 쉬프트만 위상천이기의 특성을 개선하기 위해 본 논문에서 제안한 구조이다. 쉬프트만 위상천이기는 차동형 위상천이기(differential phase shifter)로서 위상차($\Delta\phi = \phi_{12} - \phi_{34}$)는 단일 선로로 이루어진 기준 선로(reference line)의 위상 응답($\Delta\phi_{12}$)과 위상 지연이 일어나도록 만든 결합 선로(coupled line)의 위상 응답($\Delta\phi_{34}$)을 감산하여 식 (1)과 같이 얻을 수 있다^[1].

$$\Delta\phi(f) = \phi_{12}(f) - \phi_{34}(f) = K\theta(f) - \cos^{-1}\left(\frac{\rho - \tan^2\theta}{\rho + \tan^2\theta}\right) \quad (1)$$

여기서, θ 는 결합 선로의 전기적 길이를 표시하며, ρ 는 결합 선로의 우 모드와 기 모드의 임피던스의 비이다. $\Delta\phi(f)$ 는 중심 주파수에서 구현하고자 하는 위상차이다. $\phi_{12}(f)$ 는 기준 선로인 포트 1에서 포트 2까지 주파수에 따른 위상 응답이며, $\phi_{34}(f)$ 는 포트

그림 1. 슬롯-결합 선로를 이용한 쉬프트만 위상천이기 구조

Fig. 1. Configuration of Schiffman phase shifter with slot-coupled lines.

3에서 포트 4까지 결합 선로의 주파수에 따른 위상 응답이다. K 는 구현하고자 하는 위상천이기에 따라 결정되는 상수이고, 만약 $\Delta\phi = 90^\circ$ 의 위상천이기의 경우에는 $K=3$ 이 된다. 설계하고자 하는 위상 특성을 얻기 위해서는 상수 K , θ 와 ρ 를 적절하게 선택해야 한다. 그러나 변수 값을 결정하는 과정은 결정해야 할 변수들이 상호 연관되어 있기 때문에, 허용하는 위상 오차와 대역폭을 종합적으로 고려한 설계가 필요하다. 특히, 주어진 위상 오차 내에서 최대한의 대역폭을 얻고자 한다면 식 (1)을 θ 에 대해 미분하여 얻어진 식 (2)를 이용해야 한다^{[1][4]}.

$$\Delta\phi_{\max} = K \tan^{-1} \sqrt{\frac{K\rho - 2\sqrt{\rho}}{2\sqrt{\rho} - K}} - \cos^{-1}\left(\frac{\rho + 1 - K\sqrt{\rho}}{\rho - 1}\right) \quad (2)$$

일반적으로 설계 시 대역폭은 식 (2)처럼 최대 위상 오차 내에서 대역폭을 의미한다. 따라서 앞으로

그림 2. 일반 쉬프만 위상천이기의 위상 특성

Fig. 2. Phase response of typical Schiffman phase shifter.

본 논문에서는 위상 오차($\Delta\phi$)는 최대 위상 오차($\Delta\phi_{\max}$)와 같은 의미로 쓰기로 한다.

이처럼 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 쉬프만 위상천이기의 위상 응답을 구할 때 가장 중요한 변수가 임피던스 비인 ρ 이다.

그림 2는 정규화된 주파수 변화에 대해서 ρ 변화에 대한 위상 응답을 구한 것이다. ρ 값이 커지면 커질수록 위상 허용 오차 범위가 커져 대역폭이 커진다. 예를 들면 위상 오차를 $\pm 10^\circ$ 로 하는 90° 쉬프만 위상천이기를 만들 경우, ρ 는 식 (2)로부터 약 3.7이 되고, 위상 오차를 $\pm 2^\circ$ 로 하는 90° 쉬프만 위상천이기인 경우, ρ 는 2.6이 즉 결합계수가 -7.0 dB가 되어야 한다. ρ 가 2.6인 경우 우 모드의 임피던스는 $86.6 \Omega (Z_{oe} = 50\sqrt{\rho})$, 그리고 기 모드의 임피던스는 $28.9 \Omega (Z_{oo} = 50/\sqrt{\rho})$ 로 결정된다. 이 두 임피던스를 기판 두께는 1.0 mm이고, 유전율이 4.4(FR4)가 기판으로 구현한다면 결합 선로의 치수는 선로폭이 1.1 mm이고, 선로간의 거리는 약 0.1 mm로 결정된다. 설계치수에서 선로간의 간격이 0.1 mm는 일반적인 회로 제작 공정으로는 구현하기 힘든 치수이다. 특히 이러한 현상은 유전율이 낮은 기판에 더 심각하게 나타난다. 이러한 단점을 극복하기 위해 임피던스 비를 높일 수 있는 선로가 필요하다. 본 논문에서는 슬롯-결합 선로로 이러한 단점을 극복할 수 있음을 보이고자 한다.

슬롯-결합 선로는 그림 1처럼 결합 선로 밑에 슬롯을 만들어 결합 선로간의 임피던스를 높이는 특성

그림 3. 슬롯-결합 선로에서 결합 선로 간격과 슬롯폭에 따른 우 모드 및 기 모드 임피던스 변화

Fig. 3. Modes impedance versus coupled line width with respect to slot width in slot-coupled lines.

을 갖는다. 그림 3은 슬롯-결합 선로에서 결합 선로 폭 w 가 0.7~1.3 mm이고, 선로 간격 S 가 0.1 mm인 경우 슬롯 폭 t 에 대한 우 모드와 기 모드 임피던스를 각각 구한 결과이다. 사용 기판은 FR4이고, 두께는 1.0 mm이다. 그림에서 알 수 있듯이 기 모드보다는 우 모드인 경우 슬롯 변화에 더 민감하게 변화함을 알 수 있다. 이것은 우 모드의 전계가 접지와 더 많은 영향을 받기 때문이다^{[6][7]}. 따라서 슬롯 폭이 커짐에 따라 임피던스 비인 ρ 도 커짐을 알 수 있다. 그림 4는 그림 3의 결과로부터 얻어진 임피던스 비와 식 (1)과 결합하여 실제 구현된 슬롯-결합 선로에서 선로 간격 s 와의 관계를 그린 결과 그림이다. 일반 회로 제작공정으로 구현할 수 있는 결합 선로의 간격 한계를 0.2 mm로 정한다면, 슬롯이 없는 경우 ($t=0.0$ mm), ρ 는 3.0을 넘을 수 없다. 그러나 슬롯이 있는 경우 선로간의 간격이 0.2 mm인 경우에도 ρ 가 3을 넘을 수 있음을 보이고 있다.

또한 그림 4 결과로부터 결합 선로간의 간격이 0.2 mm로 고정시킨 후 슬롯 폭을 0.0~3.0 mm까지 증가시켰을 때 ρ 값이 2.7에서 3.2까지 변화함으로써 구현 가능한 위상 편이는 $\pm 5.0^\circ$ 이상으로도 가능함을 알 수 있다. 그림 4에서 점 A~C는 슬롯 간격을 0.2 mm인 경우 임피던스 비인 ρ 가 3.0, 2.7 그리고 2.3인 지점을 나타낸다. 그리고 식 (2)로부터 각 점에 해당하는 위상천이기의 최대 위상 오차 $\Delta\phi_{\max}$ 는 각각 $\pm 5^\circ$, $\pm 2.5^\circ$ 와 $\pm 0.0^\circ$ 가 됨을 의미한다.

그림 4. 위상 오차에 대한 결합선로 간격과 임피던스 비
Fig. 4. Impedance ratio versus space gap between coupled lines with respect to phase errors.

표 1. 위상 오차($\Delta\phi$)에 대한 결합 선로 치수

Table 1. Dimension of coupled line with respect of the phase deviation ($\Delta\phi$).

$\Delta\phi$ [°]	ρ	Z_{even} [Ω]	Z_{odd} [Ω]	기판 유전율에 따른 결합 선로 간 거리(s) [mm] 기판 두께=1.0 mm		
				$\epsilon_r=2.2$	$\epsilon_r=3.4$	$\epsilon_r=4.4$
0.0	2.3	75.0	33.3	w=2.1 s=0.17	w=1.6 s=0.21	w=1.3 s=0.24
2.5	2.7	82.0	30.5	w=1.9 s=0.12	w=1.1 s=0.13	w=1.14 s=0.16
5.0	3.0	86.9	28.8	w=1.76 s=0.01	w=1.01 s=0.11	w=1.05 s=0.13
10.0	3.7	96.1	26.0	w=1.54 s=0.07	w=0.86 s=0.07	w=0.89 s=0.09

표 1은 앞 장의 식과 계산 결과로부터 쉬프트만 위상 천이기의 원하는 위상 오차를 얻기 위한 결합 선로의 치수를 구체적 계산한 예이다. 일반적인 기판 제작 상 선로간의 간격이 0.2 mm 미만은 만들기 어렵다고 판단하면 기판의 유전율이 2.2인 경우 쉬프트만 위상천이기를 제작하는 것은 매우 어렵다는 것을 쉽게 알 수 있다. 그리고 유전율이 3.38인 기판이나 FR4 기판을 사용할 경우도 위상 오차가 $\pm 0.0^\circ$ 이상인 쉬프트만 위상 천이기를 만드는 것이 어렵다는 것을 알 수 있다. 대역폭을 높이기 위해 위상 편이를 높여야 하는 상황에서는 유전율이 매우 높은 기판을 사용해야 한다는 결론이다.

III. 제작 및 실험

본 장에서는 앞에서 언급된 내용을 기반으로 슬롯-결합 선로의 특성을 이용하여 위상 오차가 $\pm 2.5^\circ$ $\pm 5^\circ$ 인 90° 쉬프트만 위상천이기를 제작하고자 한다. 본 논문에서 사용한 유전체 기판은 앞 장에서 설계 및 해석에 사용한 FR4 기판을 사용하였고, 결합 선로의 길이는 중심 주파수 2.4 GHz에서 위상천이기의 위상 응답이 90° 가 되도록 하였다. 기준 선로는 50Ω 마이크로파 단일 선로이므로 결합 선로와 동일한 특성을 갖는 기판을 사용하였다. 이 때 선로 폭은 1.7 mm로 하였다. 두 위상천이기의 결합 선로의 폭과 간격은 1.5 mm와 0.2 mm로 같지만, 슬롯 폭은 2.3 mm와 3.3 mm로 각각 다르게 하였다. 이처럼 다른 치수는 변하지 않고도 위상 오차를 변화시킬 수 있다는 점도 제안된 구조의 장점이라고 할 수 있다. 그림 5는 제작된 위상천이기 사진으로 맨 왼쪽은 기준 선로이며, 중앙과 오른쪽의 사진은 각각 결합 선로가 있는 앞면과 슬롯이 있는 뒷면 사진이다.

실제 제작한 결합 선로 위상천이기의 위상 응답 및 반사 특성을 실험하기 위하여 HP8510C를 사용하였다. 위상천이기의 위상변화량은 우선 기준 선로에 대한 위상 응답을 윌트론(Wiltron)사의 만능 시험 고정기(universal test fixture)로 측정하고, 결합 선로에 대한 위상 응답을 측정하여 그 차이를 구하였다. 그리고 위상천이기의 입출력 포트의 50Ω 정합 상태를 알아보기 위하여 반사 손실 및 삽입 손실도 측정

그림 5. 제작된 90° 쉬프트만 위상천이기 사진
Fig. 5. Photo of fabricated 90° Schiffman phase shifter.

(a) $\pm 2.5^\circ$ 위상천이기(#1)에 대한 위상 응답
(a) Phase response of $\pm 2.5^\circ$ phase shifter(#1)

(b) $\pm 50^\circ$ 위상천이기(#2)에 대한 위상 응답
(b) Phase response of $\pm 50^\circ$ phase shifter(#2)

(c) 반사 손실 응답
(c) Return loss response

(d) 삽입 손실 응답
(d) Insertion loss response

그림 6. 제작된 90° 쉬프만 위상천이기에 대한 계산과 측정 결과
Fig. 6. Simulated and measured results of 90° Schiffman phase shifters.

표 2. 제작된 두 개의 위상천이기의 측정 결과
Table 2. Results of measurements of the fabricated two phase shifters.

위상 오차		위상천이기 #1	위상천이기 #2
		$\pm 2.5^\circ$	$\pm 5.0^\circ$
위상 대역폭 [GHz]	이론	1.56 ~ 3.08 (63.2 %)	1.43 ~ 3.42 (82.9 %)
	측정	1.72 ~ 2.90 (49.2 %)	1.58 ~ 3.36 (74.2 %)
반사 손실	이론	-12 dB	-14 dB
	측정	-11 dB	-16 dB
삽입 손실	이론	-0.6 dB	-0.8 dB
	측정	-1.3 dB	-1.5 dB

하였다.

표 2는 제작된 두 위상천이기를 측정한 결과를 요약 정리한 것이다. 표에서 반사 손실과 삽입 손실은 위상기준으로 한 대역폭에서 최대값을 나타낸 것이다. 이론값은 상용 프로그램인 IE3D를 사용하였다^[8].

그림 6의 측정 결과는 제작한 두 개의 위상천이기에 대한 측정 결과이다. 결과, 그림과 표 2로부터 계산된 값보다 측정된 위상이 낮은 주파수 대역에서 오차가 많이 발생하여 계산된 대역폭보다 많이 줄어든 결과를 보이고 있다. 또한, $\pm 2.5^\circ$ 위상천이기인 경우가 더 심한데, 이론적으로는 63.2 %의 대역폭이 실제 측정 시에는 49.3 %로 14 % 이상의 오차를 보

이고 있다. 이것은 제작 시 기관 양면에 놓인 슬롯과 결합 선로의 위치가 어긋남으로 인한 오차로 사료된다. 즉, $\pm 2.5^\circ$ 위상천이기인 경우, 슬롯 폭이 $\pm 5.0^\circ$ 위상천이기 슬롯 폭보다 작아 결합 선로에 대한 위치 오차가 상대적으로 큰 오차를 불러 오기 때문으로 분석된다. $\pm 5.0^\circ$ 위상천이기로부터 얻어진 74.2%의 대역폭은 참고문헌 [5]에서 얻어진 70.0%보다 더 좋은 결과이다. 삽입 손실에 대한 결과는 대역폭 내에서 최대 -1.5 dB 이하로 전체 시스템에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 논문은 접지 면에 슬롯과 결합된 결합 선로의 임피던스 비가 일반 결합 선로보다 높아진다는 특성을 이용하여 쉬프만 위상천이기의 대역 특성을 개선할 수 있는 위상천이기를 제안하였다. 이에 대한 수치 해석 결과를 보면 슬롯-결합 선로는 접지면의 슬롯의 폭을 변화시키면 일반적인 결합 선로로는 어려운 임피던스 비를 구현할 수 있어, 쉬프만 위상천이기를 설계할 때 유전율에 대한 선택 및 위상 오차에 대한 설계의 폭을 넓힐 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 높은 결합계수 특성을 갖도록 구현된 슬롯-결합 선로를 이용한 위상천이기의 설계 기법은 향후 낮은 유전율 기판에서 높은 임피던스 비를 갖는 마이크로파 회로 소자에도 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] J. L. R. Quirarte, J. P. Starski, "Synthesis of Schiffman phase shifters", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 39, pp. 1885-1889, Nov. 1991.
- [2] J. L. R. Quirarte, J. P. Starski, "Novel Schiffman phase shifters", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 41, pp. 9-14, Jan. 1993.
- [3] C. E. Free, C. S. Aitchison, "Improved analysis and design of coupled-line phase shifters", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 43, pp. 2126-2131, Sep. 1995.
- [4] Z. Zhang, Y. -C. Jiao, S.-F. Cao, X.-M. Wang, and F. -S. Zhnag, "Modified broadband Schiffman phase shifter using dentate microstrip and patterned ground plane", *Progress in Electromagnetics Research Letters*, vol. 24, pp. 9-16, 2011.
- [5] Y. -X. Guo, Z. -Y. Zhang, and L. C. Ong, "Improved wide-band Schiffman phase shifter", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 54, no. 3, pp. 1196-1200, Mar. 2006.
- [6] T. Itoh, A. S. Hebert, "A generalized spectral domain analysis for coupled suspended microstriplines with tuning septums", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 26, no. 10, pp. 820-826, Oct. 1978.
- [7] M. Aikawa, "Microstrip line directional coupler with tight coupling and high directivity", *Electronics and Communications in Japan*, vol. J60-B, no. 4, pp. 253-259, Apr. 1977.
- [8] IE3D manual, Zealand software.

이 승 업

1986년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)

1988년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1993년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)

1993년 9월~2006년 2월: 국립여수대학교 전자통신공학과 교수

2004년 7월~2005년 8월: Syracuse대학교 방문교수

2006년 3월~현재: 국립전남대학교 전자통신공학과 교수
[주 관심분야] 안테나 해석 및 설계, 초고주파 회로 설계, 전자파 해석