

PIN 다이오드를 이용한 C-Band 위상 변위기의 설계에 관한 연구

A Study On the Design of C-Band Phase Shifter Using PIN Diode

金漢錫*, 金勳龍*, 李昌植**, 李種岳*

(Han-Suk Kim*, Hoon-Yong Kim*, Chang-Sik Lee**, and Jong-Arc Lee*)

요 약

본 논문에서 C-밴드 6-비트 변위기의 설계와 제작을 하였고 각 비트에 대한 설계 기술을 기술하였다. 5.625°, 11.25°, 22.5° 그리고 45° 위상 비트는 부하선로 방식, 90° 위상 비트는 하이브리드 결합 방식 그리고 180° 위상 비트는 가변선로 방식을 각각 마이크로스트립 구리 기판 위에 적용하였다.

Abstract

In this paper, a C-band 6-bit phase shifter is designed and fabricated and design techniques for each phase bit are represented. We applied the loaded line type to 5.625°, 11.25°, 22.5° and 45° phase bits and the hybrid coupled type to 90° phase bit and the switched line type to 180° phase bit, respectively on a microstrip copper substrate.

I. 서 론

위상 변위기는 RF 신호의 위상을 진폭의 감쇠 없이 변화시키는 것을 기본 기능으로 하는 2단자 회로로서 빔의 검색이나 주사를 위한 PSK(phase-shift keying) 통신 시스템 및 위상배열 안테나 시스템과 초고주파 계측장비 등에 사용되는 범용 초고주파 전자장치이다.[1]

1950년대 이전의 거의 모든 변위기는 기계장치에 의해 구현되었으나 1957년 Reggia와 Spencer가 전자식

페라이트 변위기를 위상배열검색에 적용함으로써 변위기의 새로운 기원을 이루었다.[2] 초기에는 페라이트를 이용한 전자식 변위기가 연구되었으나 1960년대 중반에는 반도체 소자를 이용한 변위기가 개발되기 시작하여 처음으로 PIN 다이오드 변위기가 등장하였다.[3]

그 후 페라이트 변위기와 PIN 다이오드 변위기에 대해서 많은 연구가 이루어졌으며, GaAs FET, 배랙터 등과 같은 소자를 이용한 변위기도 개발되었다. MMIC(monolithic microwave integrated circuit)기술의 발전과 함께 1980년대 이후에는 MMIC 변위기에 대한 연구가 진행되고 있다. 현재까지의 변위기 개발이 주로 대규모의 위상배열 응용에 목적을 두어 왔지만 교통제어 및 차량통신 등과 같이 소규모의 위상배열을 요구하는 분야까지 점차 확대되고 있으며 소형화

* 建國大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Eng., Konkuk Univ.)

** 大邱大學校 情報通信工學部

(Dept. of Communication Eng., Taegu Univ.)

接受日: 1999년7월26일, 修正完了日: 1999년11월18일

와 더불어 밀리미터 주파수 대역에서 이용이 가능하도록 계속 개발되고 있다.[4]

변위기의 성능을 나타내는 중요한 요소로는 위상오차, 삽입손실 등이 있다. 위상오차는 원하는 위상변화에서 얼마나 벗어나는 지를 나타내는 척도이고, 삽입손실은 변위기가 신호를 감쇠 시키는 정도를 나타낸다. 삽입손실은 적어야 할뿐만 아니라 각 위상상태에서 동일해야 한다.

II. PIN 다이오드 위상 변위기

2.1 부하선로 위상 변위기

부하선로 변위기의 기본 구조는 그림 1과 같은 형태이다. 주로 45° 이하의 작은 위상변화를 얻고자 할 때 사용되며, 이는 서셉턴스의 크기가 허용 주파수 대역에서 매우 우수한 입력 정합을 위해 가능한 한 작은 값을 가져야 하기 때문이다.[5]

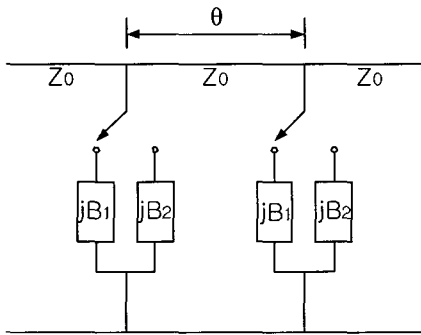
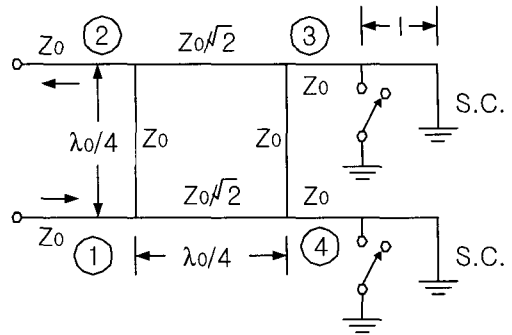


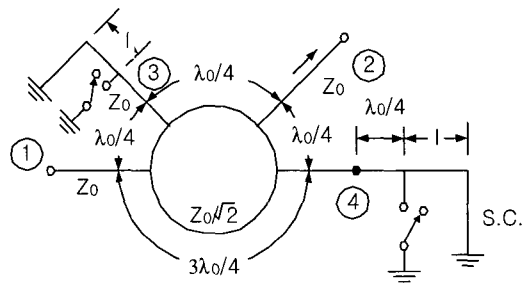
그림 1. 부하선로 변위기 회로
Fig. 1. Loaded line phase shifter circuit.

2.2 하이브리드 결합 위상 변위기

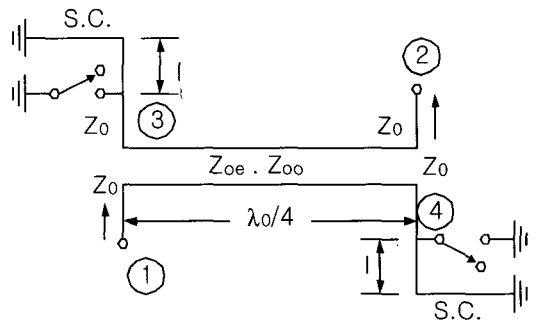
하이브리드 결합 변위기는 대칭적으로 위상제어가 가능한 반사 회로망의 두 포트가 종단된 3-dB, 90° 하이브리드 결합기를 이용한다. 일반적으로 3가지의 형태로 구현 가능하며, 그림 2에서 보듯이 시간지연 회로망으로 종단된다.



(a) 브랜치라인 결합기
(a) Branchline coupler



(b) 랫-레이스 결합기
(b) Rat race coupler

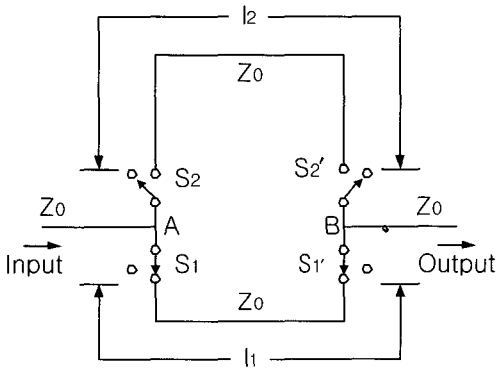


(c) 후진파 결합기
(c) Backward wave coupler

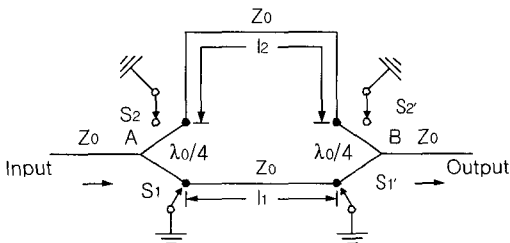
그림 2. 하이브리드 결합 변위기
Fig. 2. Hybrid coupled phase shifter.

2.3 가변선로 위상 변위기

가변선로 변위기는 길이가 다른 두 전송선로 사이를 스위칭 하여 위상차를 얻는 시간지연 회로이다. 이 회로는 직렬연결 스위치와 병렬연결 스위치로 구분한다. 가변선로 변위기의 중요한 특성은 스위칭 소자가 사용될 때, 삽입 손실이 두 스위칭 단에서 거의 동일하고 위상변화에 무관하다는 것이다.



(a) 직렬연결 스위치
(a) Series-mount switches



(b) 병렬연결 스위치
(b) Shunt-mount switches

그림 3. 가변선로 변위기

Fig. 3. Switched line phase shifter circuits.

2.4 가변회로 위상 변위기

가변회로 변위기의 원리는 가변선로 변위기와 거의 같은 개념을 갖고 있다. 가변선로 변위기에서는 PIN 다이오드를 이용한 SPST 스위치가 서로 다른 전

송선로를 개폐하지만 가변회로 변위기는 SPDT(single-pole-double-throw)스위치가 회로의 기본 구성을 바꾸어 준다. 가변회로 위상 변위기의 회로는 저역통과 여파기와 고역통과 여파기로 구성되어 있다.[6]

III. 변위기의 설계 및 시뮬레이션

6-비트 디지털 변위기는 최소 위상 비트가 $360^{\circ}/2^6 = 5.625^{\circ}$ 의 크기로 증가하며 그림 4와 같이 6단의 단일 위상 비트를 캐스캐이드로 연결하여 기준 위상과의 위상차이를 0° 에서 360° 까지 5.625° 스텝으로 변화시키는 장치로 64단계의 위상변화를 가지게 된다.

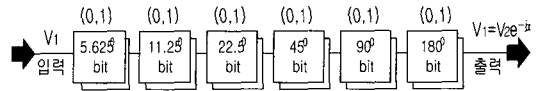


그림 4. 6-비트 디지털 변위기의 구성

Fig. 4. Configuration of 6-bit digital phase shifter.

본 논문에 적용된 6-비트 위상 변위기의 구성은 5.625° , 11.25° , 22.5° 그리고 45° 위상 비트는 부하선로 회로로 구성하고, 90° 위상 비트는 하이브리드 결합 회로 그리고 180° 위상 비트는 가변선로 회로로 구성하였다.

3.1 단일 비트 변위기의 선택

3.1.1 부하선로 변위기

2.1절에서 설명한 단일 비트 부하선로 변위기의 등가회로를 해석하기 위해 그림 5와 같이 나타낸다.

Y_{sr} 는 주 선로에 로딩 되어있는 병렬 스타브의 복소 어드미턴스이고, 전송선로가 손실을 가지지 않는다고 가정하면, ABCD 행렬을 사용하여 다음을 얻을 수 있다.[6]

$$A = D = (\cos \theta - B_{sr} Z_c \sin \theta) + jG_{sr} Z_c \sin \theta \quad (1a)$$

$$B = jZ_c \sin \theta \quad (1b)$$

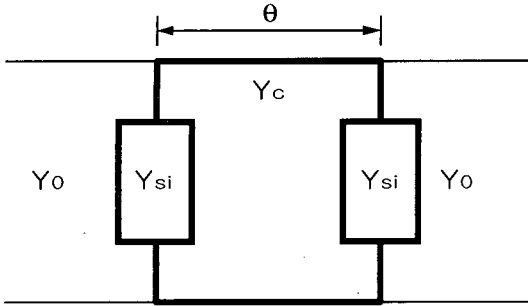


그림 5. 부하선로 변위기의 등가회로

Fig. 5. Equivalent circuit of loaded line phase shifter.

$$C = 2G_{si}(\cos \theta - B_{si}Z_c \sin \theta) + jZ_c[2B_{si}Y_c \cos \theta + (Y_c^2 + G_{si}^2 - B_{si}^2)\sin \theta] \quad (1c)$$

여기서 $Y_{si} = G_{si} + jB_{si}$ ($i=1$ 또는 2)이고 아래 첨자 i 는 두 스위칭 상태중 한 상태를 나타낸다. 식 (1)의 ABCD 행렬을 S 파라미터로 변화하면

$$S_{11} = S_{22} = \frac{BY_0 - CZ_0}{2A + BY_0 + CZ_0} \quad (2a)$$

$$S_{12} = S_{21} = \frac{2}{2A + BY_0 + CZ_0} \quad (2b)$$

이 된다. 다이오드의 저항성분을 무손실 이라고 가정하면, 즉 $G_{si} = 0$ 이 되고 식 (1)은

$$A = D = (\cos \theta - B_{si}Z_c \sin \theta) \quad (3a)$$

$$B = jZ_c \sin \theta \quad (3b)$$

$$C = jZ_c[2B_{si}Y_c \cos \theta + (Y_c^2 - B_{si}^2)\sin \theta] \quad (3c)$$

와 같이된다. 식 (3)을 식 (2)에 대입하면, 반사계수의 진폭 $|S_{11}|$ 과 전송계수 S_{21} 을 구할 수 있으며, 삽입손실 α 는

$$\alpha(dB) = -20 \log_{10} |S_{21}| = -10 \log_{10} [X + Y] \quad (4)$$

$$X = (\cos \theta - B_{s1}Z_c \sin \theta)^2, Y = \left\{ B_{s1}Z_0 \cos \theta + \frac{Z_c Z_0}{2} (Y_0^2 + Y_c^2 - B_{s1}^2) \sin \theta \right\}^2$$

와 같이된다. 입력포트가 완전히 정합 되면 $S_{11} = 0$ 이 되어야 하므로

$$BY_0 = CZ_0 \quad (5)$$

을 만족해야 한다. 따라서 식 (3)을 식 (5)에 대입하면 입력 정합조건

$$(Y_0^2 - Y_c^2 + B_{s1})\sin \theta = 2B_{s1}Y_c \cos \theta \quad (6)$$

을 얻는다. 이 조건으로부터 전송계수는

$$S_{21} = |S_{21}|e^{j\phi} = \frac{1}{(A + BY_0)} \quad (7)$$

이 되고 식 (3)을 이용하면

$$S_{21} = \frac{1}{[(\cos \theta - B_{s1}Z_c \sin \theta) + jZ_c Y_0 \sin \theta]} \quad (8)$$

이다. 정합조건에서 전송계수의 크기는 "1"이어야 하므로 위상각 ϕ 는

$$\cos \phi = \cos \theta - B_{s1}Z_c \sin \theta \quad (9a)$$

$$\sin \phi = -Z_c Y_0 \sin \theta \quad (9b)$$

와 같이 표현될 수 있다. 따라서 위상차 $\Delta\phi$ 는

$$\Delta\phi = \cos^{-1}(\cos \theta - B_{s1}Z_c \sin \theta) - \cos^{-1}(\cos \theta - B_{s2}Z_c \sin \theta) \quad (10)$$

와 같이된다. 만약 ϕ 가 $\pm\Delta\phi/2$ 의 증분에 의해 90° 주위에서 대칭적으로 스위칭 된다고 하면 식 (9)에

$\phi = (90^\circ \pm \Delta\phi/2)$ 을 대입하여 다음과 같이 손실이 없는 부하선로 변위기에 관한 설계식을 얻을 수 있다.

$$Y_c = Y_0 \sin \theta \sec\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (11)$$

$$B_{si} = Y_0 \left[\cos \theta \sec\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \pm \tan\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \right] \quad i=1, 2 \quad (12)$$

로 $G_{si} \neq 0$ 당 어드미턴스가 손실을 가지는 경우, 즉 일 때, 실수부와 허수부는 식 (13)과 식 (14)로 표현되며 이때 식 (13)은 B_{si} 의 한 값만 만족될 수 있으므로 위상 스위칭 동안 입력 정합이 유지되지 않는다.

$$G_{si} (\cos \theta - 2B_{si}Z_c \sin \theta) = 0 \quad (13)$$

$$(Y_0^2 - Y_c^2 + B_{si}^2 - G_{si}^2) \sin \theta - 2B_{si}Y_c \cos \theta = 0 \quad (14)$$

만약 식 (14)을 만족하면서 G_{si} 가 매우 작은 값을 취할 때 손실이 없는 경우로 접근할 수 있다면, 식 (14)이 B_{si} 에 대한 2차 식이므로 두 로딩 서셉턴스를 가질 수 있다. 따라서 식 (14)는 "준 입력 정합조건"을 나타내고 식 (1b)와 식 (14)으로부터 전송계수는

$$S_{21} = \frac{\cos \phi + j \sin \phi}{(1 + G_{si}Z_0)\sqrt{1 + G_{si}^2Z_c^2 \sin^2 \theta}} \quad (15)$$

이 된다. 여기서

$$\cos \phi = \frac{\cos \theta - B_{si}Z_c \sin \theta}{(1 + Z_c^2 G_{si} \sin^2 \theta)^{1/2}} \quad (16a)$$

$$\sin \phi = \frac{-Z_c Y_0 \sin \theta}{(1 + Z_c^2 G_{si} \sin^2 \theta)^{1/2}} \quad (16b)$$

이고, 만약 ϕ 가 무손실의 경우처럼 $(90^\circ \pm \Delta\phi/2)$ 의 두 값 사이에서 스위칭 된다면 식 (15)과 식 (16)는

$$Y_c = Y_0 \left[1 - G_{si}^2 Z_c^2 \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \right]^{1/2} \sin \theta \sec\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (17)$$

$$B_{si} = Y_0 \left[\left\{ 1 - G_{si}^2 Z_c^2 \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \right\}^{1/2} \cos \theta \sec\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \pm \tan\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \right] \quad (18)$$

된다.[5]

3.1.2 하이브리드 결합 변위기

2.2절에서 설명한 반사형 변위기 3-dB, 90° 하이브리드 결합기를 이용한 반사형 변위기가 주로 이용되며, 그림 6은 브랜치라인 하이브리드 결합 변위기의 구성도 이다. 우 모드와 기 모드를 이용한 4 포트 대칭성 결합기를 이용하여 분석한다. 포트 3과 4의 다중 반사는 포트 1에서 포트 2로의 전체 전송계수 T_{21} 과 포트 1에서의 전체 반사계수 Γ_{in} 은 Kori와 Mahapatra에 의해 유도되었다.

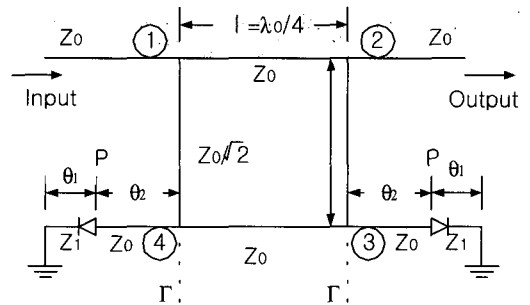


그림 6. 브랜치라인 변위기

Fig. 6. Branchline phase shifter.

$$T_{21} = S_{12} + \Gamma_{in} S_{13} S_{14} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} 1 - \Gamma S_{11} & -\Gamma S_{12} \\ -\Gamma S_{12} & 1 - \Gamma S_{11} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_{14} \\ S_{13} \end{bmatrix}$$

$$\Gamma_{in} = S_{11} + \Gamma_{in} S_{14} S_{13} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} 1 - \Gamma S_{11} & -\Gamma S_{12} \\ -\Gamma S_{12} & 1 - \Gamma S_{11} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_{14} \\ S_{13} \end{bmatrix}$$

$\begin{bmatrix} \Gamma S_{11} & \Gamma S_{12} \\ \Gamma S_{12} & \Gamma S_{11} \end{bmatrix}$ 의 모든 고유값의 크기는 "1"보다

작다라고 가정한다. 식 (19)와 식 (20)은 각각 따로 설계된 반사회로망과 2 단자 변환회로망을 결합했을 때 삽입손실과 위상차를 예측할 수 있다.

3.1.3 가변선로 변위기

가변선로 회로는 올-패스 C-섹션으로 구성하며, 첫 번째 다이오드는 바이패스로 이용되고, 두 번째 다이오드는 입력 정합을 좋게 하기 위해 사용되었다. 다이오드가 이상적이라고 가정하면, 우 모드와 기 모드를 이용하여 설계식을 다음과 같이 쓸 수 있다.[7]

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left[\overline{Y}_{0e} \tan \left(\frac{\Delta \phi_0}{2} \right) \right] \quad (21)$$

$$\Delta \phi = -2 \tan^{-1} \left[\overline{Y}_{0e} \tan \left(\frac{\omega \theta_0}{\omega_0} \right) \right] - \tan^{-1} \left[\overline{Y}_{0e} \cot \left(\frac{\pi \omega}{2 \omega_0} \right) \right] \quad (22)$$

$$|\Gamma_1| = 0 \quad (23)$$

$$|\Gamma| = \left[1 + \overline{Z}_{0e}^2 \tan^2 \left(\frac{\pi \omega}{2 \omega_0} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (24)$$

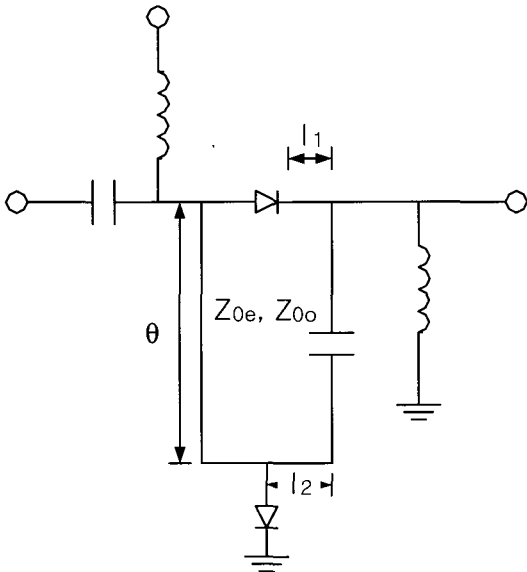


그림 7. 다이오드 루프 binary 변위기
Fig. 7. Diode loop binary phase shifter.

여기서 θ_0 는 설계 주파수 f_0 에서 결합선로 부분의 전기적 길이, $\Delta \phi$ 는 위상차, $\Delta \phi_0$ 는 f_0 의 위상차이다.

3.2 6-비트 디지털 변위기 설계 및 시뮬레이션

2.1절에서 설계 및 시뮬레이션 한 5.625° , 11.25° , 22.5° , 45° , 90° 그리고 180° 단일 위상 비트 변위기를 그림 8과 같이 캐스케이드로 연결하여 6-비트 디지털 변위기를 구현하였다. 6-비트 변위기는 6개의 단일 위상 비트를 스위칭 상태에 따라 위상이 5.625° 스텝의 변화를 가지게 된다.

본 논문에서 제작한 그림 9의 전체 레이아웃 변위기의 실제 크기는 $115.78[\text{mm}] \times 32.77[\text{mm}]$ 이다.

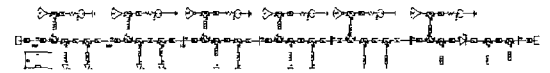


그림 8. 6-비트 변위기 회로
Fig. 8. Circuit of 6-bit phase shifter.

그림 10은 6-비트 디지털 변위기가 5.625° 스텝으로 위상이 변화됨을 보여준다. 기준 위상은 83.53° 이고, 마지막 위상은 89.24° 이다. 시뮬레이션은 $0.76^\circ \sim 1.92^\circ$ 범위의 위상오차가 있다.

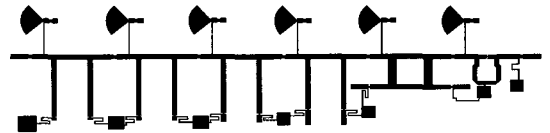


그림 9. 6-비트 변위기의 레이아웃
Fig. 9. Layout of 6-bit phase shifter.

그림 11는 삽입손실의 변화로 $1.22\text{dB} \sim 1.97\text{dB}$ 의 범위에 있다. 반사손실은 $10.07\text{dB} \sim 32.44\text{dB}$ 의 범위에 있다.

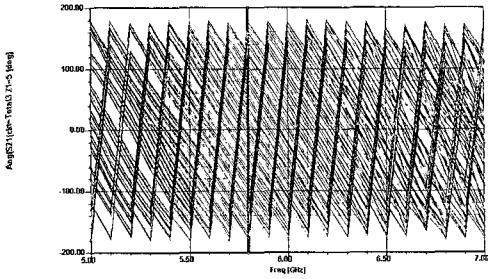


그림 10. 6-비트 디지털 변위기의 5.625° 스텝 위상변화

Fig. 10. 5.625° steps phase shift of 6-bit digital phase shifter.

3.3 실험 결과

본 논문에서 제작한 비트는 180° 변위기, 90° 변위기, 45° 변위기이다. 이중 측정이 가능한 비트는 90° 변위기였다. 제작한 변위기는 HP 8753D 회로망분석기를 이용하여 위상과 삽입손실을 측정하였다. 제작한 비트의 변위기 사진이 그림 12에 나타냈다.

90° 변위기의 측정결과 삽입손실과 위상은 순방향 바이어스와 역방향 바이어스일 때 각각 3.69dB 와 4.30dB 그리고 52.92° 와 134.24° 을 나타내었다. 위상 변화는 81.32° 로 시뮬레이션과의 차이는 8.68° 를 보였다.

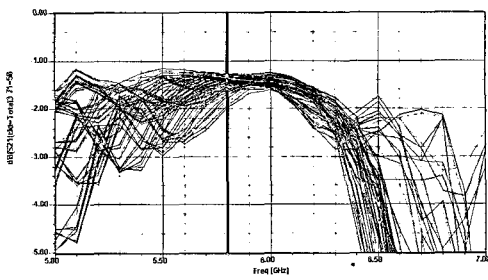


그림 11. 6-비트 디지털 변위기의 5.625° 스텝 삽입손실

Fig. 11. 5.625° steps insertion loss of 6-bit digital phase shifter.

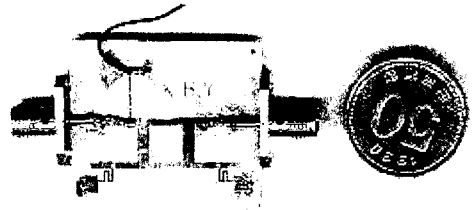
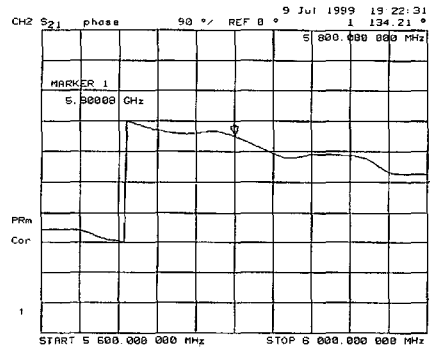


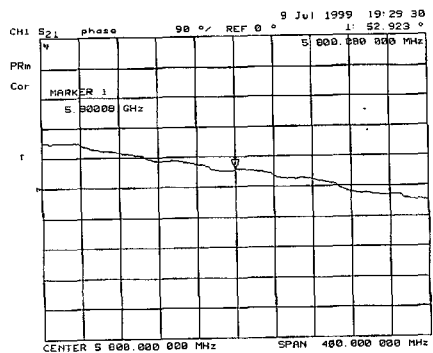
그림 12. 제작한 변위기

Fig. 12. Fabricated phase shifter.



(a) 역방향 바이어스

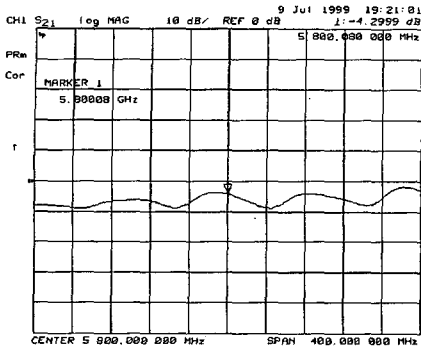
(a) Reverse bias



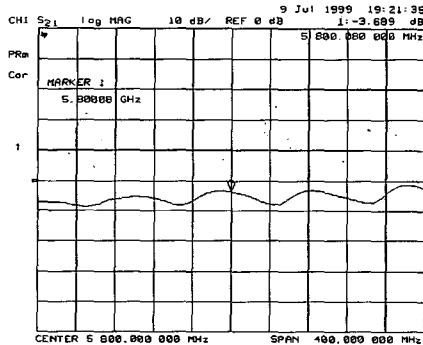
(b) 순방향 바이어스

(b) Forward bias

그림 13. 변위기의 위상변화
Fig. 13. Phase shift of phase shifter.



(a) 역방향 바이어스
(a) Reverse bias



(b) 순방향 바이어스
(b) Forward bias

그림 14. 변위기의 삽입손실

Fig. 14. Insertion loss of phase shifter.

IV. 결 론

시뮬레이션 결과 각 스텝의 삽입손실은 1.22dB ~ 1.97dB이고, 위상오차는 0.76° ~ 1.92° 범위에 있다. 가변선로 변위기에서 다이오드 수를 줄여 전체 삽입 손실이 줄어들었으며, 6-비트 변위기의 크기를 보다 소형화하였다.

제작한 비트는 180°, 90°, 45° 변위기 이었고,

측정이 가능한 변위기는 90° 변위기였다. 중심주파수 5.8GHz에서 삽입손실과 위상변화는 각각 3.689dB ~ 4.30dB 와 81.32° 로 측정되었다. 시뮬레이션과 제작상의 오차는 설계변수로 사용된 다이오드의 on-off 상태의 리액턴스 값의 오차와 제작상의 부정확성 등에 기인한 것으로 고려되며 이러한 오차는 정확한 다이오드 파라미터의 추출과 정밀한 제작과정으로 상당히 개선 될 것으로 생각된다.

앞으로의 연구 방향은 변위기를 MMIC 화하고, 위상 제어 가변 전류 분배기와 배열 안테나를 제작하여 완전한 시스템의 위상배열 안테나를 제작하는 것이다.

참 고 문 헌

- [1] R. V. Garver "An Adjustable Waveguide Phase Changer," *Proc. IRE*, Vol. 35, pp. 1489-1498, Dec. 1947.
- [2] L. Stark, "A Helical Line Scanner for Beam Steering a Linear Array," *IRE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. AP-15, pp. 211-216, April 1957.
- [3] R. W. Burns and L. Stark, "PIN Diodes Advance High Power Phase Shifting," *Microwaves*, Vol. 4, pp. 38-48, Nov. 1965.
- [4] H. T. Friis and W. D. Lewis, "Radar Antennas," *Bell Systems Tech. J.*, Vol. 26, pp. 219, 1947.
- [5] J. F. White, "High Power p-i-n Diode Controlled, Microwave Transmission Phase Shifters," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, Vol. MTT-13, pp. 233-242. Mar 1965.
- [6] R. V. Garver, "Broadband Diode Phase Shifters," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, Vol. MTT-20, pp. 314-323, May 1972.
- [7] '99 안테나 기술 워크샵, 1999. 4.

저 자 소 개



金 漢 錫 (學生會員)

1992년 건국대학교 전자공학과 공학사, 1994년 건국대학교 전자공학과 공학석사, 1997년~1998년 (주) CTI 중앙연구소 주임연구원, 1995년~현재 건국대학교 일반대학원 박사과정.

李 昌 植 (會員申請中)

1975년 경북대학교 전자공학과 공학사.
1986년 경북대학교 전자공학과 공학석사.
1999년 건국대학교 전자공학과 공학박사.
1993년 ~ 현재 대구대학교 정보통신공학부 부교수.



金 勳 龍 (會員申請中)

1997년 수원대학교 전자재료공학과 공학사, 1999년 건국대학교 전자·정보통신공학과 공학석사.



李 鍾 岳 (正會員)

제3권 제 1호 논문 99-01-05 참조.
1976년~현재 건국대학교 전자·정보통신공학과 교수.