

핀 다이오드를 이용한 2.5GHz 부하선로형 디지털 위상변위기의 설계

박진우·박동국*

Design of 2.5GHz Loaded Line Digital Phase Shifter using Pin Diode

Jin-Woo Park, Dong-Kook Park

Abstract

In this paper, a loaded line digital phase shifter operating at 2.5GHz with phase shift angle of 30° , 60° , 90° is described. The phase shifter is the cascade connection of three 30° phase shifter and two pin diode per bit are used as a switching element. The measured results show the phase error of 2° and the insertion loss of 3.5 dB.

1장 서론

범용의 마이크로웨이브 소자로서 위상 변위기는 통신과 레이더 시스템, 마이크로웨이브 계측 장비 등 여러 분야에서 사용되고 있다^{[1],[2]}. 1980년대 이후 여러 가지 형태의 전자적 위상 변위기 소자들이 개발되었으며 대표적인 전자적인 스위칭 소자로서 핀 다이오드가 사용되고 있다. 핀 다이오드를 사용하는 위상변위기는 제작하는 방식에 따라 가변선로형, 하이브리드 결합형, 부하선로형으로 구분된다. 이 가운데 부하선로형 위상변위기^[3]는 45° 이하의 작은 위상차를 얻는데 많이 사용되고 있다.

본 논문에서는 30° 부하선로형 위상변위기를 3단 직렬연결하여 2.5GHz에서 동작하는 30° , 60° , 90° 의 디지털 위상변위기를 설계하고자 한다.

* 한국해양대학교 대학원

** 한국해양대학교 전자공학과

2장 부하선로형 위상변위기의 설계

부하선로형 위상변위기의 등가회로는 그림 2-1과 같다. 여기서 Y_{si} 는 주 전송선로(Y_o)에 붙어있는 병렬 스테브의 복소 어드미턴스를 나타낸다. 부하선로형 위상변위기는 핀 다이오드의 on/off 상태에 따라, 값이 다른 리액턴스 부하가 주 전송선로에 연결이 된다. 병렬로 커패시터가 연결될 때는 전송선로의 전기적 길이가 늘어나며, 병렬로 인덕턴스가 연결되면 전기적 길이가 줄어들게 된다.

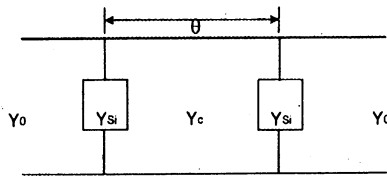


그림 2-1 부하선로형 위상변위기의 등가회로

그러므로 인덕턴스 요소에서 커패시터로 스위칭 함으로 인해 전기적 길이를 증가시켜 위상변위를 일으키게 된다.

위의 등가회로에 대한 ABCD 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ G_{si} + jB_{si} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & jZ_c \sin \theta \\ jY_c \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ G_{si} + jB_{si} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

여기서

$$\begin{aligned} A &= D = (\cos \theta - B_{si}Z_c \sin \theta) + jG_{si}Z_c \sin \theta \\ B &= jZ_c \sin \theta \\ C &= 2G_{si}(\cos \theta - B_{si}Z_c \sin \theta) + jZ_c [2B_{si}Y_c \cos \theta + (Y_c^2 + G_{si}^2 - B_{si}^2) \sin \theta] \end{aligned} \quad (2.2)$$

이며, $Y_{si} = G_{si} + jB_{si}$ ($i=1,2$)으로 첨자 i 는 두 가지 스위칭 상태를 나타낸다.

ABCD행렬의 요소들로서 산란행렬의 요소들을 구하면 다음과 같다.

$$S_{11} = S_{22} = \frac{BY_o - CZ_o}{2A + BY_o + CZ_o} \quad (2.3)$$

$$S_{12} = S_{21} = \frac{2}{2A + BY_o + CZ_o}$$

만약 그림 2-1의 위상변위기에서 병렬 스테브의 컨덕턴스가 $G_{si}=0$ 일 경우 식 (2.2)는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} A &= D = (\cos \theta - B_{si}Z_c \sin \theta) \\ B &= jZ_c \sin \theta \\ C &= jZ_c [2B_{si}Y_c \cos \theta + (Y_c^2 - B_{si}^2) \sin \theta] \end{aligned} \quad (2.4)$$

식 (2.3)으로부터 전달계수 S_{21} 을 구해보면

$$S_{21} = \frac{1}{\left[(\cos \theta - B_{s1} Z_c \sin \theta) + j \left\{ B_{s1} Z_o \cos \theta + \frac{Z_c Z_o}{2} (Y_o^2 + Y_c^2 - B_{s1}^2) \sin \theta \right\} \right]} \quad (2.5)$$

이 된다. 또한 위상변위기의 삽입손실은

$$\begin{aligned} \alpha(dB) &= -20 \log_{10} |S_{21}| \\ &= -10 \log_{10} \left[(\cos \theta - B_{s1} Z_c \sin \theta)^2 + \left\{ B_{s1} Z_o \cos \theta + \frac{Z_c Z_o}{2} (Y_o^2 + Y_c^2 - B_{s1}^2) \sin \theta \right\}^2 \right] \end{aligned} \quad (2.6)$$

가 된다.

한편 입력포트가 완전히 정합($S_{11} = 0$)이 되고, $S_{21} = e^{j\phi}$ 이기 위해서는 위상각 ϕ 가

$$\begin{aligned} \cos \phi &= \cos \theta - B_{s1} Z_c \sin \theta \\ \sin \phi &= -Z_c Y_o \sin \theta \end{aligned} \quad (2.7)$$

이 되어야 한다. 따라서 스위칭에 의한 위상변위 $\Delta\phi$ 는

$$\Delta\phi = \cos^{-1}(\cos \theta - B_{s1} Z_c \sin \theta) - \cos^{-1}(\cos \theta - B_{s2} Z_c \sin \theta) \quad (2.8)$$

이 된다. 식 (2.7)을 보면 $\cos \phi$ 는 두 가지 스위칭 상태, $i=1, 2$ 에서 각각의 값이 있으나, $\sin \phi$ 는 스위칭 상태에 따라 변하지 않으므로 ϕ 는 90° 근처에서 $\pm \Delta\phi/2$ 만큼 대칭적으로 변함을 알 수 있다. 이것을 식 (2.7)에 적용하면,

$$Y_c = Y_o \sin \theta \sec\left(-\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (2.9)$$

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

을 얻을 수 있다.

B_{si} 를 구현하는 방법에서는 병렬스터브 선로의 모양에 따라 여러 가지 형태가 존재할 수 있으나 본 논문에서는 tandem 스테브를 갖는 부하선로형 위상변위기를 설계하고자 한다. 핀 다이오드의 저항 값은 무시하고 $Z_{d1} = jX_f$, $Z_{d2} = jX_r$ 로 근사하고 스테브 부분의 특성 임피던스를 Z_o 로 하는 경우 주 전송선로에서 스테브쪽을 바라본 어드미턴스의 순바이어스와 역바이어스 상태에서의 서셉턴스는 다음과 같다.

$$B_{s1} = Y_o \frac{[(X_p + X_f) \tan \theta_1 - Z_o]}{[(X_p + X_f) + Z_o \tan \theta_1]} \quad (2.10)$$

$$B_{s2} = Y_o \frac{[(X_p + X_r) \tan \theta_1 - Z_o]}{[(X_p + X_r) + Z_o \tan \theta_1]} \quad (2.11)$$

여기서

$$X_p = -Z_o \cot \theta_2 \quad (2.12)$$

으로 두었다. 식 (2.10)와 식 (2.11)에서 $\tan \theta_1$ 를 제거하면, X_p 에 대한 2차 방정식이 얻어진다.

$$X_p^2 + X_p(X_f + X_r) + \frac{(X_f - X_r)(B_{s1}B_{s2}Z_o^2 + 1)}{(B_{s2} - B_{s1})} + Z_o^2 + X_fX_r = 0 \quad (2.13)$$

그리고 식 (2.11)로부터 스테르브의 길이 θ_1 은 B_{s1}, X_p 항으로서 다음과 같이 나타난다.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left[\frac{\{1 + B_{s1}(X_p + X_f)\}Z_o}{(X_f + X_r) - B_{s1}Z_o^2} \right] \quad (2.14)$$

X_f, X_r 및 식 (2.9)을 이용하여 Y_c, B_{s1}, B_{s2} 을 구하고, 식 (2.13)의 2차 방정식을 풀어 X_p 를 구하면 식 (2.12)과 식 (2.14)을 이용하여 θ_1, θ_2 를 구할 수 있어 위상변위기를 설계할 수 있다.

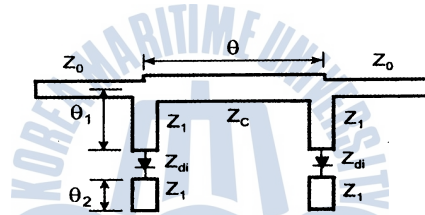


그림 2-2 Tandem 스테르브를 갖는 위상변위기

3장 위상 변위기의 제작과 실험결과

위상변위가 $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 가 되는 위상변위기를 tandem 스테르브 형태의 부하선로형 위상변위기를 3단 직렬연결하여 제작하였다. 유전율 3.38이며, 손실 탄젠트 0.002이고, 기판 두께 32 mil, 도체 두께 $35 \mu\text{m}$ 인 Rogers사의 RO4003 기판을 사용하였으며, 핀 다이오드로는 유도 인덕턴스가 1.0nH이고, 커패시터가 0.33pF인 HP사의 HSMP-4890을 사용하였다. 핀 다이오드를 스테르브에 연결하기 위해 스테르브의 특성 임피던스를 35.35Ω 으로 하고, 주 전송선로의 특성임피던스를 스테르브의 특성임피던스와 같이 35.35Ω 으로 하였다. 또한 50Ω 의 SMA 코넥터와 연결하기 위해 $\lambda/4$ 변환기를 사용하여 입출력단에서 임피던스 정합을 시켰다.

기판상에 실제로 구현한 모양을 그림 3-1에 나타내었다. dc 전압이 입력과 출력단으로 유입되는 것을 막기 위한 dc 차

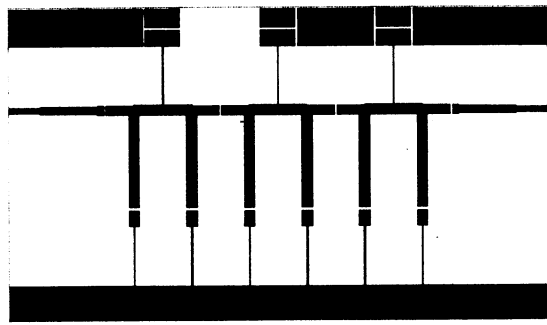


그림 3-1 tandem 스테르브를 갖는 $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 위상변위기

단 커패시터와 4.8 volt의 전원 전압으로부터 다이오드에 흐르는 전류를 제어하기 위한 저항과 RF 전력의 손실을 없애고 효과적으로 dc 바이어스를 인가하기 위해 끝단이 접지된 $\lambda/4$ 길이의 폭이 매우 작은 스테브가 그림 3-1에 보인다.

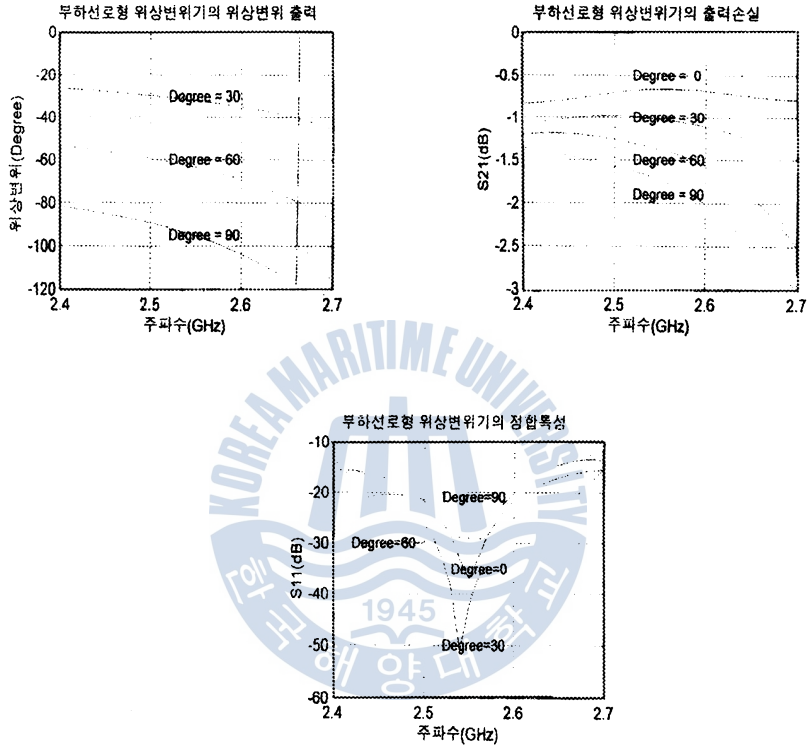
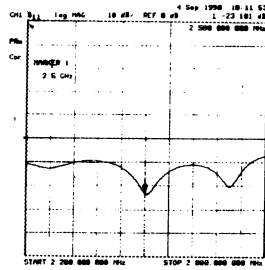


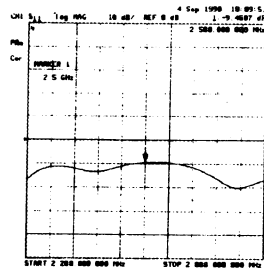
그림 3-2 Touchstone 시뮬레이션 결과

제작에 사용된 핀 다이오드는 작지만 내부 저항이 존재하고, 또한 사용한 유전체 기판이 손실이 있으므로 Touchstone으로 시뮬레이션을 해 본 결과, 2장에서 손실을 무시하고 이론적으로 계산한 θ_1, θ_2 에 작은 값이지만 수정이 필요함을 알았다. θ_1, θ_2 를 수정한 후 Touchstone으로 시뮬레이션한 결과를 그림 3-2에 나타내었다.

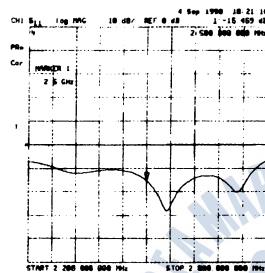
그림 3-3과 그림 3-4에서 다이오드의 on/off스위치에 따른 입력과 출력에서의 return loss를 나타내었다. 다이오드가 모두 off되었을 때는 입력정합을 제외하고는 대략 -12dB 이하의 값을 갖는다. 그림 3-5에 다이오드 on/off에서의 투과 손실을 나타내었다. 다이오드가 전부 off되었을 때 약 3.5 dB 정도의 손실이 있음을 알 수 있다. 이것은 그림 3-3에서 모두 off 되었을 때 입력 측의 정합이 제대로 되지 못해 손실이 크게 생긴 것으로 생각된다. 그림 3-5에는 다이오드 on/off에 따른 30°, 60°, 90° 위상차를 나타내었다. 90°의 경우 약 2°의 위상오차를 나타내고 있으나 전반적으로 위상특성은 이론치와 잘 일치하였다.



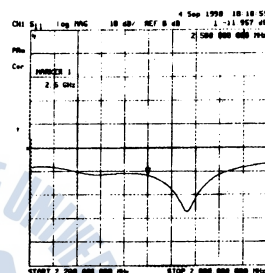
(a) on-on-on



(b) off-off-off

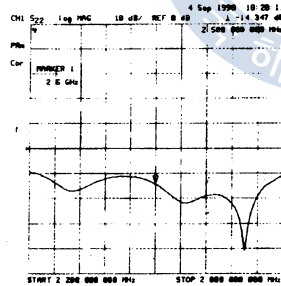


(c) on-on-off

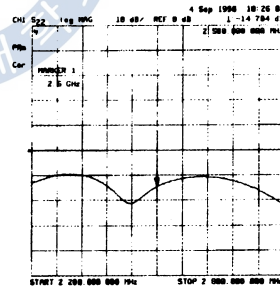


(d) on-off-off

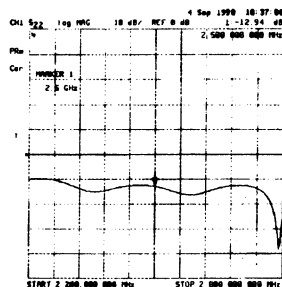
그림 3-3 다이오드 on/off에 따른 입력 return loss



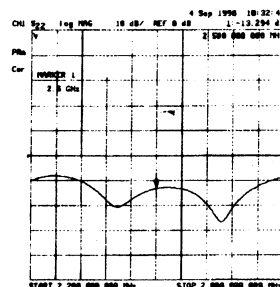
(a) on-on-on



(b) off-off-off



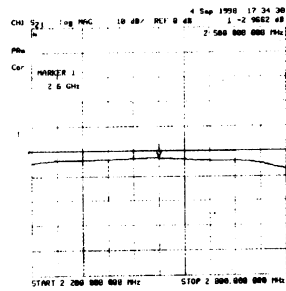
(c) on-on-off



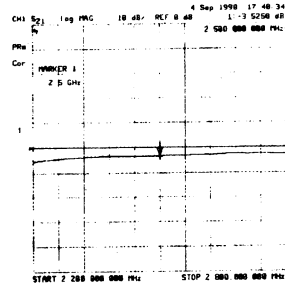
(d) on-off-off

그림 3-4 다이오드 on/off에 따른 출력 return loss

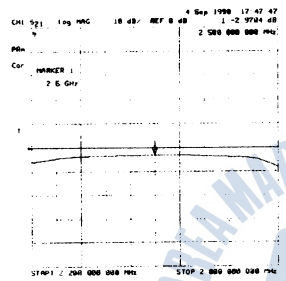
핀 다이오드를 이용한 2.5GHz 부하선로형 디지털 위상변위기의 설계



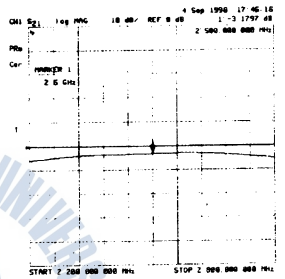
(a)on-on-on



(b)off-off-off

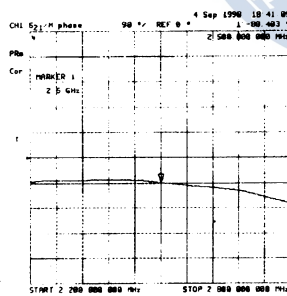


(c)on-on-off

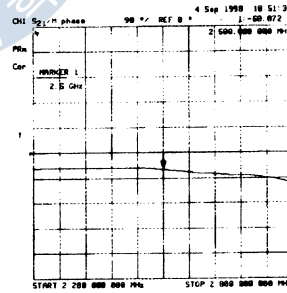


(d)on-off-off

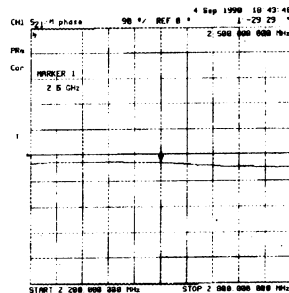
그림 3-5 다이오드 on/off에 따른 투과전달 손실



(a) 90°



(b) 60°



(c) 30°

그림 3-6 다이오드 on/off에 따른 출력 위상차

4장 결론

본 연구에서는 tandem 스테브를 가지는 30° 부하선로형 위상변위기를 3단 직렬 연결하여 30° , 60° , 90° 의 2.5 GHz 대역의 디지털 위상변위기를 설계하였다. 3단으로 제작하여 실험한 결과 위상오차는 약 2° 정도로 이론치와 잘 일치하였으나, 투과손실은 3.5dB로 차이를 보이고 있다. 이것은 편 다이오드를 저항이 없는 이상적인 다이오드로 가정하여 이론적으로 계산을 하였고, 또한 입력측의 정합특성이 나빠져서 삽입손실이 증가한 것으로 생각되므로 다이오드의 저항을 고려한 위상변위기 설계가 요구된다. 한편 본 논문의 방법은 밀리미터파 대역의 30° , 60° , 90° 디지털 위상변위기 설계에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] S. K. Koul and B. Bhat, *Microwave and millimeter wave phase shifters*, Artech House, Boston-London, 1991.
- [2] H. A. Atwater, "Circuit Design of the Loaded-Line Phase Shifter," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol MTT-33, pp. 626-634, July 1985.
- [3] I. J. Bahl and K. C. Gupta, "Design of Loaded Line p-i-n Diode Phase Shifter Circuits," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol MTT-28, pp. 219-224, March 1980.
- [4] S. Ohmori, "Phased Array Antenna for Mobile Satellite Communication Systems," in *Proc. Asia Pacific Microwave Conf.*, pp. 827-830, 1994.
- [5] J. F. White, "Diode Phase Shifters for Array Antennas," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol MTT-22, pp. 658-674, June 1974.