

다기능 투과배열 안테나 단위셀 소형화 설계를 위한 360° 반사형 축소형 아날로그 위상 천이기 설계

Design of Miniaturized 360° Analog Phase Shifter for Multi-Functional Transmit-Array Antenna

황명하 · 김경득 · 이인곤* · 김상길

Myeongha Hwang · Gyoungdeuk Kim · In-Gon Lee* · Sangkil Kim

요 약

본 논문은 다기능 투과배열 안테나를 구성하는 단위셀의 소형화 설계에 응용될 수 있는 축소형 360° 반사형 아날로그 위상 천이기 설계에 대한 비교 연구이다. 본 연구에서는 1단 및 2단 반사형 위상 천이기를 제안하고, 두 위상 천이기의 성능을 비교 분석하였다. 두 위상 천이기 모두 일반적인 단위셀 면적($0.5 \lambda_0 \times 0.5 \lambda_0$)의 절반 이내 크기인 $0.2 \lambda_0 \times 0.4 \lambda_0$ 안에 들어갈 수 있도록 설계되었으며, 360° 이상의 위상 천이 범위를 가진다. 1단 위상 천이기는 넓은 위상 천이 범위를 구현하기 위해 소형화된 하이브리드 커플러와 1/4 파장 전송선로 및 추가적인 소자들이 요구되며, 이에 의해 위상 천이기는 제어 전압 대비 일정하지 않은 삽입 손실 분포와 4.3 dB의 최대 삽입 손실 성능을 가진다. 1단 위상 천이기를 개선한 2단 위상 천이기의 경우, 간단한 회로 구조로 인하여 전압 대비 비교적 일정한 삽입 손실 분포와 2.5 dB의 최대 삽입 손실 성능을 가진다.

Abstract

This study compares the designs of one-stage and two-stage reflection-type phase shifters for miniaturized S-band multi-functional transmit-array antennas. Both phase shifters have areas smaller than $0.2 \lambda_0 \times 0.4 \lambda_0$, which is less than half of the conventional unit cell size of $0.5 \lambda_0 \times 0.5 \lambda_0$, and both phase shifters have a phase shifting range of more than 360°. The one-stage phase shifter requires a miniaturized hybrid coupler, 1/4 wavelength transmission line, and additional elements to implement a wide phase shifting range; hence, the phase shifter has a non-uniform insertion loss distribution and a peak insertion loss of 4.3 dB. The two-stage phase shifter outperformed the one-stage phase shifter; it had a relatively uniform insertion loss distribution of 2.5 dB because of its simple circuit structure.

Key words: Reflection-Type Phase Shifter, Miniaturized Phase Shifter

「본 연구는 2019년 국방과학기술연구소 미래도전국방기술 연구개발사업(9127786)의 지원을 받았습니다.」

부산대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Pusan National University)

*한화시스템 특수레이다팀(Specific Radar Team, Hanwha Systems)

· Manuscript received November 25, 2022 ; Revised December 20, 2022 ; Accepted January 20, 2023. (ID No. 20221125-100)

· Corresponding Author: Sangkil Kim (e-mail: ksangkil3@pusan.ac.kr)

I. 서 론

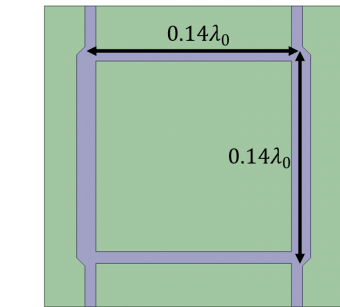
위상 천이기(phase shifter)는 입력된 신호의 위상을 원하는 위상으로 천이시키는 회로로서, 능동위상배열(active phased array) 안테나, 반사배열(reflectarray) 및 투과배열(transmitarray) 안테나 등의 배열 안테나 시스템에서 널리 사용된다. 배열 안테나 시스템은 빔조향(beam-steering) 기능이 필수적인 차세대 통신용의 필수적인 시스템으로, 최근에 활발히 연구되고 있는 지능형 반사표면(reconfigurable intelligent surface, RIS)이나 무인항공기(unmanned aerial vehicle, UAV) 또는 저궤도(low earth orbit, LEO) 위성 통신에 응용된다^{[1]~[3]}. 특히, 작은 물리적 크기를 가지는 저궤도 위성이나 드론에 고성능 무선 통신/감지 시스템을 탑재하기 위해서는 안테나 시스템의 소형화 및 경량 설계가 필수적이며, 이를 위해 다른 소자들보다 비교적 큰 면적을 차지하는 위상 천이기의 소형화 설계 기술이 매우 중요하다.

위상 천이기는 안테나 시스템에서 요구하는 위상 천이기의 해상도 및 삽입 손실(insertion loss) 등의 사양을 고려하여 설계된다. RF 위상 천이기의 종류는 크게 PIN 다이오드를 사용하는 디지털 위상 천이기와 벡터(varactor) 다이오드를 사용하는 아날로그 위상 천이기로 분류될 수 있다. 배열 안테나에서 일반적으로 설계되는 1-bit 또는 2-bit 디지털 위상 천이기의 경우 간단한 회로 구조와 이로 인한 낮은 삽입 손실의 이점이 있지만, 낮은 위상 천이 해상도에 의해 배열 안테나의 빔 조향 해상도가 낮을 뿐만 아니라 양자화 에러(quantization error)에 의한 성능이 열화된다는 단점이 있다. 배열 안테나의 빔 조향 해상도를 향상하기 위해 3-bit 이상 해상도의 위상 천이기를 구현한다면, 디지털 위상 천이기의 구조가 위상 상태 수에 비례하여 복잡해지므로 1-bit 또는 2-bit 위상 천이기의 구조적 단순함에서 오는 이점이 사라지게 된다. 이에 반해 아날로그 위상 천이기는 연속적인 위상 천이가 가능하여 높은 위상 천이 해상도의 장점이 있지만 비교적 구조가 복잡할 뿐만 아니라, 벡터 및 다른 회로 구성 요소 사이의 LC 공진에 의해 상대적으로 높은 삽입 손실을 가진다.

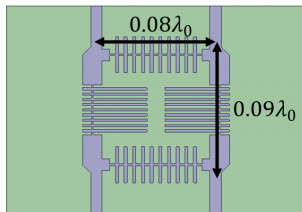
높은 위상 천이 해상도를 가진 아날로그 위상 천이기는

주로 부하 라인(loaded line) 구조^{[4]~[6]}, 결합 라인(coupled line) 구조^{[7],[8]} 그리고 하이브리드 커플러(hybrid coupler)를 이용한 반사형(reflection-type) 구조^{[9]~[14]}로 설계된다. 부하 라인 구조는 좁은 위상 천이 범위 특성으로 인하여 360° 이상의 위상 천이 범위를 구현하기 위해 다단 캐스케이드(cascade) 구조로 설계된다. 이러한 단수(stage)의 증가는 위상 천이기 회로 하나의 크기가 작다고 하더라도 여러 개의 회로로 구성되기 때문에 큰 영역을 차지하게 된다. 결합 라인 구조는 결합계수를 결정하는 결합 라인 사이의 간격이 허용 공정 사양과 제작 공정 오차에 의한 영향을 크게 받게 되므로 주파수가 올라갈수록 설계가 어려워진다. 특히 mmWave 미만의 주파수 대역에서 주로 사용되는 PCB(printed circuit board) 공정으로 설계하는 경우, 일반적으로 신호선 간 간격이 최소 0.1 mm로 제약이 있기 때문에 5G 통신 주파수 대역의 높은 결합계수를 가지는 결합 라인을 설계하는 데 한계가 있다. 반사형 위상 천이기의 경우, 이전에 보고된 넓은 위상 천이 범위를 가지는 위상 천이 설계 방법들^{[11],[12]}을 통해 1단으로 360° 이상의 위상 천이 범위를 구현함으로써, 위에서 언급한 다른 위상 천이기 구조들의 단점을 보완할 수 있다. 반사형 위상 천이기는 하이브리드 커플러(hybrid coupler)의 1/4 파장 브랜치라인(branch-line)에 의해 필연적으로 큰 물리적인 공간을 차지하는 특징이 있다. 이를 개선하기 위해 본 논문에서는 기존 하이브리드 커플러의 1/4 파장 브랜치라인을 인덕티브 스텔브 로딩(inductive stub loading)을 통한 서파(slow-wave) 특성의 계단형 임피던스(steped impedance) 전송선로로 대체하여, 기존 하이브리드 커플러와 동일하게 동작하는 소형화된 하이브리드 커플러를 설계하였으며, 그림 1은 FR4 기판에서 제작된 기준 $0.14 \lambda_0 \times 0.14 \lambda_0$ 커플러 면적대비 36 % ($0.08 \lambda_0 \times 0.09 \lambda_0$)로 소형화된 하이브리드 커플러를 나타낸다^[15].

본 논문은 위의 소형화된 하이브리드 커플러 구조를 활용하여 소형화된 S-대역 다기능 투과배열 안테나 단위셀 구조에 응용을 위한 위상 천이기 설계에 대한 연구를 수행하였다. 본 논문에서 제안하는 1단 및 2단 반사형 위상 천이기 모두 일반적인 단위셀 면적($0.5 \lambda_0 \times 0.5 \lambda_0$)의 절반 이내 크기인 $0.2 \lambda_0 \times 0.4 \lambda_0$ 안에 들어갈 수 있도록 설계되었으며, 제작 시 Taconic사의 0.25 mm의 RF-35



(a) 기존의 하이브리드 커플러
(a) Conventional design coupler



(b) 소형화된 하이브리드 커플러
(b) Proposed miniaturized design coupler

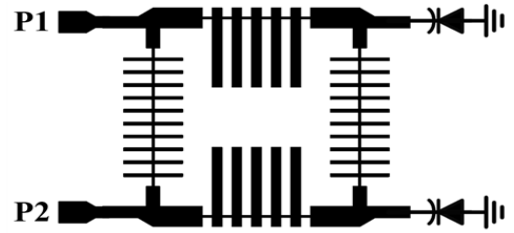
그림 1. 소형화된 하이브리드 커플러 레이아웃
Fig. 1. Layout of miniaturized hybrid coupler.

저손실 기판($\epsilon_r=3.5$, $\tan \delta=0.0018$)이 사용되었다. 설계 검증 시 co-simulation을 위해 Ansys사의 유한요소 해석틀인 HFSS 2021 R1과 Keysight사의 ADS 2021 프로그램을 사용하였다.

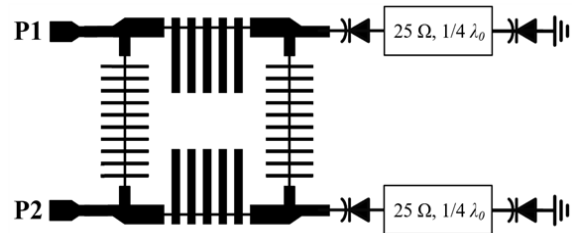
본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 1단으로 구성된 360° 이상의 위상 천이 범위를 가지는 위상 천이기 설계 방법과 설계 및 제작 시 고려해야 하는 문제에 대해 논의한다. III장에서는 1단 반사형 위상 천이기의 단점을 개선한 2단 반사형 위상 천이기 설계 방법을 제안하고, 설계된 1단 및 2단 반사형 위상 천이기를 비교한다. 마지막으로 IV장에서 본 연구를 정리한다.

II. 1단 위상천이기 설계

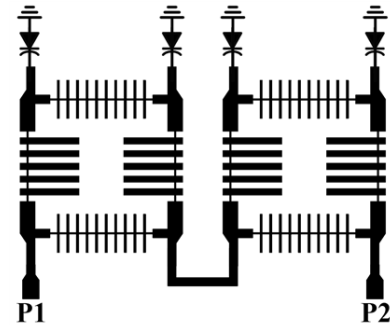
그림 2는 반사형 위상 천이기의 회로도를 나타낸다. 그림 2(b) 및 그림 2(c)의 제안하는 1단 및 2단 반사형 위상 천이기는 그림 2(a)의 일반적인 반사형 위상 천이기와 같이 하이브리드 커플러의 각 출력포트에 리액티브 부하(reactive load)를 구성하는 벡터 다이오드가 연결된다.



(a) 일반적인 위상 천이기
(a) Conventional phase shifter



(b) 1단 위상 천이기
(b) One-stage phase shifter



(c) 2단 위상 천이기
(c) Two-stage phase shifter

그림 2. 반사형 위상 천이기 회로도

Fig. 2. Circuit diagram of 1-stage reflection-type phase shifter.

설계 시 사용된 벡터 다이오드는 MACOM사의 MAVR-000120-1411 모델이며^[16], 제조사에서 제공한 데이터시트에 따라 벡터 다이오드는 그림 3과 같이 등가 회로 모델로 표현될 수 있다. 본 연구에서는 벡터 다이오드를 접합 커패시턴스(junction capacitance; C_j)와 직렬 연결된 기생 저항(parasitic resistance; $R_s=1 \Omega$) 및 기생 인덕턴스(parasitic inductance; $L_p=0.4 \text{ nH}$), 병렬 연결된 기생 커패시턴스(parasitic capacitance; $C_p=0.1 \text{ pF}$)로 모델링하였다. 설계에 사용된 벡터 다이오드는 0~10 V의 DC 바이어스

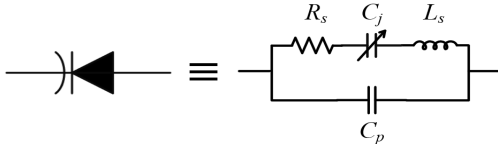


그림 3. 버랙터 다이오드 등가 회로 모델

Fig. 3. Equivalent circuit model of a varactor diode.

전압에 따라 커패시턴스값이 변하게 되며, 이에 따라 리액티브 로드에서 의한 반사 계수(reflection coefficient)의 위상이 변하게 된다.

일반적인 반사형 위상 천이기의 경우, 각 그림 2(a)와 같이 하나의 버랙터 다이오드로 구성된 부하로 임피던스를 조절하지만, 제안하는 1단 위상 천이기는 그림 2(b)와 같이 변조 임피던스 변위를 넓히기 위하여 25 Ω의 임피던스를 가지는 1/4 파장 전송선로를 도입하여 하나의 버랙터가 더 추가된 구조이다. 일반적인 반사형 위상 천이기의 반사 계수(식 (1))와 삽입 손실(식 (2)) 및 위상 천이기의 위상천이(식 (3)) 이론값과 제안하는 반사형 위상 천이기의 반사 계수(식 (4))와 삽입 손실(식 (5)) 및 위상 천이기의 위상천이(식 (6)) 이론값은 아래 식과 같이 표현할 수 있다^[12].

$$\Gamma^{one} = \left(\frac{(2r_z R_s R_p - R_s Z_0 - R_p Z_0) + jX_L(2r_z R_p - Z_0)}{(2r_z R_s R_p + R_s Z_0 + R_p Z_0) + jX_L(2r_z R_p + Z_0)} \right) \quad (1)$$

$$IL_{(dB)}^{one} = 20 \times \log_{10} \left| \frac{Z_0 + \sqrt{Z_0^2 + 16r_z^2 R_s^2} - 4r_z R_s}{Z_0 + \sqrt{Z_0^2 + 16r_z^2 R_s^2} + 4r_z R_s} \right| \quad (2)$$

$$\Delta\phi_{max}^{one} = 4 \tan^{-1} \left[\frac{r_z \Delta X_L}{Z_0} \frac{Z_0(Z_0 + \sqrt{Z_0^2 + 16r_z^2 R_s^2} + 4r_z R_s)}{(Z_0 + 2r_z R_s)(Z_0 + \sqrt{Z_0^2 + 16r_z^2 R_s^2}) + 8r_z^2 R_s^2} \right] \quad (3)$$

$$\Gamma^{two} = \left(\frac{(2r_z R_s R_p - R_s Z_0 - R_p Z_0) + jX_L(2r_z R_p - Z_0)}{(2r_z R_s R_p + R_s Z_0 + R_p Z_0) + jX_L(2r_z R_p + Z_0)} \right)^2 \quad (4)$$

$$IL_{(dB)}^{two} = 40 \times \log_{10} \left| \frac{Z_0 + \sqrt{Z_0^2 + 16r_z^2 R_s^2} - 4r_z R_s}{Z_0 + \sqrt{Z_0^2 + 16r_z^2 R_s^2} + 4r_z R_s} \right| \quad (5)$$

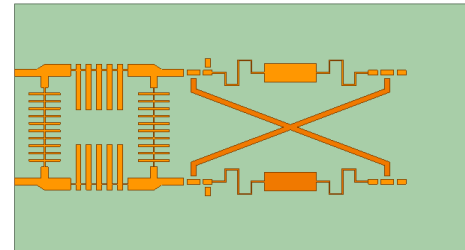
$$\Delta\phi_{max}^{two} = 8 \tan^{-1} \left[\frac{r_z \Delta X_L}{Z_0} \frac{Z_0(Z_0 + \sqrt{Z_0^2 + 16r_z^2 R_s^2} + 4r_z R_s)}{(Z_0 + 2r_z R_s)(Z_0 + \sqrt{Z_0^2 + 16r_z^2 R_s^2}) + 8r_z^2 R_s^2} \right]$$

$$(Z_0 = 50\Omega, r_z = 1, X_L = \omega L_s - 1/\omega C_v, R_s \text{ and } R_p \text{ : 버랙터 등가 회로 모델 리액턴스와 직렬/병렬 저항}) \quad (6)$$

위 이론적 값을 통해 두 반사형 위상 천이기의 성능을 비교해 보면, 1단 위상 천이기는 일반적인 반사형 위상 천이기에 비해 1/4 파장 전송선로와 추가된 버랙터 다이오드에 의한 위상천이 범위가 두 배로 증가한 것뿐만 아니라, 반사 계수와 삽입 손실이 3 dB 증가한 것을 알 수 있다.

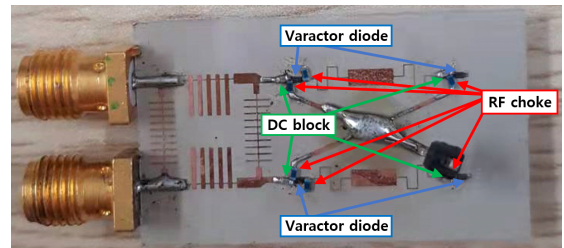
그림 4는 제안하는 1단 반사형 위상 천이기의 PCB 레이아웃(그림 4(a))과 제작된 회로(그림 4(b))를 보여준다. 레이아웃을 보면 실제 제작 시 각 버랙터를 제어하기 위한 DC 블록(block) 및 RF 초크(choke)의 실장 패드와 삽입 손실 및 위상 천이 범위 최적화에 사용된 인덕티브한 특성을 가지는 전송선로를 확인할 수 있다. 추가적으로 사용된 소자들의 정보는 표 1에 정리되었으며, 이를 통해 추가된 버랙터 다이오드 제어를 위해 10개의 소자가 추가로 사용되었음을 알 수 있다.

1단 반사형 위상 천이기의 리액티브 부하 최적화는 위상 천이 범위를 넓히기 위해 도입한 25 Ω 1/4 파장 전송선 구조, 바이어스 라인을 구성하기 위해 추가된 DC 블록과 RF 초크, 리액티브 부하의 기생 성분 그리고 버랙터 다이오드의 모든 리액티브 부하 구성 요소의 상호 작용



(a) PCB 레이아웃

(a) PCB layout



(b) 제작된 회로 사진

(b) A fabricated circuit.

그림 4. 제작된 1단 반사형 위상 천이기

Fig. 4. Fabricated 1-stage reflection-type phase shifter.

표 1. 사용된 RF 초크 및 DC 블록
Table 1. The used RF choke and DC block.

Element type	Part number	Number of elements	
		One-stage phase shifter	Two-stage phase shifter
Inductor (RF choke)	0402CT-56NX_RW (56 nH)	6	1
Capacitor (DC block)	CRT1555C1E102JA02 D (1 nF)	4	0

및 공진을 고려해야 한다. 최적화는 레이아웃을 full-wave EM HFSS 모의 실험 후, 추가된 소자들과 함께 회로 모델로 ADS 모의 실험을 통해 진행되었다. 1단 위상 천이기의 경우의 인덕티브한 특성을 가지는 전송선로는 25 Ω 1/4 파장 전송선을 고려하여 4.4 nH에 해당하는 인덕티브한 특성을 가지도록 0.1 mm 폭, 8 mm 길이의 구불구불한 전송선로(meander line)로 최적화되었다. 제안하는 1단 반사형 위상 천이기는 1/4 파장 전송선 구조 도입에 의해 높은 최적화 난이도와 추가적인 소자에 의해 회로 높은 제작 난이도를 가졌다.

그림 5는 중심주파수에서 0~10 V DC 바이어스 전압에 따른 1단 위상 천이기의 삽입 손실과 위상 천이값을 나타낸다. 측정된 위상 천이 범위는 360° 이상으로 목적에 부합하게 나타났다. 그러나 삽입 손실의 경우, DC 바이어스 전압에 따라 일정하지 않을 뿐만 아니라, 최대 삽입 손실이 4~5 V 사이에서 4.3 dB로 나타났다. 이는 일

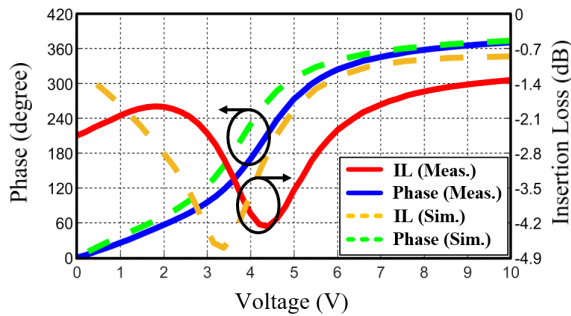


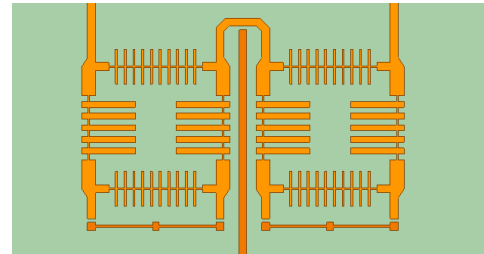
그림 5. 1단 반사형 위상 천이기의 DC 바이어스 전압에 따른 위상 천이 및 삽입 손실

Fig. 5. The values of phase shifting and insertion loss according to DC bias voltage of 1-stage reflection-type phase shifter.

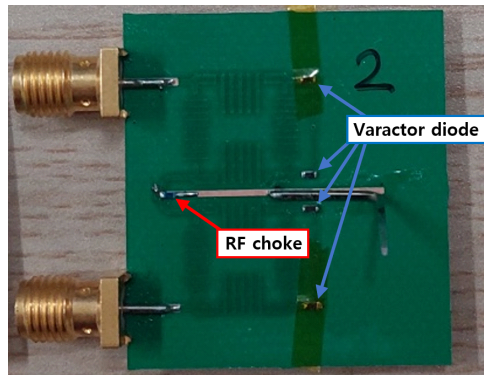
반적인 반사형 위상 천이기의 위상 천이가 크게 일어나는 전압 구간에서 높은 삽입 손실이 발생하는 현상^{[9],[10]}이 제안하는 위상 천이기의 3~6 V 전압 구간에서 나타난 것을 알 수 있다. 이는 주어진 DC 바이어스 전압 범위 내에서 더욱 넓은 위상 천이 범위를 구현하려면 필연적으로 더 높은 삽입 손실을 감안해야 함을 의미한다. 더 낮은 삽입 손실을 가지는 위상 천이기를 구현하려면 리액티브 부하가 다른 형태로 구성되어야 한다.

Ⅲ. 2단 위상 천이기 설계

제안하는 2단 위상 천이기는 II장에서 언급한 1단 위상 천이기의 문제를 극복하기 위해 그림 2(c)와 같이 기존 위상 천이기 2개를 캐스케이드로 구성하였으며, 제작된 2단 반사형 위상 천이기를 그림 6에 나타냈다. 넓은 공간을 차지하게 되는 캐스케이드 구조를 주어진 0.2 $\lambda_0 \times 0.4$



(a) PCB 레이아웃
(a) Circuit layout



(b) 제작된 회로 사진
(b) Fabricated circuit

그림 6. 제작된 2단 반사형 위상 천이기

Fig. 6. Fabricated 2-stage reflection-type phase shifter.

λ_0 크기 이내로 제작하기 위해 두 커플러 출력단의 각각 연결된 버랙터 다이오드의 접지 패드를 공유하도록 설계하여 회로의 크기를 최소화하였다. 기존 위상 천이기를 캐스캐이드 구조로 설계하게 될 경우 II장에서 논의한 1단 반사형 위상 천이기와 달리 추가적인 소자가 필요로 하지 않아 위에서 언급한 식 (2) 및 식 (3)의 이론적으로 표현되는 삽입 손실과 위상 천이 범위에 근사하게 구현될 수 있다. 표 1에 나타낸 것과 같이 2단 위상 천이기는 추가적인 소자가 1단 위상 천이기에 비해 현저히 적으므로, 삽입 손실과 위상 천이 범위 최적화의 복잡도가 증가하지 않아 원하는 주파수 대역에서 반사형 위상 천이기를 최적화하기 매우 용이하다.

그림 7은 중심주파수에서 0~10 V DC 바이어스 전압에 따른 2단 반사형 위상 천이기의 측정된 삽입 손실과 위상 천이값을 나타낸다. 2단 반사형 위상 천이기 역시

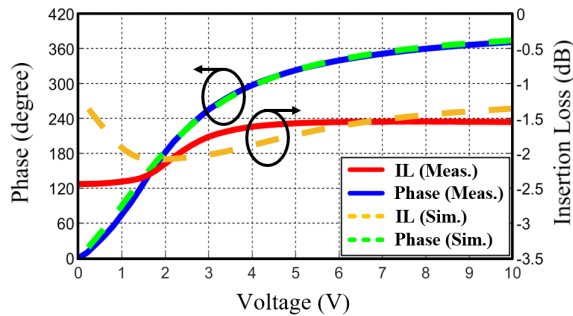


그림 7. 2단 반사형 위상 천이기의 DC 바이어스 전압에 따른 위상 천이 및 삽입 손실

Fig. 7. The values of phase shifting and insertion loss according to DC bias voltage of 2-stage reflection-type phase shifter.

360° 이상의 위상 천이 범위를 가지며, 1단 반사형 위상 천이기와는 달리 기생성분에 의한 공진 최적화가 용이하여 0~10 V DC 바이어스 전압 구간에서 삽입 손실값의 분포가 고르게 나타날 뿐만 아니라, 최대 삽입 손실이 0~3 V 구간에서 약 2.5 dB로 비교적 낮은 값을 가진다. 이는 1단 반사형 위상 천이기의 높고 일정하지 않은 삽입 손실을 개선했음을 알 수 있다.

개선된 삽입 손실은 1단 위상 천이기의 위상 천이가 크게 일어나는 3~6 V 전압 구간을 2단 위상 천이기에서 0~3 V로 이동시켜 최적화되었다. 이에 따라 공진에 의한 최대 삽입 손실 또한 0~3 V 범위로 이동하여 3 V 이후 삽입 손실은 일정한 분포를 보여준다. 이 전압 구간을 이동 시킴으로써 240° 위상 천이를 만들기 위해 2단 반사형 위상 천이기는 2.8 V 전압을 인가해야 하는 반면, 그림 5의 1단 반사형 위상 천이기의 경우 4.6 V의 전압을 인가해야 한다. 표 2는 이전에 보고된 S대역에서 동작하는 반사형 위상 천이기들과의 성능 비교를 나타낸다. 본 논문에서 제안하는 1단 위상 천이기를 개선한 2단 위상 천이기는 작은 회로 크기로 360° 이상의 넓은 위상 천이 범위를 구현했음을 보여준다. 또한 제안하는 1단 및 2단 위상 천이기 모두 위상 변화가 큰 제어 전압 구간에서 1 deg 해상도로 제어하기 위해 10 mV의 제어 전압 해상도가 요구된다. 그러나 10 mV보다 낮은 전압 제어 해상도의 시스템 환경에서 2단 위상 천이기가 사용된 각 단위셀의 요구되는 위상값이 대부분 삽입 손실이 큰 0~3 V DC 바이어스 범위에 분포할 경우, 배열 안테나의 성능 저하가 발생할 것이다. 이때, 요구되는 위상값의 오프셋(offset)을 설정하여 3 V 이상의 바이어스 전압 범위에서 위상값이

표 2. 1단 및 2단 반사 위상 천이기 성능 비교

Table 2. Performance comparison of 1-stage and 2-stage reflection-type phase shifters.

	Circuit size ($\lambda_g \times \lambda_g$)	IL (dB)	Phase shifting range	Number of varactor diodes	Required maximum DC control voltage resolution
Ref. [12]	n/a	4.4±0.2	0~407°	4	n/a
Ref. [13]	0.35×0.65	1.4±0.9	0~220°	2	n/a
Ref. [14]	n/a	1.3±0.3	0~147°	2	n/a
One-stage phase shifter	0.2×0.52	2.8±1.5	0~370°	4	10 mV/deg
Two-stage phase shifter	0.26×0.39	2±0.5	0~370°	4	10 mV/deg

분포하도록 위상 오프셋값을 최적화하면 배열 안테나의 성능 저하를 개선할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문은 S-대역 다기능 투과배열 안테나 단위셀 소형화 설계를 위한 반사형 위상 천이기 최적 설계에 대하여 논의하였다. 앞서 논의한 1단 및 2단 반사형 위상 천이기의 성능을 비교했다. 두 위상 천이기 모두 일반적인 단위셀 면적($0.5 \lambda_0 \times 0.5 \lambda_0$)의 절반 이내 크기인 $0.2 \lambda_0 \times 0.4 \lambda_0$ 안에 들어갈 수 있도록 설계되었으며, 360° 이상의 위상 천이 범위를 가진다. 1단 위상 천이기는 넓은 위상 천이 범위를 구현하기 위해 1/4 파장 전송선로 및 추가적인 소자들이 요구되고, 이에 의해 제어 전압에 대비 일정하지 않은 삽입 손실의 분포와 4.3 dB의 최대 삽입 손실 성능을 가진다. 1단 위상 천이기를 개선한 2단 위상 천이기의 경우, 비교적 간단한 회로 구조에 의해 일정한 삽입 손실 분포와 비교적 낮은 2.5 dB의 최대 삽입 손실 성능을 가진다. 본 논문에서 제시한 반사형 위상 천이기는 차세대 통신용 배열 안테나 응용 설계에 널리 사용될 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] M. Jian, G. C. Alexandropoulos, E. Basar, C. Huang, R. Liu, and Y. Liu, et al., "Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications: Overview of hardware designs, channel models, and estimation techniques," *Intelligent and Converged Networks*, vol. 3, no. 1, pp. 1-32, Mar. 2022.
- [2] Z. Xiao, L. Zhu, Y. Liu, P. Yi, R. Zhang, and X. G. Xia, et al., "A survey on millimeter-wave beamforming enabled UAV communications and networking," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 1, pp. 557-610, 2022.
- [3] M. Centenaro, C. E. Costa, F. Granelli, C. Sacchi, and L. Vangelista, "A survey on technologies, standards and open challenges in satellite IoT," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 3, pp. 1693-1720, 2021.
- [4] H. A. Atwater, "Circuit design of the loaded-line phase shifter," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 33, no. 7, pp. 626-634, Jul. 1985.
- [5] A. S. Nagra, R. A. York, "Distributed analog phase shifters with low insertion loss," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 9, pp. 1705-1711, Sep. 1999.
- [6] F. Ellinger, H. Jackel, and W. Bachtold, "Varactor-loaded transmission-line phase shifter at C-band using lumped elements," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 51, no. 4, pp. 1135-1140, Apr. 2003.
- [7] C. E. Free, C. S. Aitchison, "Improved analysis and design of coupled-line phase shifters," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 43, no. 9, pp. 2126-2131, Sep. 1995.
- [8] J. J. P. Venter, T. Stander, and P. Ferrari, "X-band reflection-type phase shifters using coupled-line couplers on single-layer RF PCB," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 28, no. 9, pp. 807-809, Sep. 2018.
- [9] H. C. Jeong, B. I. Son, D. H. Lee, A. R. Ahmed, and K. W. Yeom, "Design of a miniaturized 5.3 GHz 360° analog phase shifter," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 24, no. 6, pp. 602-612, Jun. 2013.
- [10] A. Singh, M. K. Mandal, "Electronically tunable reflection type phase shifters," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 67, no. 3, pp. 425-429, Mar. 2020.
- [11] T. W. Li, H. Wang, "A millimeter-wave fully integrated passive reflection-type phase shifter with transformer-based multi-resonance loads for 360° phase shifting," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 65, no. 4, pp. 1406-1419, Apr. 2018.
- [12] C. S. Lin, S. F. Chang, and W. C. Hsiao, "A full-360° reflection-type phase shifter with constant insertion loss," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 18, no. 2, pp. 106-108, Feb. 2008.

- [13] J. Hu, X. Yang, L. Ge, and H. Wong, "A polarization and beam steering reconfigurable cavity-backed magneto-electric dipole antenna array using reflection-type phase shifter," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 1, pp. 296-306, Jan. 2022.
- [14] B. An, G. Chaudhary, and Y. Jeong, "Wideband tunable phase shifter with low in-band phase deviation using coupled line," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 28, no. 8, pp. 678-680, Aug. 2018.
- [15] M. Hwang, G. Kim, S. Kim, and J. Kim. "Miniaturized unit cell design and verification of multi-functional transmissive meta-surface for S-band radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 1, pp. 12-19, Jan. 2022.
- [16] MACOM, "Solderable GaAs constant gamma flip-chip varactor diode." Available: https://cdn.macom.com/data_sheets/MAVR-000120-1411.pdf

황 명 하 [부산대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-2517-9698>



2020년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
2020년 3월~현재: 부산대학교 전자전기 공학과 석·박사 통합과정
[주 관심분야] 배열 안테나 및 RF 시스템

이 인 곤 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3974-4766>



2013년 2월: 공주대학교 정보통신공학부 전파공학과 (공학사)
2015년 8월: 공주대학교 정보통신공학과 (공학석사)
2020년 2월: 공주대학교 정보통신공학과 (공학박사)
2021년 10월: 공주대학교 스마트자연공간 연구센터 박사후연구원

2021년 11월~현재: 한화시스템 특수레이다팀 전문연구원
[주 관심분야] RF 회로 및 시스템, 투과배열 안테나, 메타표면 구조

김 경 득 [부산대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-2752-1087>



2020년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
2020년 3월~현재: 부산대학교 전기전자 공학과 석·박사통합과정
[주 관심분야] 안테나, RF 회로 및 시스템, 전파응용

김 상 길 [부산대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1720-2410>



2010년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
2011년 12월: 조지아공과대학 전자공학 (공학석사)
2014년 12월: 조지아공과대학 전자공학과 (공학박사)
2015년 1월~2018년 2월: Qualcomm Inc.

2018년 3월~2022 2월: 부산대학교 전자공학과 조교수
2022년 3월~현재: 부산대학교 전자공학과 부교수
[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 무선시스템, 전파응용