

S-대역 레이다용 소형 다기능 투과형 메타표면 단위셀 설계 및 검증

Miniaturized Unit Cell Design and Verification of Multi-Functional Transmissive Meta-Surface for S-Band Radar

황명하 · 김경득 · 김상길 · 김종영*

Myeongha Hwang · Gyoungdeuk Kim · Sangkil Kim · Jongyeong Kim*

요 약

본 논문은 S-대역 레이다용 편파변환과 빔조향이 자유로운 다기능 투과형 메타표면을 구성하는 단위셀 설계를 제안한다. 단위셀은 Rx 안테나와 위상을 제어하는 소형화된 반사형 위상천이기, 편파 선택을 위한 PIN 다이오드 스위치, 이중 편파 Tx 안테나로 구성된다. Rx/Tx 안테나는 적층형 패치 안테나로 설계되었고, 기존 커플러 면적의 36 % 크기로 소형화된 반사형 위상 천이기는 0~330°의 위상 제어가 가능하다. PIN 다이오드 스위치는 23 dBm의 입력 전력에서도 동작 가능하도록 -5 V의 역방향 전압을 사용한다. 단위셀 성능 검증을 위하여 1×2 배열 안테나를 제작했다. 제작된 배열 안테나는 편파(수평/수직)를 자유로이 변환할 수 있었으며, 약 50° 범위의 빔조향 성능을 보였다.

Abstract

In this study, miniaturized unit cell design and verification of multi-functional transmissive meta-surface for S-band radar are presented. The proposed unit cell comprises a receiver (Rx) antenna, a miniaturized reflection-type phase shifter, a PIN diode switch for polarization selection, and a dual-pol transmitter (Tx) antenna. The Rx/Tx antennas are stacked patch type antennas, and the reflection-type phase shifter, which has a smaller area of 36 % than a conventional hybrid coupler, controls the phase shifting from 0 to 330°. The PIN diode switch uses a -5 V reverse DC voltage bias to handle high input radio frequency (RF) power of 23 dBm. Moreover, a 1×2 unit cell array was fabricated to verify the unit cell performance. The array antenna freely converted polarized waves (horizontal/vertical) and exhibited beam steering performance in a range of approximately 50°.

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

I. 서 론

최근에 차량용 레이다, 기상 관측 및 위성 통신과 같은
원거리 전파 탐지에 대한 관심이 증가함에 따라, 다양한

「본 연구는 국방과학연구소 미래도전기술 사업의 한화시스템(주) 시계개발비 지원으로 수행되었습니다.」

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

*한화시스템 특수레이다팀(Specific Radar Team, Hanwha Systems)

· Manuscript received November 9, 2021 ; Revised November 29, 2021 ; Accepted December 30, 2021. (ID No. 20211109-001S)

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

분야에 응용될 수 있는 다기능 빔 스캐닝(**beam scanning**)이 가능한 배열 안테나에 대해 많은 연구가 진행 중이다^[1]. 널리 사용되는 빔 스캐닝 안테나로는 능동 위상 배열 안테나(**active phased array**)와 투과 배열 안테나(**transmitarray antenna**), 반사 배열 안테나(**reflectarray antenna**) 그리고 통상적인 기계 회전식 접시형 반사기(**dish reflector**)가 있으며, 그 중 메타표면 개념을 사용하는 투과 배열 안테나 및 반사 배열 안테나는 능동 위상 배열 안테나와 기계식 회전식 접시형 반사기의 단점을 극복할 수 있어서 크게 주목받고 있다. 통상적으로 사용하는 기계 회전식 접시형 반사기는 구조가 단순하다는 장점이 있지만, 반사판에 의해 구조가 크고 빔 스캔이 빠르지 않다는 단점이 있고^[1], 능동 위상 배열 안테나의 경우 유연하고 빠른 빔 스캐닝이 가능하지만, 송수신 모듈과 급전 시스템 구조에 의한 활용 가능한 전력 크기의 한계와 상대적으로 시스템이 복잡하다는 단점이 있다^[2]. 이에 반해 메타표면 개념에 입각한 투과 배열 안테나 혹은 반사 배열 안테나^{[3]~[8]}는 능동 위상 배열 안테나보다 시스템의 복잡도가 낮고 빔조향 시 적은 전력을 소모한다는 장점이 있다. 이러한 특징을 가지는 메타표면 기반 투과/반사 배열 안테나 기술은 군사 기술 응용과 위성 통신 등의 분야에서 많은 주목을 받고 있다^[9].

투과형 메타표면은 동일한 단위셀이 반복적으로 배열된 형태로 구성되며, 빔 스캐닝이 가능하기 위해서는 각 단위셀마다 위상 제어가 가능해야 한다. 회로 제작에 용이한 PCB(**printed circuit board**) 기술과 SMT(**surface mount technology**)로 투과 배열 안테나를 설계할 때, 일반적으로 PIN 다이오드 또는 버랙터(**varactor**)를 이용한 위상 천이기(**phase shifter**)가 각 단위셀에 존재하게 된다. 이때, 넓은 위상 범위를 가지는 아날로그 위상 천이기를 구현하기 위해 주로 하이브리드 커플러(**hybrid coupler**) 구조를 가진 반사형 위상 천이기(**reflection-type phase shifter**)를 활용한다.

통상적인 반사형 위상 천이기는 하이브리드 커플러의 1/4 파장 전송선로 구조에 의해 필연적으로 큰 물리적인 공간을 필요로 한다. 여러 개의 커플러를 사용하여 위상 천이기를 설계하는 경우 더욱 넓은 공간을 차지하게 되고, 이러한 위상 천이기로 투과 배열 안테나를 설계하게 되면 투과 배열 안테나 크기 역시 매우 커지게 된다. 따라서 메타표면 기반 투과 배열 안테나의 소형화를 위해서

는 위상 천이기의 크기 줄여 소형화된 단위셀을 구현하는 것이 매우 중요하다.

S-대역(2~4 GHz)은 일상에서 많이 사용되는 Wi-Fi, 전자레인지부터 기상 관측, 위성 통신, 각종 군사 목적의 레이더까지 폭 넓게 응용되고 있다. S-대역 레이더는 대기 중에 손실이 적고 빔 폭이 넓은 특성 있어 같은 출력으로 더 먼 거리의 표적을 탐지할 수 있다는 장점이 있다^[10]. 이러한 이유로 본 논문에서는 S-대역 레이더용 편파/위상변환이 가능한 다기능 투과형 메타표면을 구성하는 소형화된 단위셀(**unit cell**) 구조를 제안한다. 설계를 위해 Ansys사의 유한요소 해석틀인 HFSS 2021 R1 프로그램을 사용하였다. 그림 1은 본 논문에서 제안하는 투과형 메타표면을 나타

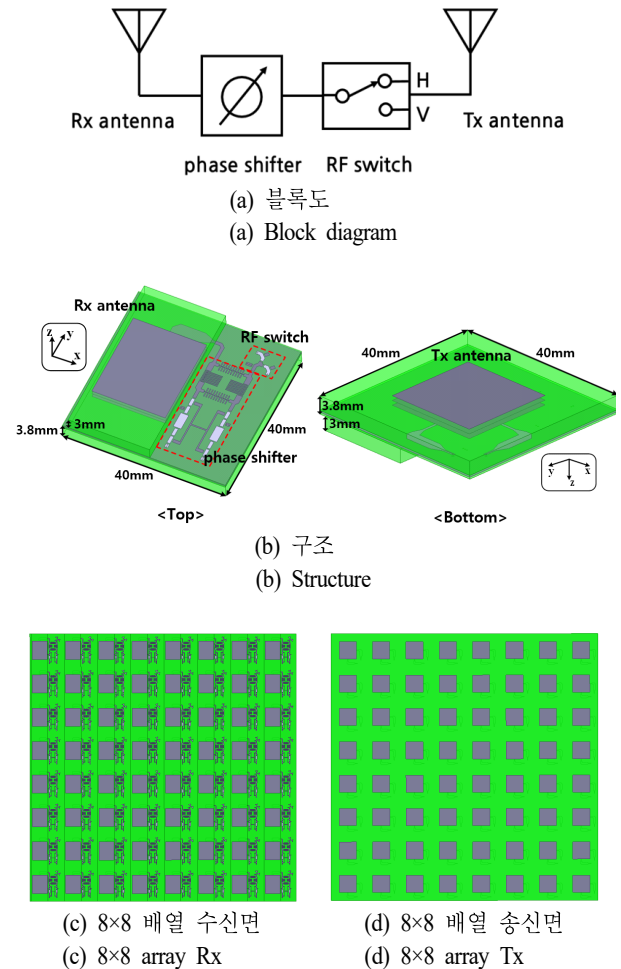


그림 1. 제안하는 투과형 메타표면: 단위셀
Fig. 1. Proposed transmissive meta-surface: Unit cell.

내며, 그림 1(a)는 제안하는 단위셀의 블록도를 나타낸다. 수신(Rx) 안테나로부터 입력된 RF 신호는 소형화된 하이브리드 커플러를 활용한 반사형 위상천이기(reflection-type phase shifter)에 의해 위상이 천이된 후, 편파를 선택하는 PIN 다이오드 스위치를 지나 송신(Tx) 이중편파 안테나를 통해서 방출된다. 단위셀은 비유전율(ϵ_r) 4.4, 손실 탄젠트($\tan \delta$) 0.025인 FR4 기판으로 제작되었으며, 소형화된 반사형 위상 천이기를 활용하여 단위셀의 크기를 $0.4 \lambda_0 \times 0.4 \lambda_0$ ($40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$)의 크기로 소형화하였다(그림 1(b)). 그림 1(c), 그림 1(d)와 같이 설계된 단위셀을 이용하여 배열로 확장할 수 있다.

II. 단위셀 설계

2.1 소형화된 반사형 위상 천이기

그림 2는 통상적인 하이브리드 커플러와 소형화된 하

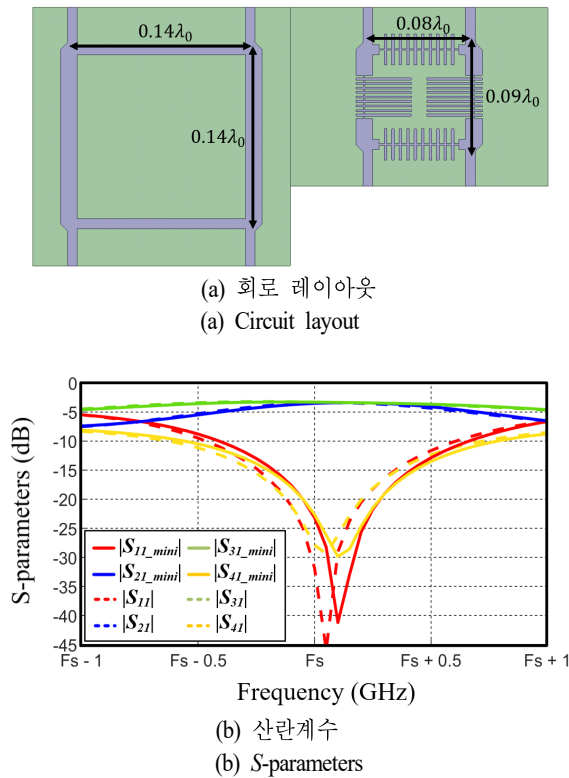


그림 2. 하이브리드 커플러 모의실험 비교
Fig. 2. Hybrid coupler simulation comparison.

이브리드 커플러의 (a) 회로 레이아웃과 (b) 산란계수(S-parameter)를 나타낸다. 소형화된 하이브리드에서 커플러는 통상적인 커플러의 1/4파장 브랜치 라인(branch line)을 slow-wave 특성의 전송선로 구조로 대체하여^[11], 기존 $0.14 \lambda_0 \times 0.14 \lambda_0$ 커플러 면적대비 36 % 줄어든 $0.08 \lambda_0 \times 0.09 \lambda_0$ 로 소형화되었다. 소형화된 커플러의 산란계수 ($|S_{11_mini}|$, $|S_{21_mini}|$, $|S_{31_mini}|$, $|S_{41_mini}|$)와 기존 커플러의 산란계수 ($|S_{11}|$, $|S_{21}|$, $|S_{31}|$, $|S_{41}|$)를 비교해 보면 S-대역에서 동일하게 동작함을 확인할 수 있다.

그림 3(a)는 본 논문의 반사형 위상 천이기의 회로도를 나타낸다. 크게 소형화된 하이브리드 커플러와 커플러 오른쪽 위아래 단자에 각각 연결된 리액티브 부하(reactive load)로 구성되며, 리액티브 부하는 두 개의 벡터(varactor)와 그 사이에 인덕티브한 특성을 가지는 1/4파장 전송선로가 직렬로 연결된 구조이다. 벡터에 인가되는 0~10 V 사이의 DC 바이어스 전압 값에 따라 벡터의

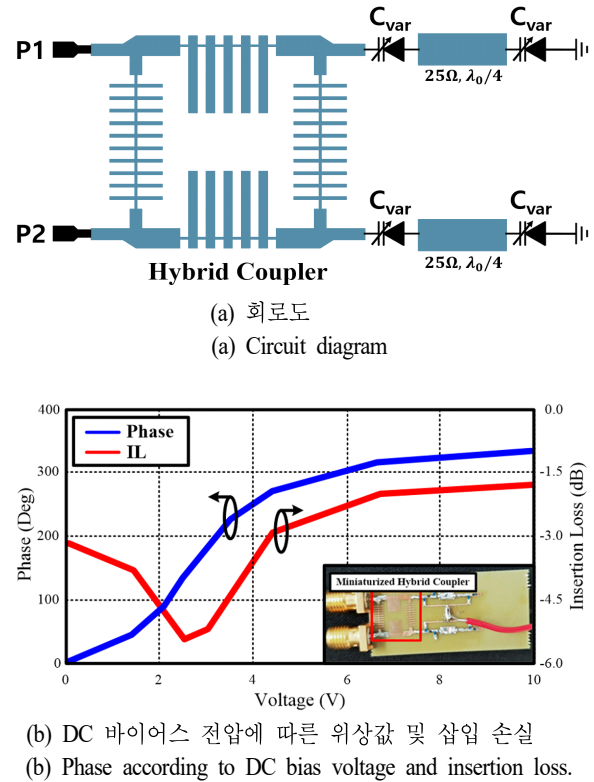


그림 3. 소형화된 반사형 위상 천이기
Fig. 3. Miniaturized reflection-type phase shifter.

커패시턴스 값이 결정되므로, 전압 제어를 통해 리액티브 부하의 반사 계수 위상을 제어한다.

위상 천이기의 이론적인 반사 계수(식 (1))와 그에 따른 삽입 손실(식 (2)) 및 위상 천이(식 (3))를 아래 식과 같이 표현할 수 있다^[12].

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

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

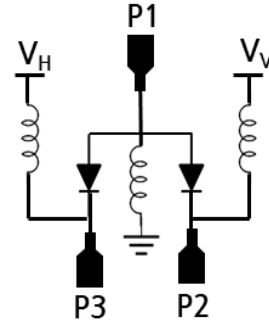
$$\Delta\phi_{\max} = 8 \tan^{-1} \left[\frac{r_z \Delta X_L}{Z_0} \frac{Z_0(Z_0 + \sqrt{Z_0^2 + 16r_z^2 R_s^2} + 4r_z R_s)}{(Z_0 + 2r_z R_s)(Z_0 + \sqrt{Z_0^2 + 16r_z^2 R_s^2} + 8r_z^2 R_s^2)} \right] \quad (3)$$

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

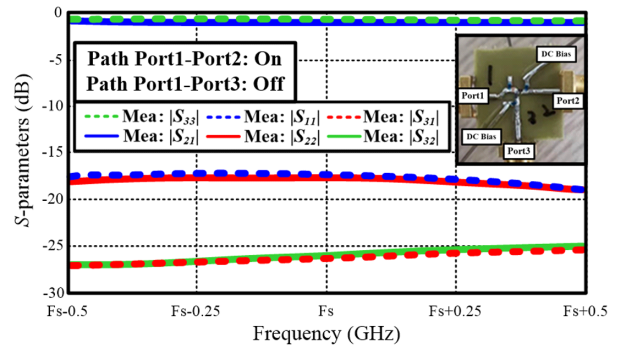
그림 3(b)는 제작된 위상 천이기의 DC 바이어스 전압에 따른 측정된 위상값과 삽입 손실을 나타낸다. 본 논문의 위상 천이기는 0° 에서 330° 까지의 위상이 제어 가능하도록 설계되었으므로 3-bit 위상 양자화가 가능하다.

2-2 고전력 운용을 위한 PIN 다이오드 스위치

그림 4(a)는 S-대역에서 동작하는 편파 선택이 가능한 SPDT(single pole double throw) PIN 다이오드 스위치의 회로도를 나타낸다. 한 다이오드의 양극(anode)과 다른 다이오드의 음극(cathode)이 맞닿도록 배치하는 일반적인 SPDT PIN 다이오드 스위치와는 다르게 본 논문에서 제안하는 PIN 다이오드 스위치는 두 다이오드의 양극이 맞닿게 배치된다. 두 다이오드는 양극에서 GND 단자를 공유하며, 각 다이오드의 바이어스는 음극의 DC 전압으로 제어된다. 순방향 바이어스는 1.35 V를 인가하고, 고전력 입력에도 역방향 바이어스를 유지할 수 있도록 -5 V의 큰 크기의 역방향 바이어스 전압을 인가한다. 그림 4(b)는 포트 2(P2) 다이오드를 ON, 포트 3(P3) 다이오드를 OFF시킨 상태에서의 산란계수를 보여준다. $F_s-0.5 \sim F_s+0.5$ GHz의 주파수 대역에서 입력 전력($0 \sim 20$ dBm)에 따른 측정된 ON



(a) 회로도
(a) Circuit diagram



(b) 산란계수
(b) S-parameters

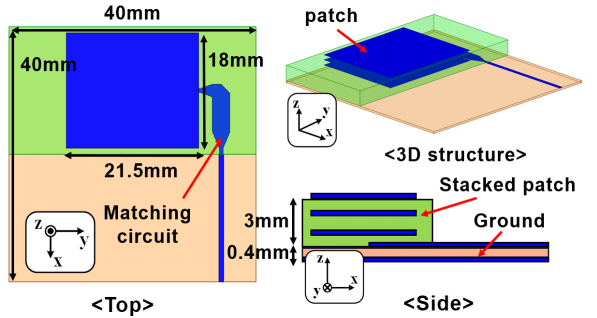
그림 4. PIN 다이오드 스위치

Fig. 4. PIN diode switch.

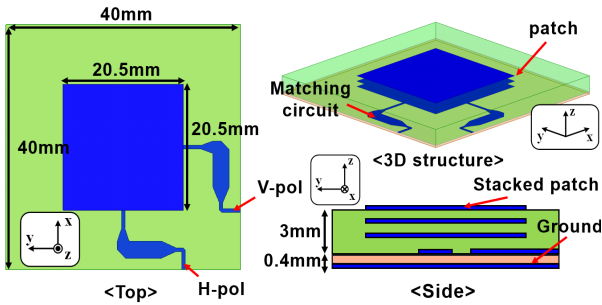
상태의 반사 계수($|S_{11}|, |S_{22}|$)의 값은 -15 dB 이하, 삽입 손실($|S_{21}|$) 0.9 dB로 나타났으며, OFF 상태의 반사 계수($|S_{33}|$)는 0.7 dB, 출력 포트 2과 포트 3 간 격리도($|S_{33}|$)는 25 dB 이상으로 측정되었다. 설계한 PIN 다이오드 스위치는 Tx 안테나와 결합하여 수평(H) 또는 수직(V) 편파 중 원하는 편파를 자유로이 선택할 수 있다.

2-3 적층형 패치 안테나: 수신(Rx)/송신(Tx) 안테나

S-대역에서 동작하는 Rx 안테나와 Tx 안테나는 모두 작은 면적으로 높은 이득(gain)을 가질 수 있도록 커플링 급전 방식의 적층형 패치 안테나로 설계되었다. 그림 5는 제안하는 적층형 패치 안테나 구조를 나타낸다. $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ (가로×세로) 크기의 단위셀에서 Rx 안테나(그림 5(a))는 반사형 위상 천이기와 PIN 다이오드 스위치의 공



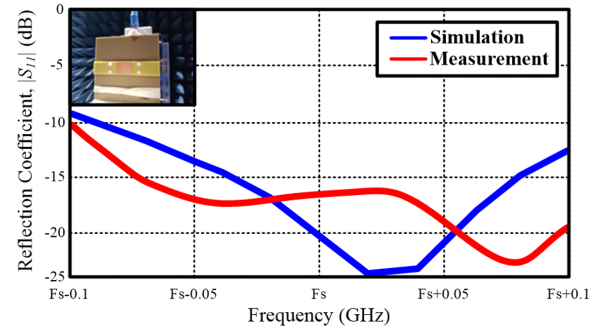
(a) Rx 안테나
(a) Rx antenna



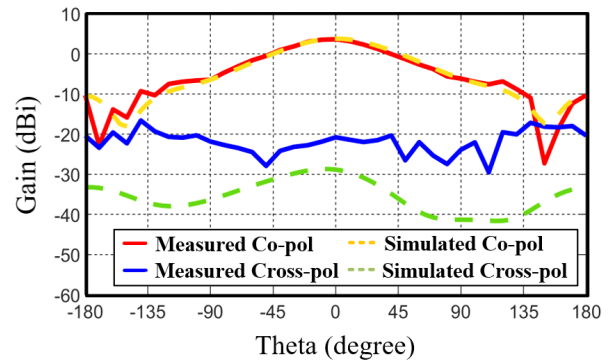
(b) Tx 안테나
(b) Tx antenna

그림 5. 적층형 패치 안테나 구조
Fig. 5. Stacked patch antenna configuration.

간을 고려하여 단위셀의 절반에 해당하는 크기로 설계되었으며, Tx 안테나(그림 5(b))는 단위셀의 면적을 모두 활용하여 설계했다. Rx와 Tx 안테나 모두 커플링 급전을 위한 0.4 mm 두께의 마이크로스트립 전송선로 위에 한 층당 1 mm 두께의 방사 패치 세 층을 적층한 구조이다. Tx 안테나의 경우, PIN 다이오드 스위치로부터 선택된 편파를 방사할 수 있어야 하므로, 이중 편파로 동작하도록 설계되었다. 그림 6(a)와 그림 6(b)는 Rx 안테나의 이득과 산란계수 성능을 나타낸다. F_s 주파수에서 최대이득 3.8 dBi, 빔폭은 80° 로 나타났으며, $F_s-0.05 \sim F_s+0.05$ GHz의 주파수 대역에서 반사 계수($|S_{11}|$)의 값은 -10 dB 이하로 나타났다. Tx 안테나의 이득과 산란계수(그림 7(a), 그림 7(b))를 살펴보면, F_s 주파수에서 최대 이득 4.2 dBi, 빔폭은 80° 로 나타났고 $F_s-0.05 \sim F_s+0.05$ GHz의 주파수 대역에서 반사 계수($|S_{11}|$, $|S_{22}|$)의 값은 -15 dB 이하, 두 편파 간의 격리도($|S_{21}|$)는 -20 dB 이하로 나타났다. Rx 안테나와



(a) 이득
(a) Gain



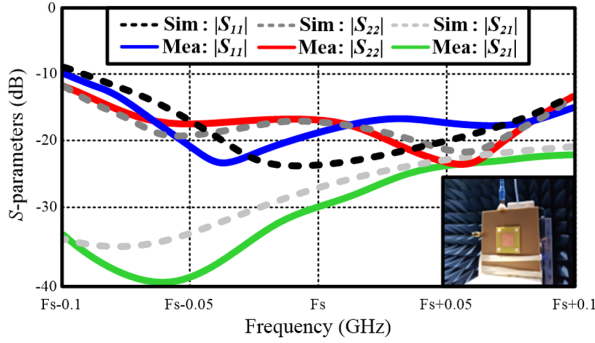
(b) 산란계수
(b) S-parameters

그림 6. 적층형 패치 Rx 안테나 성능
Fig. 6. Stacked patch Rx antenna performance.

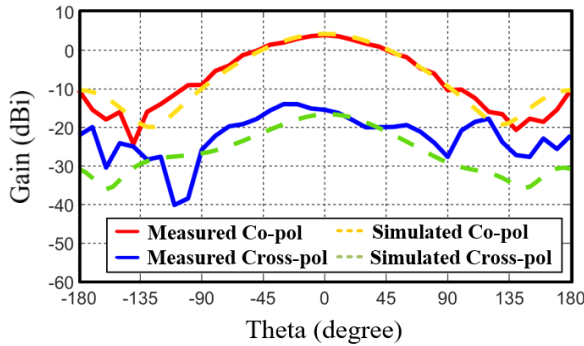
Tx 안테나 모두 모의실험값과 측정값이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

III. 단위셀 검증

단위셀의 기능(편파 변환과 빔조향 성능) 검증을 위해 1×2 배열 안테나를 제작하여 무반향실에서 안테나의 방사 패턴을 측정하였다. 제한적인 무반향실 환경 안에서 단위셀의 편파변환과 위상 변환 성능을 검증하기 위해서 Rx 안테나는 SMA 커넥터로 대체되었으며, 배열안테나의 급전을 위해 윌킨슨 전력분배기(Wilkinson power divider)를 사용하였다. 또한, 편파 및 위상 제어 DC 전압 제어를 위해 Arduino Mega 2560 보드와 1.5 V AA 건전지 4개를 직렬로 연결한 전원을 이용하여 전압 제어부를 구성하였다(그림 8(a)). 그림 9는 1×2 배열 안테나의 중심 주파수



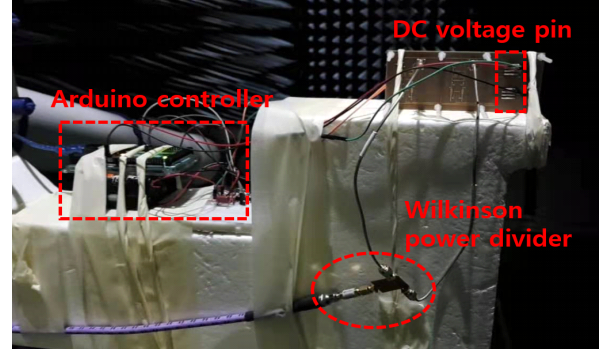
(a) 이득
(a) Gain



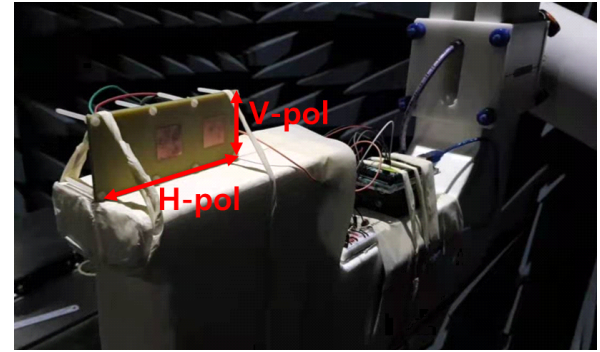
(b) 산란계수
(b) S-parameters

그림 7. 적층형 패치 Tx 안테나 성능
Fig. 7. Stacked patch Tx antenna performance.

(Fs)에서 두 단위셀 간 위상 차이가 0° , $+90^\circ$, -90° 일 때, 정규화된 방사 패턴을 나타낸다. 모의실험에서 실험의 단순화를 위해 위상천이기 대신 각 단위셀 포트에 위상을 설정한 이유로 위상천이기의 삽입 손실이 반영되지 않았다. 이에 의해 측정값과 달리 위상차 0° 보다 위상차 90° 에서 최대 방사 패턴 값이 더 크게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 위상차 0° 에서 측정된 최대이득은 수직 편파 -0.33 dBi, 수평 편파 -0.9 dBi이고, 조향 가능한 빔 각도는 수직 편파 $-27^\circ \sim 27^\circ$, 수평 편파 $-33^\circ \sim 13^\circ$ 로 나타났다. 수평 편파의 경우, 그림 8(b)에 나타난 것과 같이 방사를 위한 패치가 중앙과 오른쪽에 배치되어 있어서 접지판의 비대칭성 때문에 수직 편파와는 달리 빔조향이 비대칭적인 특징을 보인다.



(a) 뒷면
(a) Back side



(b) 앞면
(b) Front side

그림 8. 1×2 배열 안테나 측정 환경
Fig. 8. 1×2 array antenna measurement.

IV. 결 론

본 논문은 S-대역 레이더용 편파변환과 빔조향이 자유로운 다기능 투과형 메타표면을 구성하는 소형화된 단위셀을 제안했다. 단위셀은 Rx 안테나와 빔조향이 가능하도록 위상을 제어하는 소형화된 반사형 위상천이기, 편파선택이 가능한 PIN 다이오드 스위치, Tx 안테나로 구성된다. 반사형 위상 천이기는 $0 \sim 10$ V DC 바이어스 조건에서 $0 \sim 330^\circ$ 사이의 위상 제어가 가능했으며, 위상 천이기의 하이브리드 커플러는 기존 커플러 대비 36 % 면적으로 소형화되었다. PIN 다이오드 스위치는 1.35 V의 순방향 전압과 높은 전력의 입력에 동작 가능하도록 -5 V 역방향 전압을 인가한다. Rx와 Tx 안테나의 경우 작은 면적으로 높은 이득을 가지는 적층형 패치 안테나로 설계

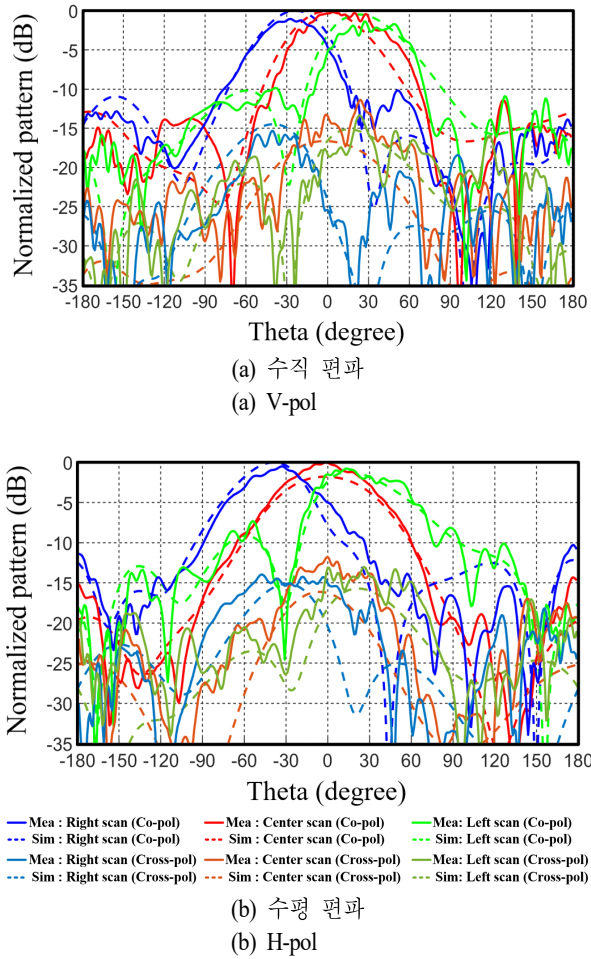


그림 9. 1×2 배열 안테나 정규화된 방사 패턴
 Fig. 9. 1×2 array antenna normalized radiation pattern.

되었으며, Rx 안테나의 최대이득은 3.8 dBi, 빔폭 80°, Tx 안테나의 최대 이득은 4.2 dBi, 빔폭 80°로 나타났다. 단위 셀 검증을 위해 1×2 배열을 설계하여 측정한 결과, 최대 이득은 수평 편파 -0.9 dBi, 수직 편파 -0.33 dBi로 나타났다. 수평 편파, 수직 편파 모두 약 50° 범위의 빔조향이 가능했다.

References

[1] J. Shaker, M. R. Chaharmir, M. Cuhaci, and A. Ittipiboon, "Reflectarray research at the communications research centre Canada," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 50, no. 4, pp. 31-52, Aug. 2008.

[2] M. Mirmozafari, S. Saeedi, G. Zhang, and Y. Rahmat-Samii, "A crossed dipole phased array antenna architecture with enhanced polarization and isolation characteristics," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 6, pp. 4469-4478, Jun. 2020.

[3] J. G. Lee, "Tutorial: Reconfigurable transmitarray antenna using metasurface," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 8, pp. 663-676, 2020.

[4] J. R. Reis, M. Vala, and R. F. S. Caldeirinha, "Review paper on transmitarray antennas," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 94171-94188, 2019.

[5] J. Wang, Y. Li, Z. H. Jiang, T. Shi, M. C. Tang, and Z. Zhou, et al., "Metantenna: When metasurface meets antenna again," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 3, pp. 1332-1347, Mar. 2020.

[6] C. Huang, W. Pan, X. Ma, B. Zhao, J. Cui, and X. Luo, "Using reconfigurable transmitarray to achieve beam-steering and polarization manipulation applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 11, pp. 4801-4810, Nov. 2015.

[7] B. Rana, I. G. Lee, and I. P. Hong, "Digitally reconfigurable transmitarray with beam-steering and polarization switching capabilities," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 144140-144148, 2021.

[8] T. Cai, G. Wang, X. Fu, J. Liang, and Y. Zhuang, "High-efficiency metasurface with polarization-dependent transmission and reflection properties for both reflectarray and transmitarray," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 6, pp. 3219-3224, Jun. 2018.

[9] N. Chahat, E. Decrossas, D. Gonzalez-Ovejero, O. Yurduseven, M. J. Radway, and R. E. Hodges, et al., "Advanced cubesat antennas for deep space and earth science missions: A review," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 61, no. 5, pp. 37-46, Oct. 2019.

[10] B. A. Kopp, "S- and X-band radar transmit/receive

module overview," in *2007 IEEE Radar Conference*, Waltham, MA, 2007, pp. 948-953.

- [11] K. O. Sun, S. J. Ho, C. C. Yen, and D. van der Weide, "A compact branch-line coupler using discontinuous microstrip lines," *IEEE Microwave and Wireless Com-*

ponents Letters, vol. 15, no. 8, pp. 519-520, Aug. 2005.

- [12] C. Lin, S. Chang, and W. 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.

황 명 하 [부산대학교/석사과정]

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



2020년 2월: 부산대학교 전자공학과(공학사)
2020년 3월~현재: 부산대학교 전자전기공학부 석사과정
[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 위성통신용 안테나 및 시스템

김 상 길 [부산대학교/조교수]

<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~현재: 부산대학교 전자공학과 조교수
[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 무선시스템, 전파응용

김 경 득 [부산대학교/석사과정]

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



2020년 2월: 부산대학교 전자공학과(공학사)
2020년 3월~현재: 부산대학교 전기전자공학부 석사과정
[주 관심분야] 안테나, RF회로 및 시스템, 전파응용

김 종 영 [한화시스템/연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3621-6802>



2018년 2월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학사)
2020년 2월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학석사)
2020년 11월~현재: 한화시스템 특수레이다팀 연구원

[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 안테나, 전자파 흡수체, 메타물질