

S-band 저궤도 위성통신용 버틀러 매트릭스 급전 기생 패치·반사판 기반 고지향성 광대역 원형편파 빔 조향 배열안테나

이현수*, 류성준**, 임태흥***

High-Directivity Wideband Beam-Steering CP Array Antenna based on Parasitic Patch and Reflector with Butler-Matrix for S-Band LEO Satellite Communications

Hyunsoo Lee*, Sungjun Yoo**, and Tae Heung Lim***

이 연구는 국립금오공과대학교 대학 연구과제비로 지원되었음(2024-2026)

요 약

본 논문에서는 기생 패치와 반사판을 이용한 고지향성 광대역 원형편파 S-band 배열안테나를 제안한다. 제안된 배열소자는 L-stub 급전구조, 기생 패치 및 반사판으로 구성되며, 각 구조 간 공기층은 3D 프린팅 기반 지그를 이용하여 정밀하게 유지하였다. 공기층 구조를 통해 반사계수를 개선하고 좌선회 원형편파 특성을 억제하여 안정적인 우선회 원형편파 이득 특성을 확보하였다. 동작 주파수에서 반사계수의 측정 및 시뮬레이션 결과는 -11.5 dB와 -12.6 dB로 나타났으며, 2 GHz에서 전면 방향 이득은 각각 7.9 dBic와 8.12 dBic로 확인되었다. 버틀러 매트릭스 기반 4소자 배열안테나의 빔 조향 특성을 측정한 결과는 Port 1 ~ Port 4 입력 시 빔은 각각 $+10^\circ$, -45° , $+40^\circ$, -15° 방향으로 조향되었고, 조향각에서 최대 이득은 각각 8.72 dBic, 6.28 dBic, 1.51 dBic, 10.16 dBic로 나타났다.

Abstract

This paper proposes a high-directivity wideband circularly polarized S-band array antenna using parasitic patches and a reflector. The array element consists of an L-stub feeding structure, a parasitic patch, and a reflector with air gaps based on a 3D-printed jig. The air-gap structure improves impedance matching and effectively suppresses the left-hand circularly polarized radiation property to enhance the right-hand circularly polarized gain. The measured and simulated reflection coefficients of the proposed antenna are -11.5 dB and -12.6 dB at 2 GHz, respectively. In addition, the measured and simulated bore-sight gains are 7.9 dBic and 8.12 dBic, respectively. We obtain the measured peak gains of 8.72 dBic, 6.28 dBic, 1.51 dBic, and 10.16 dBic for the proposed array antenna according to the beam steering angles of $+10^\circ$, -45° , $+40^\circ$, and -15° .

Keywords

array antenna, beamforming, S-band antenna, parasitic patch, Butler matrix, 3D printing

* 국립금오공과대학교 전자공학과

- ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0455-9084>

** 국립경국대학교 전자기계공학부 교수

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0911-2186>

*** 국립금오공과대학교 전자공학부 교수(교신저자)

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7968-1272>

• Received: Jan. 15, 2026, Revised: Mar. 11, 2026, Accepted: Mar. 14, 2026

• Corresponding Author: Tae Heung Lim

Dept. of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology,
61 Daehak-ro (yangho-dong), Gumi, Gyeongbuk, [39177] Korea

Tel.: +82-54-478-7502, Email: thlim@kumoh.ac.kr

I. 서 론

최근 전 지구적 통신망 구축을 위한 저궤도 위성 통신 기술이 급속히 확산됨에 따라, 미국, 유럽, 중국 등 주요 국가의 민간 기업에서는 초고속·저지연 통신 서비스를 제공하기 위해 수천 기 규모의 S/X/Ku 대역 저궤도 위성을 대량 발사하여 위성군을 구성하고 있다[1]. 이에 따라 위성-지상 간 통신 품질을 안정적으로 유지하기 위한 기술 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 저궤도 위성-지상 간 통신 링크는 전파가 대기권 및 전리층을 통과하면서 편파 왜곡 및 기상 감쇠에 대한 환경적인 영향을 받아 신호 감쇠와 위상 왜곡을 유발하여 통신 품질을 저하시킨다. 이를 최소화하기 위해 일반적으로 원형편파 안테나가 사용되며[2][3], 원형편파 안테나는 위성의 자세 변화나 경로 편차 조건에서도 성능 저하가 적고, 편파 손실을 감소시켜 안정적인 통신 링크를 유지할 수 있는 핵심 기술이다[4]. 더 나아가 S-band에서 운용되는 다양한 응용 시스템에서는 특정 방향에서의 안정적인 통신 성능 확보를 위해 고이득 및 고지향성 안테나 설계 기술이 요구된다. 특히, 저궤도 위성통신 시스템에서는 위성의 고속이동으로 인한 도플러 편이와 다중 주파수 운용환경에 대응하기 위해, 넓은 대역폭에서도 안정적인 방사특성을 유지할 수 있는 광대역 안테나 설계가 필수적이다[5]. 이를 위해 기존 연구에서는 광대역 특성과 원형편파 특성을 동시에 구현하기 위한 다양한 설계 기법들이 제안되어 왔다. 기생 패치를 적층 또는 결합하는 기법[6], 방사 패치 내 슬롯을 삽입하는 기법[7][8], 공기층을 도입하여 유전율을 조절하는 기법 등이 있다[9]. 그러나 이러한 기법들은 광대역 특성 확보에는 효과적이지만, 축비 대역폭이 제한되거나 좌선회 원형편파 성분을 충분히 억제하지 못해 우선회 원형편파의 전면 이득이 저하되는 문제가 여전히 발생한다.

본 논문에서는 S-band 저궤도 위성통신용 원형 기생 패치와 반사판 구조를 이용해 고지향성 및 광대역 원형편파 특성을 구현한 4소자 배열안테나를 제안하며, 버틀러 매트릭스 급전구조를 적용하여 빔 조향 기능을 구현하였다. 제안된 배열소자는 L-stub

급전구조, 기생 패치, 반사판 구조로 이루어져 있으며, 각 구조 간 공기층 형상을 이용하여 광대역 특성을 도출하였다. 배열소자의 원형편파 특성을 구현하기 위해 급전구조는 L-stub 형태를 사용하여 90° 위상차를 유지하였다. 상부에 위치한 기생 패치 Layer는 급전부와의 전자기적 결합을 통해 기생 커패시턴스를 형성하여, 동작 주파수 대역 내 임피던스 정합 특성을 개선하였다. 하부에 배치된 반사판은 하단으로 발생하는 좌선회 원형편파 성분을 억제하고, 우선회 원형편파의 전면 방향 이득을 향상시킨다. 배열소자의 공기층은 3D 프린팅 기반 지그를 활용하여 정밀하게 유지하였다. 제안된 안테나는 FR-4 유전체 기판에 인쇄하여 제작하였으며, 소자 간 배열 간격을 0.47λ(2 GHz 기준)로 배치하여 4소자 선형 배열로 확장하였다. 배열안테나는 버틀러 매트릭스 급전구조를 통해 각 포트 입력에 따라 빔 조향 특성을 확인하였다[10]. 제작된 배열안테나와 급전구조는 전자파 무반사실에서 반사계수, 빔패턴 등을 측정하여, 광대역 원형편파와 고지향성 특성이 나타남을 확인하였다.

II. 고지향성 원형편파 배열소자 설계

본 연구에서는 저궤도 위성통신에서 필요한 우선회 원형편파를 구현하기 위해 L-stub 급전 형상과 원형 슬롯 구조를 사용하였으며, 광대역 특성을 확보하기 위해 기생 패치와 공기층 구조를 적층한 형태로 배열소자를 설계하였다. 배열소자의 고지향성 특성을 위하여 반사판을 구조의 하부에 배치하여 전면 방향 이득을 향상시켰다. 그림 1은 제안된 고지향성 광대역 원형편파 배열소자의 형상을 나타낸다. 제안된 배열소자는 L-stub 급전구조의 안테나(Layer 1), 기생 패치(Layer 2), 그리고 반사판으로 구성된다. Layer 1과 Layer 2는 두께 1.6 mm의 FR-4 유전체 기판($\epsilon_r = 4.5$, $\tan\delta = 0.01$)에 인쇄하였다. Layer 1의 상부 면에는 길이($l_1 = 30.6$ mm)와 너비($w_1 = 37$ mm)를 갖는 L-stub 급전구조를 설계하였다. 해당 구조는 x축과 y축 성분의 표면전류가 서로 90° 위상차를 유지하도록 최적화하여, 오른쪽으로 회전하는 우선회 원형편파 특성을 확보하였다. 하부

의 원형 슬롯($r_1 = 25.3$ mm)은 급전부와의 전자기적 커플링을 유도하여 공진 주파수 대역에서 임피던스 정합을 개선하고 안정적인 편파 특성을 확보한다.

기생 패치인 Layer 2는 Layer 1의 상부로부터 높이(h_1) 22 mm의 공기층을 가지며, Layer 2의 하단에는 반지름(r_2) 17.5 mm를 가지는 원형 패치를 인쇄하였다. 이 두 구조는 전자기적 결합에 의해 기생 커패시턴스를 형성하며, 이를 통해 동작 주파수 대역 내 반사계수 특성을 개선하였다. 반사판은 Layer 1의 하부로부터 2 GHz 기준 0.24λ ($h_2 = 30$ mm)의 공기층을 두고 배치하였다. 반사판은 하단으로 방사하는 좌선회 원형편파와 성분을 억제하고, 우선회 원형편파 성분을 반사시켜 전면 방향 이득을 향상시킨다. 제안된 안테나의 세부 파라미터는 다음과 같다($h_1 = 22$ mm, $h_2 = 30$ mm, $r_1 = 25.3$ mm, $r_2 = 17.5$ mm, $l_1 = 30.6$ mm, $l_2 = 20.2$ mm, $l_3 = 10.4$ mm, $l_4 = 4$ mm, $l_5 = 2.86$ mm, $l_6 = 70$ mm, $w_1 = 37$ mm, $w_2 = 24$ mm, $w_3 = 0.8$ mm, $w_4 = 3.08$ mm).

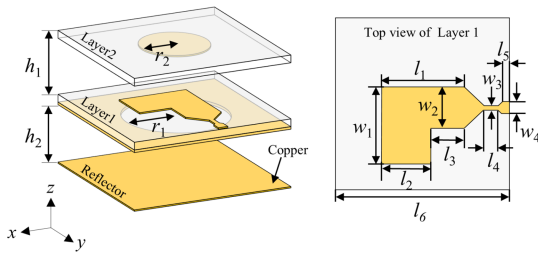


그림 1. 제안된 배열소자의 구조

Fig. 1. Geometry of proposed array element

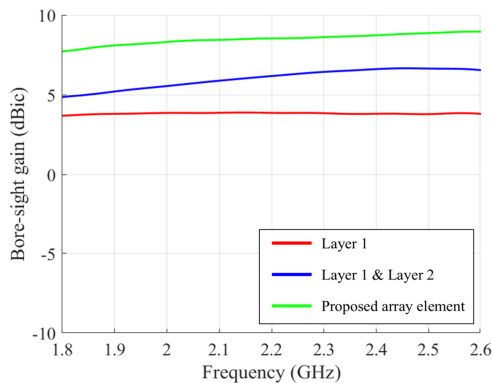


그림 2. Layer 적층 구조에 따른 전면 방향 이득

Fig. 2. Bore-sight gain according to the stacked layer geometry

그림 2는 Layer 1 단일층 구조, Layer 1에 Layer 2를 적층한 구조, 그리고 제안된 안테나의 전면 방향 이득을 비교한 시뮬레이션 결과를 보여준다. Layer 1 단일층 구조는 2 GHz에서 3.87 dBic의 이득을 보이며, Layer 2를 추가로 적층한 구조의 이득은 5.55 dBic이다. 반사판을 포함한 제안된 안테나의 이득은 단일층 대비 4.44 dB 향상된 8.31 dBic로 나타났다.

그림 3은 제작된 원형편파 배열소자의 사진을 보여준다. Layer 1과 Layer 2를 포함한 각 구조는 FR-4 기판에 인쇄하였으며, 반사판은 구리판을 식각하여 제작하였다. 안테나의 급전부는 SMA 포트를 급전구조와 직접 연결하여 제작하였다. 제안된 배열소자는 공기층 민감도를 개선한 3D 프린팅 기반 지그 형상을 통해 안테나 구조의 견고함을 확보하였다. 3D 프린팅 지그는 ABS 필라멘트 소재를 사용하였다. 지그의 전체 치수는 가로 15 mm, 세로 50 mm, 높이 63 mm이며, 각 구조를 결합할 수 있는 부분은 유전체 높이와 동일하게 제작하였다.

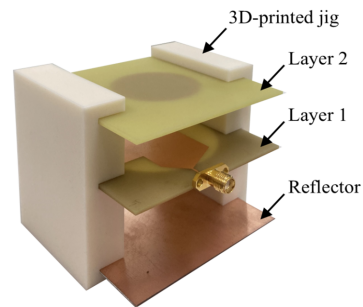
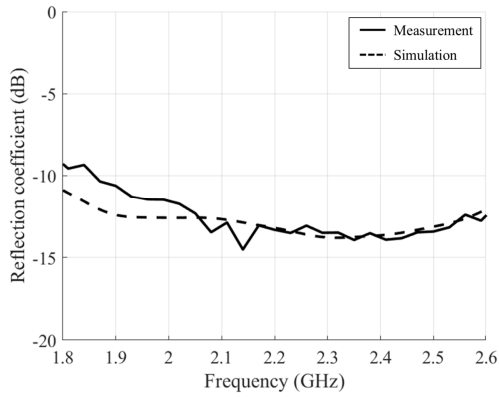


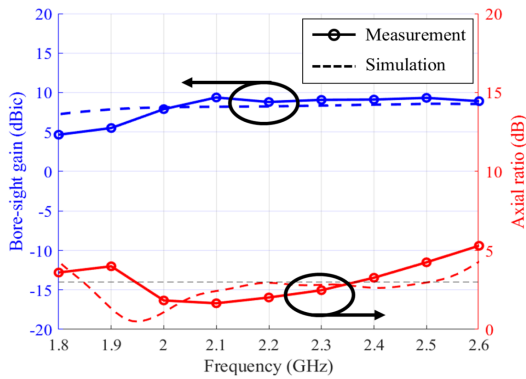
그림 3. 제작된 배열소자 사진

Fig. 3. Photographs of fabricated array element

그림 4는 제안된 배열소자의 반사계수, 축비, 및 전면 방향 이득 특성을 나타낸다. 제안된 안테나의 반사계수는 1.85 GHz ~ 2.6 GHz의 대역에서 측정과 시뮬레이션 결과가 각각 평균 -12.8 dB와 -13 dB로 확인되었으며, 비대역폭은 37%이다. 1.95 GHz ~ 2.35 GHz 대역에서의 축비는 측정과 시뮬레이션 모두 3 dB 이하로 나타났으며, 축비 대역폭은 16.5%를 가진다. 전면 방향 이득의 측정 결과는 2.1 GHz에서 최대 9.4 dBic로 확인되었다. 축비와 전면 방향 이득은 전자파 무반사실에서 측정되었다.



(a)



(b)

그림 4. 배열소자의 측정 및 시뮬레이션 결과

(a) 반사계수, (b) 전면 방향 이득 및 축비

Fig. 4. Simulated and measured results of the array element (a) reflection coefficient, (b) bore-sight gain and axial ratio

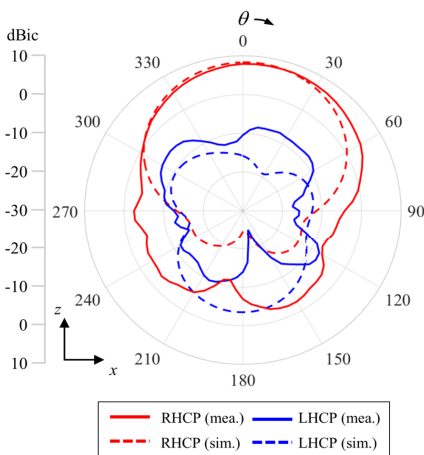


그림 5. 제안된 배열소자의 방사패턴

Fig. 5. Radiation patterns of the proposed array element

그림 5는 배열소자에 대한 2 GHz에서의 방사패턴을 보여준다. 전면 방향에서 우선회 원형편파 이득은 시뮬레이션에서 8.29 dBic, 측정에서 7.9 dBic로 확인되었다. 좌선회 원형편파 이득은 시뮬레이션에서 -15.8 dBic, 측정에서 -10.51 dBic로 나타났다. 전면 방향에서 측정된 우선회와 좌선회 원형편파 이득의 차이는 18.41 dB이며, 이를 통해 좌선회 원형편파 성분이 억제됨을 확인하였다. 제안된 안테나의 성능을 비교하기 위해 반사계수 대역폭, 축비 대역폭, 최대 이득 및 안테나 크기를 표 1에 제시하여 기존 연구들과 비교하였다.

표 1. 안테나 특성 비교

Table 1. Comparisons of the antenna characteristics

Ref.	Fractional bandwidth (%)	3 dB AR bandwidth (%)	Maximum gain (dBic)	Size (λ_{low}^3)	Cost
[6]	38	30	6.9	$0.78 \times 0.78 \times 0.1$	Low
[7]	28.7	6.3	6.6	$0.43 \times 0.43 \times 0.12$	High
[8]	17.4	5.4	10.2	$0.41 \times 0.41 \times 0.08$	Low
[9]	43	8	7	-	High
Proposed	37	16.5	9.4	$0.43 \times 0.43 \times 0.35$	Low

III. 4소자 배열 확장 및 버틀러 매트릭스 설계

그림 6은 제안된 4×4 버틀러 매트릭스의 구조를 나타낸다. 버틀러 매트릭스는 하이브리드 커플러, 위상천이기, 크로스오버로 구성된다. 입력포트(m)에 따른 출력단의 위상차($\Delta\phi_{m,n}$)를 인접한 출력 포트 간의 위상 차이로 정의하였다. 입력포트 m 이 인가될 때 $\Delta\phi_{m,1}$, $\Delta\phi_{m,2}$, $\Delta\phi_{m,3}$ 는 각각 $\angle S_{5,m} - \angle S_{6,m}$, $\angle S_{6,m} - \angle S_{7,m}$, $\angle S_{7,m} - \angle S_{8,m}$ 에 해당한다. 입력포트에 따라 버틀러 매트릭스를 구성하는 각 소자에서 위상 지연이 발생하며, 이에 따라 출력 포트 간 위상차($\Delta\phi_{m,n}$)가 결정된다. 이상적인 위상차는 $\Delta\phi_{1,n}$, $\Delta\phi_{2,n}$, $\Delta\phi_{3,n}$, $\Delta\phi_{4,n}$ 에 대해 각각 $+45^\circ$, -135° , $+135^\circ$, -45° 이다. 버틀러 매트릭스에서 도출된 출력 포트 간 위상차는 선형 배열에서 특정 빔 조향각을 결정하는 핵심 파라미터이다. 이를 기반으로 버틀러 매트릭스를 배열안테나의 기본 급전구조로 설계하여, 제안된 배열소자를 4소자 선형 배열로 확장하였다.

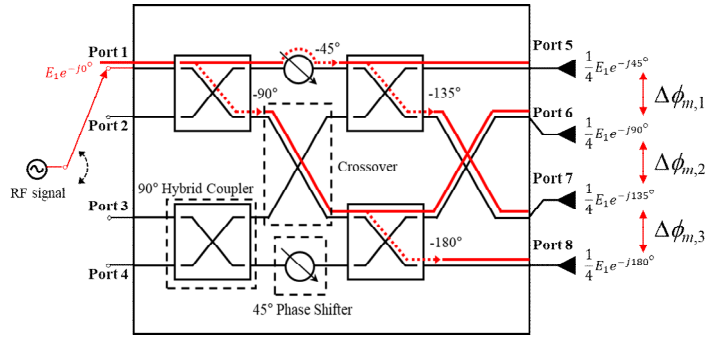


그림 6. 4×4 버틀러 매트릭스의 블록다이어그램

Fig. 6. Block diagram of 4×4 Butler matrix

그림 7은 제안된 원형편파 안테나의 4소자 배열 구조를 나타낸다. 배열소자는 단일 소자를 선형으로 확장한 형태로 구성되었으며, 소자 간 배열 간격은 2 GHz 기준 0.47λ ($d_1 = 70$ mm)로 배치하였다. 배열 확장을 위해 추가된 3D 프린팅 지그는 배열소자에 사용된 지그와 동일한 ABS 필라멘트 소재를 사용하였으며, 각 배열소자를 독립 모듈 형태로 삽입하여 특정 소자의 교체가 필요한 경우 배열소자 단위로 분리가 가능하게 하였다.

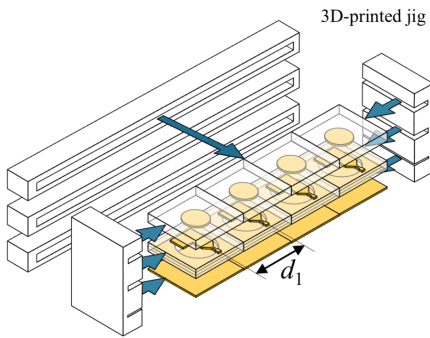


그림 7. 4소자 원형편파 배열안테나 구조

Fig. 7. Geometry of the 4-element CP array antenna

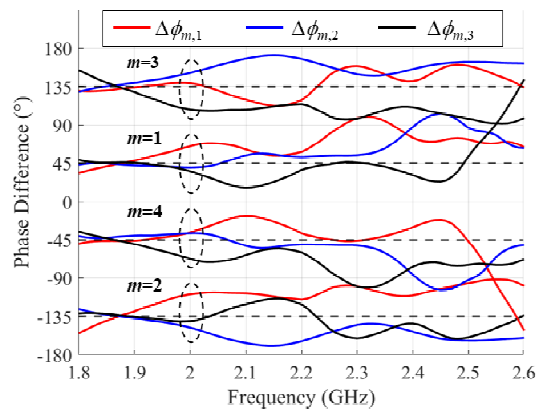


그림 8. 버틀러 매트릭스 출력단 위상차

Fig. 8. Output phase difference of Butler matrix

그림 8은 입력포트에 따른 버틀러 매트릭스의 $\Delta\phi_{m,n}$ 측정 결과를 나타낸다. 동작 주파수 2 GHz에서 설계된 버틀러 매트릭스의 $\Delta\phi_{1,1}$, $\Delta\phi_{1,2}$, $\Delta\phi_{1,3}$ 는 각각 64.8°, 35.5°, 39.8°로 확인되었으며, 시뮬레이션에서는 각각 48.1°, 44.4°, 44.3°로 나타났다. $\Delta\phi_{2,1}$, $\Delta\phi_{2,2}$, $\Delta\phi_{2,3}$ 의 측정 결과는 -109.2°, -140.7°, -148.3°를 가지며 시뮬레이션 결과는 -127.4°, -134.5°, -148.3°로 나타났다. $\Delta\phi_{3,n}$ 과 $\Delta\phi_{4,n}$ 의 측정 결과는 각각 평균 132.87°와 47.13°를 갖는다.

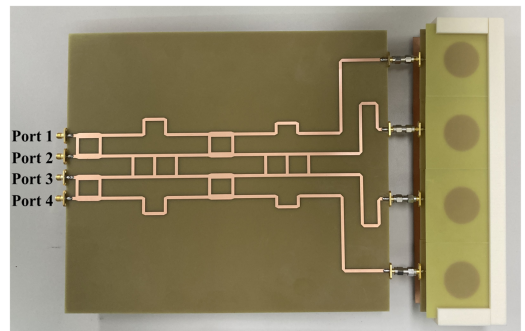


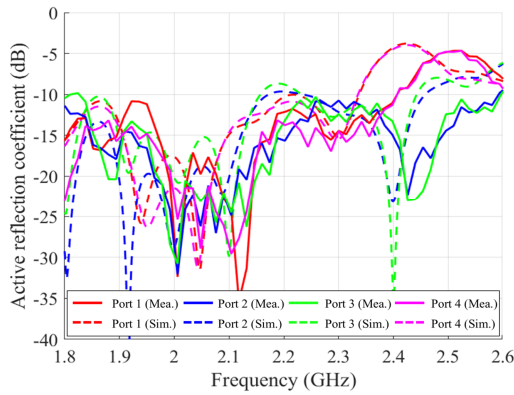
그림 9. 제작된 버틀러 매트릭스 급전구조 배열안테나 사진

Fig. 9. Photograph of the fabricated array antenna with Butler matrix feeding network

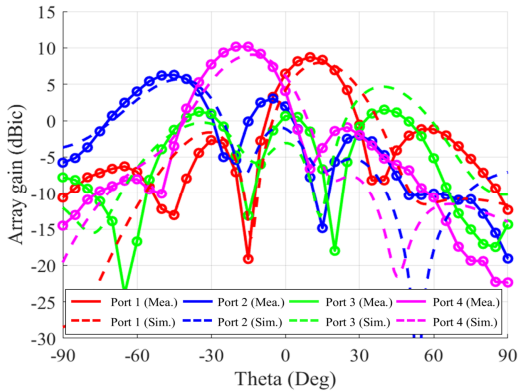
그림 9는 제작된 버틀러 매트릭스와 결합된 4소자 원형편파 배열안테나의 제작 사진을 나타낸다. 버틀러 매트릭스는 Layer 1 및 Layer 2와 동일한 두께 1.6 mm의 FR-4 유전체 기판에 인쇄하였다. 버틀

러 매트릭스는 Layer 1과 동일한 높이를 갖도록 배치하여 배열 전체가 버틀러 매트릭스와 수평을 유지하도록 배치하였다. 제작된 배열안테나는 버틀러 매트릭스와 결합된 상태에서 전자파 무반사실에서 측정하였다.

그림 10은 배열안테나의 측정 및 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 능동 반사계수는 배열소자 간 상호결합의 영향을 포함하여 특정 포트에서 반사 특성을 나타내며 식 (1)과 같이 표현된다[11]. (N 은 배열소자 수, n 은 기준 배열소자, m 은 상호결합을 고려하는 배열소자를 의미한다.)



(a)



(b)

그림 10. 배열안테나의 측정 및 시뮬레이션 결과
(a) 능동 반사계수, (b) 입력포트에 따른 방사패턴
Fig. 10. Simulated and measured results of the array antenna (a) active reflection coefficient, (b) radiation patterns for different input ports

$$\Gamma_n = \sum_{m=1}^N S_{n,m} e^{jkd(m-n)\sin\theta_0} \quad (dB) \quad (1)$$

능동 반사계수 특성은 측정과 시뮬레이션 결과 모두 2 GHz에서 -10 dB 이하의 능동 반사계수를 유지하였다. 또한, 2 GHz에서 Port 1 ~ Port 4 입력 시 조향되는 방사패턴은 각각 +10°, -45°, +40°, -15°에서 최대 이득을 가지는 것을 확인하였다. 조향각에 따른 최대 이득은 각각 8.72 dBic, 6.28 dBic, 1.51 dBic, 10.16 dBic로 측정되었다. 제안된 배열안테나의 빔 조향각에서의 최대 이득(G_t)은 배열소자 이득과 배열소자 개수에 따른 이득, 그리고 버틀러 매트릭스에서 발생하는 유전 손실 및 경로 손실과 조향 과정에서 발생하는 손실을 합한 값이며, 이를 식 (2)에 나타내었다.

$$G_t = G_a - L_b - L_s \quad (dBic) \quad (2)$$

여기서, G_a 는 4소자 배열에서 단일 소자의 이득과 배열소자 수에 따른 이득을 포함하는 배열이득을 의미한다. L_b 는 버틀러 매트릭스에서 발생하는 유전 손실 및 경로 손실이며, L_s 는 빔 조향에 따른 스캔 손실이다. 스캔 손실에 대한 수식은 식 (3)과 같이 표현된다(θ_0 는 빔 조향각도이다.).

$$L_s = 10\log_{10}(\cos\theta_0) \quad (dB) \quad (3)$$

예를 들어, Port 1에서 측정된 G_t 는 8.72 dBic이다. $G_a = 11.5$ dBic, $L_b = 3.7$ dB, $L_s = 0.07$ dB를 통해 도출한 G_t 는 $G_t = G_a - L_b - L_s = 7.73$ dBic로 계산된다. 이는 버틀러 매트릭스의 유전 손실 및 경로 손실과 빔 조향에 따른 스캔 손실을 고려한 값이다. 유전 손실 및 경로 손실이 존재하지 않는 이상적인 조건($L_b = 0$)을 가정하면, 손실이 보상된 배열이득은 측정값에 L_b 를 보상하여 $G_t = 8.72 + 3.7 = 12.42$ dBic로 산출된다. 입력포트에 따라 L_b 는 각각 3.7 dB, 4.5 dB, 4.3 dB, 3.6 dB로 나타났으며 버틀러 매트릭스의 유전 손실 및 경로 손실이 없는 이상적인 조건에서의 배열이득은 12.42 dBic, 10.78 dBic, 5.81 dBic, 13.76 dBic로 예상할 수 있다.

IV. 데이터링크 버짓 계산

제안된 배열안테나는 입력 포트에 따라 서로 빔 조향각에서 최대 이득을 형성한다. 이러한 빔 조향에 따른 이득 차이가 실제 위성통신 환경에서 지상국 수신전력에 어떻게 반영되는지를 확인하기 위해 위성통신 데이터링크 버짓 분석을 수행하였다. 링크 버짓 분석 시나리오는 S-band(2 GHz) 저궤도 위성 환경을 가정하여, 이를 바탕으로 지상국 수신전력을 계산하였다. 지상국 수신 안테나 이득은 앞 절에서 측정된 각 포트의 최대 이득을 적용하였다. 링크 버짓 계산에서 위성 송신 성능은 유효 등방성 복사 전력(EIRP)으로 표현된다. EIRP는 송신 전력 P_t 와 송신 안테나 이득 G_t 에 의해 결정되며, 식 (4)으로 나타낼 수 있다.

$$EIRP = G_t + P_t \quad (dBm) \quad (4)$$

저궤도 위성에서 방사된 전파는 지상국까지 전파되는 과정에서 거리와 주파수에 따라 자유공간 경로 손실(FSPL)이 발생한다. 이러한 감쇠는 L_{fs} 로 모델링하였으며, 데이터 전송 거리 d 와 동작 주파수 f 를 이용하여 식 (5)를 통해 계산하였다.

$$L_{fs} = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}\left(\frac{4\pi}{c_0}\right) \quad (dB) \quad (5)$$

본 시나리오에서는 추가적인 손실 요인으로 송신 안테나와 수신 안테나 간 편파 정합이 완전하지 않을 때 발생하는 손실 L_{pol} 과 안테나의 오정렬로 인해 발생하는 손실 L_{pos} 을 고려하였다. 대기 흡수, 강우 감쇠, 전리층 영향 등 기타 전파 환경 요인에 의한 감쇠는 제외하고 이상적인 전파 환경을 가정하였다. 지상국에서의 수신전력 P_r 은 EIRP에 G_r 을 더한 후 손실을 뺀 값으로 계산하며 식 (6)과 같이 계산된다.

$$P_r = EIRP + G_r - L_{fs} - L_{pol} - L_{pos} \quad (dBm) \quad (6)$$

표 2는 저궤도 위성 데이터링크 버짓 계산에 사

용된 송수신 시스템의 파라미터들을 나타낸다. 그림 11은 데이터 전송 거리가 300 km에서 1,200 km까지 변화할 때 지상국 수신전력의 변화를 나타낸다. 빔 조향각이 $+10^\circ$ 와 -15° 인 Port 1과 Port 4는 전송 거리 400 km에서 -110 dBm 이상의 수신전력을 나타낸다. 빔 조향각이 -45° 와 $+40^\circ$ 인 Port 2와 Port 3에서는 -115 dBm 이상의 값을 보인다. 해당 시나리오 기반 링크 버짓 분석을 통해 본 연구에서 설계한 배열안테나가 저궤도 위성 응용 분야에 적용 가능한 것을 확인하였다.

표 2. LEO 위성통신 시나리오 기반 데이터링크 버짓 파라미터

Table 2. LEO satellite communication scenario based datalink budget parameters

Parameters	Values	
Rx antenna gain (dBi)	Port 1	8.72
	Port 2	6.28
	Port 3	1.51
	Port 4	10.16
LEO satellite altitude (km)	300 ~ 1,200	
Frequency (GHz)	2	
Tx power (dBm)	30	
Tx antenna gain (dBi)	5	
EIRP (dBm)	35	
FSPL (dB)	L_{fs}	
L_{pol} (dB)	0.5	
L_{pos} (dB)	1	

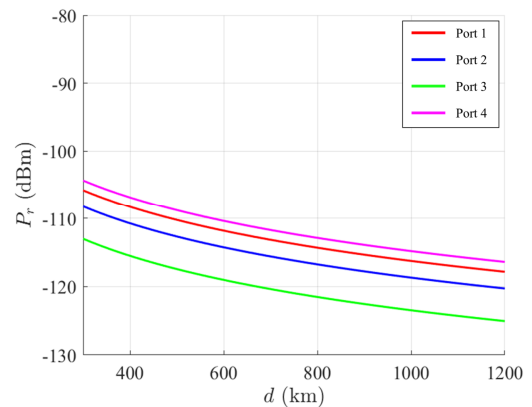


그림 11. 지상국 수신전력

Fig. 11. Received power at the ground station

V. 결 론

본 논문에서는 S-band 저궤도 위성통신용 기생 패치와 반사판 구조 기반 고지향성 광대역 원형편파 4소자 빔 조향 배열안테나를 제안하였다. 제안된 배열소자는 L-stub 급전구조, 기생 패치 및 반사판으로 구성하였으며, 각 구조 간 공기층은 3D 프린팅 기반 지그를 이용하여 정밀하게 유지하였다. 동작 주파수에서 반사계수는 측정값과 시뮬레이션 결과 -11.5 dB와 -12.6 dB로 나타났으며, 2 GHz에서 전면 방향 이득은 7.9 dBic와 8.12 dBic로 확인되었다. 버틀러 매트릭스 기반 4소자 배열안테나 빔 조향 특성을 측정한 결과는 Port 1 ~ Port 4 입력시 빔은 각각 $+10^\circ$, -45° , $+40^\circ$, -15° 방향으로 조향되었다. 각 조향각에 따른 최대 이득은 각각 8.72 dBic, 6.28 dBic, 1.51 dBic, 10.16 dBic로 측정되었다. 이와 같은 결과를 통해 제안된 4소자 배열안테나는 고지향성, 원형편파 및 빔 조향 특성이 나타남을 확인하였다.

References

- [1] O. Kodheli, E. Lagunas, N. Maturo, S. K. Sharma, B. Shankar, J. F. Montoya, J. C. Duncan, D. Spano, S. Chatzinotas, S. Kisseleff, and J. Querol, "Satellite communications in the new space era: A survey and future challenges", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 23, No. 1, pp. 70-109, Oct. 2021. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3028247>.
- [2] Y. H. KO and S. Park, "Design and Fabrication of LHCP Antenna for Satellite-DMB/WiBro repeater", *Journal of Korean Institute of Information Technology*, Vol. 8, No. 10, pp. 35-43, 2010.
- [3] X. Zhang, K. Wei, Y. Li, and Z. Zhang, "A polarization reconfigurable antenna for satellite communication in foldable smartphone", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 71, No. 12, pp. 9938-9943, Dec. 2023. <https://doi.org/10.1109/tap.2023.3314084>.
- [4] Z. Cao, L. Chang, Y. Li, K. Wei, and Z. Zhang, "Compact mobile terminal antenna with endfire circularly polarized beam for satellite communications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 71, No. 12, pp. 9980-9985, Dec. 2023. <https://doi.org/10.1109/tap.2023.3325204>.
- [5] L. You, K. X. Li, J. Wang, X. Gao, X. G. Xia, and B. Ottersten, "Massive MIMO transmission for LEO satellite communications", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 38, No. 8, pp. 1851-1865, Aug. 2020. <https://doi.org/10.1109/jsac.2020.3000803>.
- [6] J. S. Row and S. W. Wu, "Circularly-polarized wide slot antenna loaded with a parasitic patch", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 56, No. 9, pp. 2826-2832, Sep. 2008. <https://doi.org/10.1109/tap.2008.928769>.
- [7] W. B. Yang, K. R. Hyun, and S. W. Oh, "K-Band Circularly Polarized Antenna using a Stacked Patch Structure with Arc-Shaped Slot", *The Journal of Korean Institute of Information Technology*, Vol. 23, No. 10, pp. 117-123, Oct. 2025. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2025.23.10.117>.
- [8] S. S. Hao, Q. Q. Chen, J. Y. Li, and J. Xie, "A high-gain circularly polarized slotted patch antenna", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 19, No. 6, pp. 1022-1026, Jun. 2020. <https://doi.org/10.1109/lawp.2020.2987330>.
- [9] K. L. Chung and A. S. Mohan, "A systematic design method to obtain broadband characteristics for singly-fed electromagnetically coupled patch antennas for circular polarization", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 51, No. 12, pp. 3239-3248, Dec. 2003. <https://doi.org/10.1109/tap.2003.820949>.
- [10] J. W. Kim, Y. Jang, D. Ahn, and S. Lee, "Design and Implementation of Small Sized 4×4 Butler Matrix", *Journal of Korean Institute of Information Technology*, Vol. 16, No. 6, pp.

37-43, Jun. 2018. <http://doi.org/10.14801/jkiit.2018.16.6.37>.

- [11] Y. W. Kim, H. Chae, D. Lee, M. D. Jeong, and J. Park, "A Study on the Stabilized System Operation Considering the Reflection Characteristic of an Active-Phased Array Antenna", The Journal Of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 23, No. 1, pp. 29-37, Jan. 2012. <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2012.23.1.029>.

2022년 12월 ~ 2023년 12월 : 국방과학연구소 선임연구원

2024년 1월 ~ 현재 : 국립금오공과대학교 전자공학부

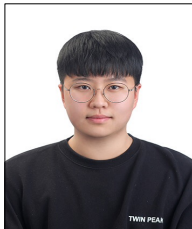
조교수

관심분야 : 우주 감시 레이더, 6G 시스템용 안테나,

고출력 배열안테나, 적응형 빔포밍

저자소개

이 현 수 (Hyunsoo Lee)



2026년 2월 : 국립금오공과대학교

전자공학부(공학사)

2026년 3월 ~ 현재 :

국립금오공과대학교 전자공학과

석사과정

관심분야 : 안테나 설계

류 성 준 (Sungjun Yoo)



2014년 2월 : 홍익대학교

전자전기공학부(공학사)

2016년 8월 : 홍익대학교

전자전기공학과(공학석사)

2019년 8월 : 홍익대학교

전자전기공학과(공학박사)

2019년 12월 ~ 2025년 2월 :

국방과학연구소 선임연구원

2025년 3월 ~ 현재 : 국립경국대학교 전자공학과 조교수

관심분야 : 위성 및 통신 배열안테나, 광자 레이더

임 태 흥 (Tae Heung Lim)



2016년 8월 : 홍익대학교

전자전기공학부(공학사)

2018년 8월 : 홍익대학교

전자전기공학과(공학석사)

2022년 2월 : 홍익대학교

전자전기공학과(공학박사)

2022년 3월 ~ 2022년 11월 :

울산과학기술원 박사후 연구원