

무선 백홀 통신용 개구부 결합 슬롯 도파관 배열 원형 편파 안테나

Circularly Polarized Aperture-Coupled Slotted-Waveguide Array Antenna for Wireless Backhaul Communications

윤수정¹ · 이가현² · 이정남^{3*} · 조영균⁴Su-Jeong Yun¹ · Ka-Hyun Lee² · Jung-Nam Lee^{3*} · Young-Kyun Cho⁴

요 약

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 사용 가능한 개구면 결합 슬롯 도파관 배열 원형 편파 안테나를 제안하였다. 제안된 구조는 안테나 상단에 개구부를 추가하여 방사 슬롯 간 상호 결합 영향을 낮추어 고이득 특성을 얻었다. 또한, 개구부의 두 모서리를 절단하여 전류분포를 바꿈으로써 원형 편파 특성을 얻었다. 이에 덧붙여, 공동 급전 네트워크에 격벽을 삽입하여 원활한 전력 분배를 유도하였다. 제안된 16×16 배열 안테나의 측정된 임피던스 대역폭은 26.5 GHz에서 28.3 GHz로 6.7 %이며, 최대 이득은 27.8 GHz에서 33.8 dBic이다. 제안된 안테나는 작동 대역에서 안정적인 방사 패턴과 높은 이득 특성을 통해 밀리미터파 대역 무선 백홀 시스템에 적용될 수 있다.

Abstract

This paper presents a truncated aperture-coupled slotted-waveguide array antenna. The proposed structure achieves circular polarization and enhanced gain characteristics by incorporating a truncated aperture at the top of the antenna. The truncated aperture effectively reduces mutual coupling effects between radiating slots and modifies current distributions. In addition, a septum and iris were added into the feeding network to ensure proper current distribution. The proposed 16×16 array antenna demonstrates a measured impedance bandwidth of 6.7 % from 26.3 GHz to 28.3 GHz, and a maximum gain of 33.8 dBic at 27.8 GHz.

Key words: Array Antenna, Aperture Coupled Slotted Array Antenna, Circular Polarization, Millimeter-Wave Antenna, High Gain

I. 서 론

무인 공중이동체(UAV, unmanned aerial vehicle)는 무선 네트워크의 적용 범위와 용량을 향상시키기 위해 비행

기지국으로 활용될 수 있으며, 기존 셀룰러 시스템을 보완할 수 있는 이동형 통신 인프라로 주목받고 있다^[1]. 이와 같은 통신 인프라 구축을 위해서는 다수의 UAV와 지상 기지국을 연결하는 장거리 고속 이동 백홀이 필요하

「This research was supported in part by the MSIT (Ministry of Science and ICT), Korea, under the ITRC (Information Technology Research Center) support program (IITP-2023-RS-2022-00156295) and Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education under Grant NRF-2021R1F1A1056073.」

충남대학교 전파정보통신공학과(Department of Radio & Information Communications Engineering, Chungnam National University)

*한국전자통신연구원 전파연구부(Radio Research Division, Electronics and Telecommunications Research Institute)

1: 석·박사 통합과정(<https://orcid.org/0009-0003-6232-5505>), 2: 석·박사 통합과정(<https://orcid.org/0009-0005-4671-4994>),

3: 선임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-2058-5048>), 4: 교수(<https://orcid.org/0000-0001-7803-3417>)

· Manuscript received December 14, 2023 ; Revised January 1, 2024 ; Accepted January 10, 2024. (ID No. 20231214-106)

· Corresponding Author: Young-Kyun Cho (e-mail: ykcho@cnu.ac.kr)

다^[2]. 특별히, 이러한 응용에서는 UAV의 이동 방향에 따라 수신감도가 영향을 받지 않도록 원형 편파 특성을 갖는 안테나가 필수적이며, 밀리미터파 대역의 큰 전파 손실과 낮은 회절 특성을 극복하기 위한 고이득 안테나가 요구된다.

도파관 슬롯 배열(SWA, slotted waveguide array) 안테나는 금속 도파관에 일정한 간격의 슬롯을 뚫어 만든 형태로, 평면형 구조로 인해 다른 시스템과의 통합이 쉽고 낮은 방사 손실로 인해 높은 이득과 효율을 갖는다는 장점이 있다. 따라서, 원형 편파와 고이득 특성을 동시에 달성해야 하는 이동식 무선 백홀용 안테나로 적합하다.

밀리미터파 대역 SWA 안테나는 다양한 구조 변경을 통해 성능의 진보를 이루어 왔지만, 각 구조에 따른 단점을 갖고 있다. 참고문헌 [3]에서는 금속-그루브 구조를 채택하여 고이득 특성을 얻었지만, 3.41 %의 좁은 대역폭 특성을 보인다. 참고문헌 [4]에서는 분할된 패치를 방사 요소 활용하여 향상된 대역폭과 원형 편파 특성을 달성하였으나, 마이크로스트립 구조의 저항 및 유전 손실로 인해 효율이 낮다.

본 논문에서는 기존의 SWA 안테나의 단점을 극복하기 위해 절단된 개구면 결합(TAC, truncated aperture-coupled) 구조를 이용하여 높은 이득과 원형 편파 특성을 갖는 밀리미터파 대역 무선 백홀용 SWA 안테나를 제안하였다.

II. TAC SWA 안테나

2-1 TAC SWA 단위 배열 안테나

그림 1은 제안된 TAC SWA 단위 배열 안테나와 설계치를 나타낸 것이다. 제안된 안테나는 알루미늄으로 제작되었으며, 하단은 직사각형 도파관(waveguide)과 급전 슬롯(feeding slot)으로, 상단은 방사 슬롯(radiating slot)과 TAC 개구부로 이루어져 있다. 또한, 상단과 하단 사이에는 벽으로 구성된 공동(cavity)이 있다. 슬롯 간 간격은 x , y 축으로 $0.9 \lambda_0$ 이다. 안테나의 하단에서 인가된 전력은 급전 슬롯을 거쳐 공동에서 방사 슬롯으로 분배된 후, TAC로 전달된다. 제안된 안테나에서 TAC는 안테나의 이득 특성에 큰 영향을 미치며, 모서리가 잘린 정도는 원형

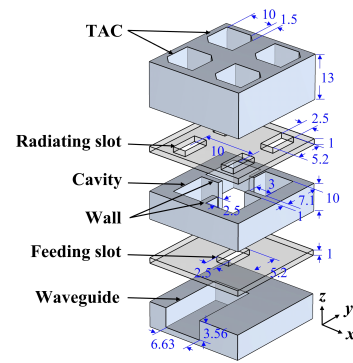


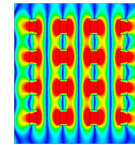
그림 1. 제안된 안테나의 단위 배열 구조(단위: mm)

Fig. 1. Unit array geometry of the proposed antenna (unit: mm).

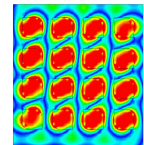
편파 특성을 결정하는 중요한 변수이다. 또한, 공동 층의 x 축 벽은 임피던스 매칭에 영향을 준다.

2-2 작동원리

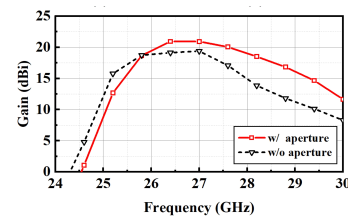
TAC 개구부가 이득에 미치는 영향을 설명하기 위해 단위 배열 구조를 이용한 4×4 배열의 시뮬레이션 결과를 그림 2에 나타내었다. 개구부가 없는 경우, 그림 2(a)와 같이 방사 슬롯에서 표면파 전류 형성에 의해 인접한 슬롯 간 상호 결합(MC, mutual-coupling)이 발생하며, 강한 MC는 안테나의 이득을 감소시킨다^[5]. 반면, 개구부가 있는 경우, 그림 2(b)와 같이 슬롯 간 MC가 완화되며, 안테나



(a) 개구부 없을 경우
(a) w/o aperture



(b) 개구부 있을 경우
(b) w/ aperture



(c) 개구부 유무에 따른 이득
(c) Gain comparison

그림 2. 전기장 분포

Fig. 2. E-field distributions.

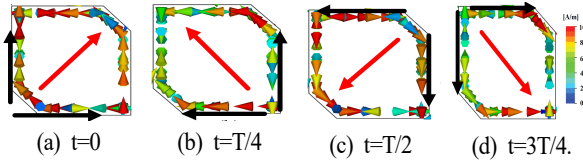


그림 3. TAC 개구부의 시간에 따른 전류분포
Fig. 3. Current distribution of the TAC aperture with respect to the time.

의 이득은 증가된다. 그림 2(c)는 개구부 유무에 따른 안테나의 이득이 작동 대역에서 최대 4 dB 차이가 나는 것을 보여준다. TAC 개구부의 시간에 따른 전류분포를 그림 3에 나타내었다. 모서리가 잘린 개구부로 인해 전류분포의 벡터 합성 방향은 시간에 따라 90° 차이가 나고, 결과적으로 원형 편파가 형성됨을 확인할 수 있다.

2-3 TAC SWA 16×16 배열 안테나

그림 4는 제안된 TAC SWA 안테나의 16×16 배열 구조를 나타낸 것이다. 안테나는 상단에서부터 TAC, 방사 슬롯, 공동, 급전 슬롯, 급전 네트워크(feeding network)로 이루어져 있다. 이때 급전 네트워크는 단일 도파관 구조를 H-접합(H-junction) 형태로 연결하여 설계하였다^[6]. H-접합 급전에는 매칭 특성 개선을 위해 iris를 추가하였고, 원활한 전력 분배를 위해 격벽 형태의 septum을 삽입하였다. 이를 통해 급전 도파관에서 형성된 TE₁₀ 모드는 H-접합을 통해 공동으로 적절히 분기될 수 있다.

III. 측정 결과

제작된 TAC SWA 배열 안테나와 설계 치수를 그림 5

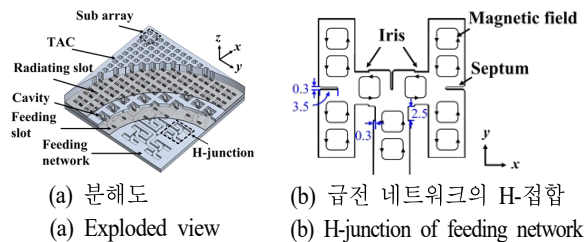


그림 4. 제안된 16×16 배열 안테나의 구조(단위: mm)
Fig. 4. Geometry of the proposed 16×16 array antenna (unit: mm).

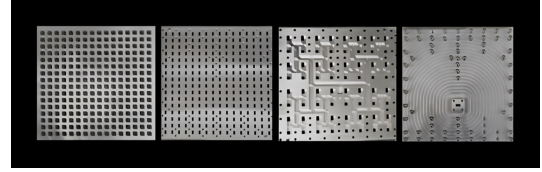
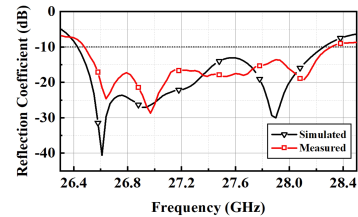
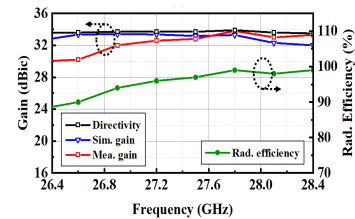


그림 5. 제안된 16×16 배열 안테나의 프로토타입.
Fig. 5. Prototype of the proposed 16×16 array antenna.

에 나타내었다. 제안된 안테나의 전체 크기는 $160 \times 160 \times 266 \text{ mm}^3$ 로 밀링 공정을 통해 제작되었다. 그림 6는 제안된 안테나의 시뮬레이션 및 측정 결과를 보여준다. 측정된 임피던스 대역폭과 이득은 시뮬레이션과 잘 일치하며, 26.5 GHz에서 28.3 GHz까지 6.7 %의 대역폭과 27.8 GHz에서 33.8 dBi의 최대 이득을 갖는다. 그림 7은 측정된



(a) 반사 계수
(a) Reflection coefficient



(b) 지향성, 이득 및 방사 효율
(b) Directivity, gain and radiation efficiency

그림 6. 측정 및 시뮬레이션 된 결과

Fig. 6. Measured and simulated results.

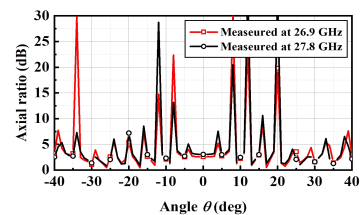


그림 7. 26.9, 27.8 GHz에서 측정 및 시뮬레이션 된 축비
Fig. 7. Measured and simulated axial ratio at 26.9, 27.8 GHz.

측비로, 전체 동작 주파수에서 3 dB 이내인 것을 알 수 있다. 그림 8은 E, H-plane에서의 시뮬레이션 및 측정된 방사 패턴을 주파수 별로 나타낸 것이다. 사이드 로브 레벨은 전체 동작 주파수 대역에서 -11.8 dB 이하이며, 그 레이팅 로브 없이 안정적인 방사 패턴 특성을 보인다. 3 dB 빔 폭은 약 3.5° 이다. 참고문헌 [7]에 따라 측정된 이득과 시뮬레이션 된 지향성으로 계산한 안테나의 방사 효율은 전대역에서 약 88 % 이상이며, 개구효율은 27.8 GHz에서 약 91 %다. 표 1은 제안된 안테나와 SWA 안테나의 성능을 비교한 것이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 사용 가능한 TAC SWA 배열 안테나를 제안하였다. 제안된 TAC SWA 안테

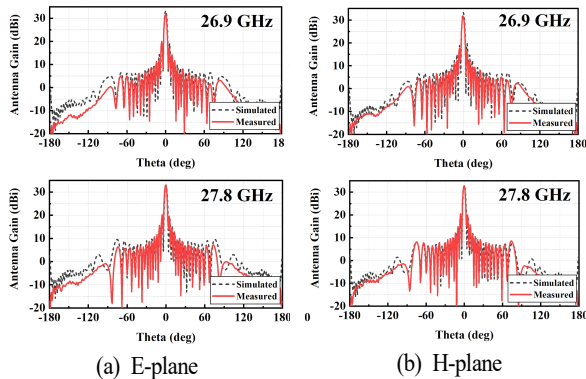


그림 8. 26.9, 27.8 GHz에서 측정 및 시뮬레이션 된 방사 패턴

Fig. 8. Measured and simulated radiation pattern at 26.9, 27.8 GHz.

표 1. 제안된 안테나와 SWA 안테나의 성능 비교

Table 1. Comparison of the performance between the proposed antenna and the SWA antenna.

	Array size	Bandwidth (%)	Max. gain	SLL (dB)
Ref. [3]	1×27	3.41	27.7 dBi	-7.8
Ref. [8]	8×8	9.40	21.5 dBi	-16.3
Ref. [9]	8×32	6.45	30.8 dBi	-11.0
This work	16×16	6.70	33.8 dBic	-11.8

나는 모서리가 잘린 개구부와 급전 네트워크의 격벽 추가 구조로 6.7 %의 대역폭과 33.8 dBic의 최대 이득을 얻을 수 있었다.

References

- [1] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y. H. Nam, and M. Debbah, "A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems," *IEEE Communications Surveys Tutorial*, vol. 21, no. 3, pp. 2334-2360, Mar. 2019.
- [2] Z. Gu, J. Zhang, Y. Ji, L. Bai, and X. Sun, "Network topology reconfiguration for FSO-based fronthaul/backhaul in 5G+ wireless networks," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 69426-69437, 2018.
- [3] E. C. Vilas Boas, R. Mittra, and A. Cerqueira Sodre, "A low-profile high-gain slotted waveguide antenna array with grooved structures," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 12, pp. 2107-2111, 2020.
- [4] J. Xu, M. Wang, H. Huang, and W. Wu, "Circularly polarized patch array fed by slotted waveguide," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 8-11, 2015.
- [5] C. Craeye, D. González-Ovejero, "A review on array mutual coupling analysis," *Radio Science*, vol. 46, no. 2, pp. 1-25, 2011.
- [6] J. Joubert, S. R. Rengarajan, "Design of unequal Hplane waveguide power dividers for array application," *Micro-wave Journal*, vol. 40, no. 2, pp. 1636-1639, Jul. 1997.
- [7] Constantine A Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, New York, NY, John Wiley & Son, p. 811, 2005.
- [8] H. Luo, Y. Xiao, X. Lu, and H. Sun, "Design of a dual-polarization single-ridged waveguide slot array with enhanced bandwidth," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 1, pp. 138-142, Jan. 2019.
- [9] Y. E. Yamaç, A. Çalışkan, A. S. Türk, and A. Kızılay, "A low-profile hollow waveguide slot array antenna with full-corporate feeding network at K-band," *Advanced Electromagnetics*, vol. 11, no. 2, pp. 23-27, 2022.