

다중 기생 공진 억제를 통한 X/Ku-대역 TCDA 배열안테나 설계

Design of X/Ku-Band TCDA Array Antenna with Suppressed Multi-Parasitic Resonances

김준희¹ · 김진우^{2*} · 이종선^{3*} · 황금철⁴

Jun Hee Kim¹ · Jin Woo Kim^{2*} · Jong Seon Lee^{3*} · Keum Cheol Hwang⁴

요약

본 논문은 X/Ku-대역에서 다중 기생 공진이 억제된 TCDA(tightly coupled dipole array) 배열안테나를 제안한다. L-shaped strip과 decoupling wall 구조를 적용하여 인접 소자 간 표면파/평행판(parallel-plate) 모드로 인한 다중 기생 공진을 억제함으로써 scan blindness를 완화하였다. 제작한 5×5 배열안테나는 X/Ku-대역 전반에서 -6 dB 이하의 능동반사계수를 만족하였으며, 방위각 ±30°, 고각 ±15° 빔 조향 시 grating lobe가 발생하지 않으며, 빔 조향 시 이득은 8/13/18 GHz에서 각각 약 14.7/19.2/20.3 dBi 이상임을 확인하였다.

Abstract

In this study, a Tightly Coupled Dipole Array (TCDA) antenna operating in the X/Ku-band with suppressed multi-parasitic resonances is proposed. The antenna uses L-shaped strips and a decoupling wall structure to effectively mitigate unwanted multi-parasitic resonances between adjacent elements. The fabricated 5×5 array antenna satisfies the -6 dB active reflection coefficient standard over the X/Ku-band. Furthermore, it is confirmed that no grating lobes occur during beam scanning, and the gains during beam scanning are higher than 14.7/19.2/20.3 dBi at 8/13/18 GHz, respectively.

Key words: TCDA Array, Multi-Parasitic Resonances, Scan Blindness, Grating Lobe

I. 서론

현대의 레이더, 위성통신, 전자전(EW) 및 차세대 무선 통신 시스템은 단일 안테나 시스템으로 다중 대역에서 다양한 임무를 수행할 수 있는 초광대역(UWB, ultra-wideband) 위상배열안테나를 요구하고 있다. 이러한 광대

역 요구를 만족시키기 위한 유력한 기술로 TCDA(tightly coupled dipole array)의 연구가 활발히 진행되고 있다. TCDA는 소자 간 용량성 결합을 통해 저주파에서 접지 평면이 야기하는 유도성 리액턴스를 상쇄시켜 광대역 임피던스 매칭을 구현한다. 하지만 고주파수로 갈수록 이러한 용량성 결합이 LC 회로가 아닌 분산(distributed) 소자

「이 논문은 2025년도 한화시스템의 재원을 지원받아 수행된 연구임.」

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University)

*한화시스템(Hanwha Systems)

1: 석 · 박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0001-8771-6615>), 2: 전문연구원(<http://orcid.org/0009-0004-5114-8934>),

3: 연구원(<http://orcid.org/0000-0002-1505-260X>), 4: 정교수(<https://orcid.org/0000-0002-8074-1137>)

· Manuscript received November 5, 2025 ; Revised November 19, 2025 ; Accepted March 4, 2026. (ID No. 20251105-137)

· Corresponding Author: Keum Cheol Hwang (e-mail: khwang@skku.edu)

로 동작하여 다중 기생 공진 문제가 발생할 수 있고 이는 성능을 저하시킨다. 이를 개선하고자 본 논문에서는 X-대역 및 Ku-대역에서 동작하며 다중 기생 상호간섭을 억제하는 TCDA 안테나를 제안한다. 능동 방사패턴 개선을 위해 용량성 부하를 적용하였으며, 인접 소자 간 형성되는 도파관 모드를 물리적으로 차단하는 decoupling wall 구조를 결합 및 $\lambda/4$ 스텐브(stub)로 동작하는 L-shaped strip을 사용하여 표면파로 인한 scan blindness를 효과적으로 제거함으로써 다중 기생 공진을 억제하였다.

II. 단일 안테나 설계

그림 1은 제안된 X/Ku-대역 TCDA 안테나 형상을 나타낸다. 각 다이폴 arm은 Taconic社 TLY-5($\epsilon_r=2.2$, 손실탄젠트 $\tan\delta=0.0009$, 두께 0.76 mm)가 적층된 기판에 BA(balanced-antipodal) 형태로 구현되었다. 접착층의 경우 Rogers社 RO4450B($\epsilon_r=3.7$, 손실탄젠트 $\tan\delta=0.004$, 두께 0.0762 mm)를 활용하였다. 임피던스 매칭은 테이퍼드 발룬 구조를 통해 이루어지며 고주파수에서 전류가 테이퍼 영역에 집중되지 못하고 가장자리로 퍼져나가는 현상을 억제하기 위해 비아 펜스가 형성되어 있다(표 1). TCDA 안테나의 기본 구조 설계를 위해 무한 주기를 가정하는 UnitCell 기반 시뮬레이션을 통하여 설계 진행하였으며, 시뮬레이션 tool은 Dassault System社의 CST Microwave Studio를 활용하였다. 광대역 배열안테나를 활용하여 빔 조향 수행 시 고주파수에서 grating lobe가 발생하지 않도록 하기 위

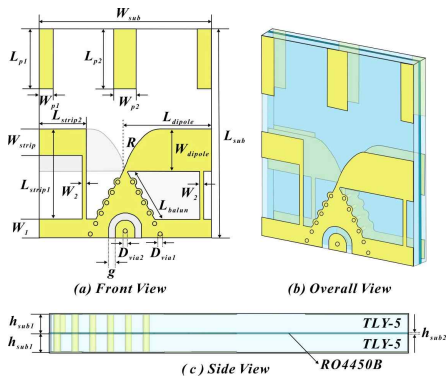


그림 1. 제안된 TCDA 안테나 구조
Fig. 1. Geometry of the proposed TCDA antenna.

표 1. 제안된 TCDA 안테나 설계 파라미터(단위: mm)
Table 1. Design parameters of a proposed TCDA antenna (unit: mm).

W_{sub}	12.6	W_{p1}	1.03	L_{dipole}	6.40	D_{via1}	0.30
W_{strip}	1.96	W_{p2}	1.65	L_{balun}	4.06	D_{via2}	0.30
W_{dipole}	3.09	L_{sub}	15.35	L_{p1}	4.40	h_{sub1}	0.76
W_1	1.40	L_{strip1}	6.60	L_{p2}	4.40	h_{sub2}	0.076
W_2	0.31	L_{strip2}	3.46	g	0.52	R	0.515

해서는 복사소자 간 간격을 충분히 작게 유지해야 한다. 그러나 이러한 근접 배치는 방사 에너지가 인접 소자 간에 갇히면서 원치 않는 기생 공진이 형성될 수 있다. 기생 공진은 방사저항을 낮추고 동시에 리액턴스 성분을 증가시킴으로써 그림 2의 reference 안테나와 같이 능동반사계수가 열화되는 scan blindness를 야기할 수 있다^[1]. 이러한 기생 공진은 주로 인접 소자 간 강한 표면파 형성 및 parallel plate 도파관 모드 형성에 의해 나타날 수 있다. 우선 표면파에 의한 기생 공진을 억제하고자 L-shaped strip 형태의 3 $\lambda/4$ 스텐브를 추가하여 RF choke처럼 동작하도록 LC 공진을 형성함으로써 인접소자 간 기생 공진을 억제하였다^[2]. 그림 3은 12.1 GHz에서 L-shaped strip 유/무에 따른 전기장 분포로 인접 소자 간 형성된 강한 기생 공진이 억제됨을 확인할 수 있다. 다음으로 parallel plate 모드에 의한 기생 공진을 억제하기 위해 각 복사소자 사이에 decoupling wall 구조를 추가하였다. 비발디 혹은 제안된 TCDA와 같은 평판형 타입의 안테나 배열 시 방사되지 못하고 마주보는 인접 소자 사이에 가상의 도파관 공동 모

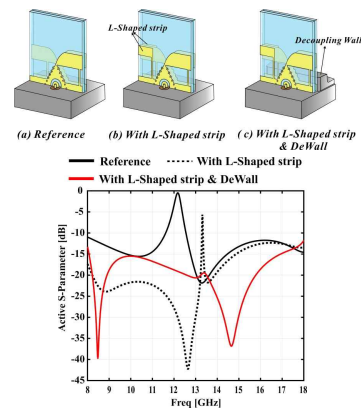


그림 2. TCDA 안테나 능동반사계수 결과
Fig. 2. Active S-parameter of a TCDA antenna.

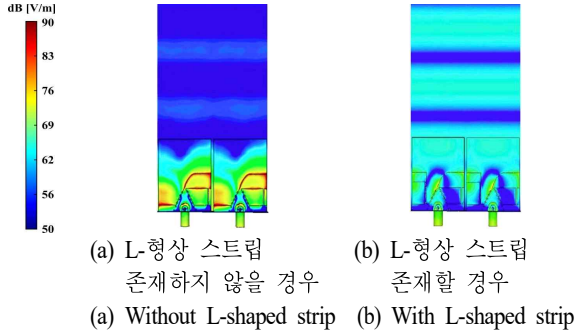


그림 3. L-shaped strip 유/무에 따른 전기장 분포
Fig. 3. Electric field distribution (with/without L-shaped strip).

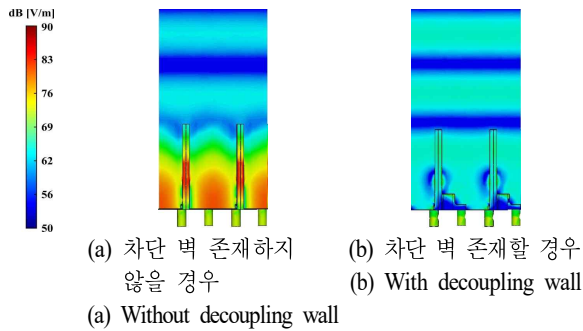


그림 4. Decoupling wall 유/무에 따른 전기장 분포
Fig. 4. Electric field distribution (with/without decoupling wall).

드가 형성될 수 있다^[3]. 식 (1)은 이상적으로 모든 면이 닫힌 형태의 직사각 도파관 공진기의 공진 파수로 a , b , 및 d 는 각각 폭, 길이 및 높이를 의미하며 m , n , 및 l 은 각 차원의 모드 차수를 의미한다. 해당 식을 기반으로 가상의 도파관 공동의 TE_{10l} -like 모드와 위상 정합이 이루어질 경우 에너지가 방사되지 못하고 갇히게 된다. 그림 4는 decoupling wall 유/무에 따른 전기장 분포로 복사소자 사이에 TE_{10} 모드 형태의 전기장 분포가 형성되는 것을 확인할 수 있으며 decoupling wall 존재 시 이러한 기생 공진을 억제할 수 있음을 보였다.

$$k_{mnl} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2} \quad (1)$$

III. 5×5 배열안테나 설계 및 측정

그림 5는 제작된 5×5 TCDA 배열 안테나로 복사 소자 간 간격은 18 GHz 기준으로 방위각 ±30° 및 고각 ±15° 빔

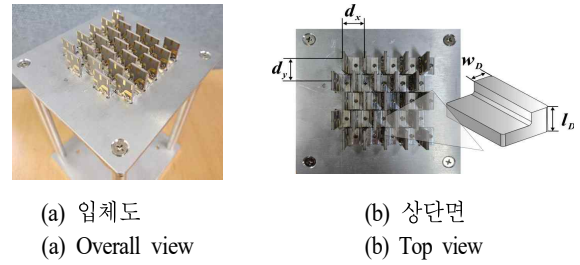


그림 5. 제작된 5×5 TCDA 안테나 형상
Fig. 5. Fabricated 5×5 TCDA antenna structure.

조향 시 grating lobe가 발생하지 않을 조건을 고려하여 dx 와 dy 를 각각 13 mm, 13.2 mm로 선정하였으며 삼각 그리드 형태로 구현하였다. Decoupling wall 구조의 경우 l_D 는 4 mm, w_D 는 3 mm로 설계되었다. 그림 6은 용량성 부하 유/무에 따른 능동방사패턴 결과로 빔 조향 시 scan loss를 감소시키기 위해 기판 끝단에 18 GHz 기준 반파장의 간격을 갖는 세 개의 용량성 부하를 추가하였다. 이는 각 부하에 인가되는 전류의 방향이 서로 반대되게 형성함으로써 상쇄 간섭이 일어나게 되고 유효 개구 면적이 줄어들게 된다. 이로 인해 능동방사패턴이 상대적으로 넓어지는 효과를 보임으로써 빔 조향 시 scan loss를 감소시킬 수 있다. 제작한 안테나를 VNA(vector network analyzer)를 활용하여 중심소자로부터 각 소자로의 S_{21} 산란계수를 측정 한 후 식 (2)를 통하여 능동방사계수를 계산하였으며 x_n 및 y_n 은 각 복사소자의 위치 좌표, θ_0 및 ϕ_0 는 빔 조향 각도를 의미한다. 이를 그림 7에 도시하였다.

$$I(\lambda, \theta_0, \phi_0) = \sum_{n=1}^{25} S_{Center,n} \times e^{-jk(x_n \sin\theta_0 \cos\phi_0 + y_n \sin\theta_0 \sin\phi_0)} \quad (2)$$

전반적으로 측정 결과와 시뮬레이션 결과가 유사하였으며, 주파수 대역 내 전반적으로 -6 dB 이하 특성을 만

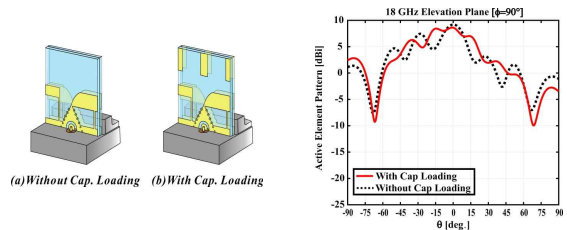


그림 6. 용량성 부하 유/무에 따른 능동방사패턴
Fig. 6. Active radiation pattern (with/without capacitive loading).

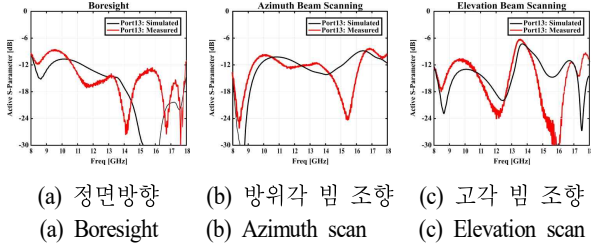


그림 7. 능동반사계수 측정 결과
Fig. 7. Measured active S -parameter.

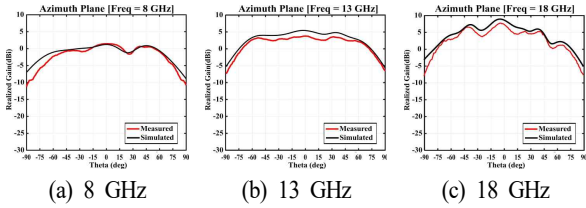


그림 8. 방위각 평면 능동방사패턴 측정 결과($\phi=0^\circ$)
Fig. 8. Measured azimuth plane radiation pattern ($\phi=0^\circ$).

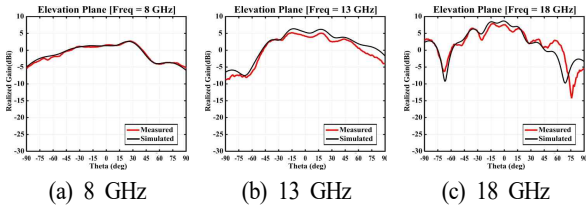


그림 9. 고각 평면 능동방사패턴 측정 결과($\phi=90^\circ$)
Fig. 9. Measured elevation plane radiation pattern ($\phi=90^\circ$).

축함을 확인하였다. 그림 8 및 그림 9는 중심소자 이외의 다른 소자를 모두 50- Ω 종단시킨 후 중심소자를 급전하여 측정된 능동방사패턴 결과이며, 시뮬레이션 결과와 유사한 경향성을 보인다. 따라서 검증된 측정 결과들을 토대로 전체 배열의 동시급전을 통한 빔 조향 방사패턴은 시뮬레이션 결과를 통해 그림 10 및 그림 11에 도시하였다. 각 방위각 $\pm 30^\circ$ 및 고각 $\pm 15^\circ$ 빔 조향 시 grating lobe가 발생하지 않으며 이득의 경우 빔 조향 시 8 GHz에서 약 14.7 dBi, 13 GHz에서 19.2 dBi, 18 GHz에서 약 20.3 dBi 이상을 만족한다.

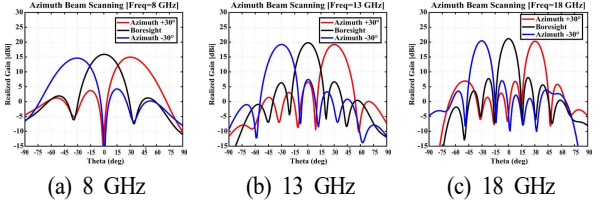


그림 10. 방위각 $\pm 30^\circ$ 빔 조향 시 방사 패턴 ($\phi=0^\circ$)
Fig. 10. Azimuth beam scanning radiation pattern ($\phi=0^\circ$).

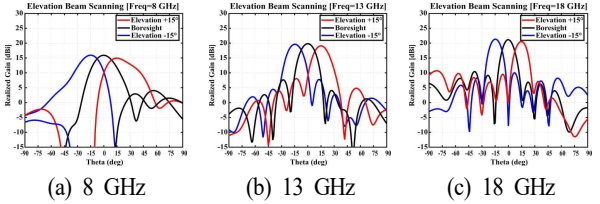


그림 11. 고각 $\pm 15^\circ$ 빔 조향 시 방사 패턴($\phi=90^\circ$)
Fig. 11. Elevation beam scanning radiation pattern ($\phi=90^\circ$).

IV. 결 론

본 논문에서는 X-대역 및 Ku-대역에서 동작하는 광대역 TCDA 안테나를 제안한다. L-shaped strip 및 decoupling wall 구조를 통해 인접 소자 간 발생하는 기생 공진을 억제함으로써 -6 dB 이하의 능동반사계수와 빔 조향 시 grating lobe가 발생하지 않음을 확인하였다. 실측 및 시뮬레이션 일치로 설계의 실효성을 검증했으며, 광대역 능동위상배열 레이더용 복사소자로의 적용 가능성을 확인하였다.

References

- [1] B. Wang, S. Yang, Y. Chen, S. Qu, and J. Hu, "Low cross-polarization ultrawideband tightly coupled balanced antipodal dipole array," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 6, pp. 4479-4488, Jun. 2020.
- [2] S. X. Ta, H. Choo, and I. Park, "Broadband printed-dipole antenna and its arrays for 5G applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 2183-2186, May 2017.
- [3] Z. Xu, C. Zhang, T. Kaufmann, X. Yan, Y. Yuan, and C. Fumeaux, "Analysis of scan blindness in a linearly polarized tapered-slot phased array in triangular lattice: Performance improvement with parasitic notches," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 8, pp. 4057-4066, Aug. 2014.