

능동위상배열레이다용 초광대역 비발디 배열 안테나

Ultra-Wideband Vivaldi Array Antenna for Active Phased Array Radar

김준희¹ · 이인곤^{2*} · 이승의^{2*} · 배영석^{3**} · 황금철⁴Jun Hee Kim¹ · In-Gon Lee^{2*} · Seung Eui Lee^{2*} · Young Seok Bae^{3**} · Keum Cheol Hwang⁴

요 약

본 논문에서는 X-대역 및 Ku-대역을 포함하는 능동반사계수가 개선된 광대역 비발디 배열 안테나를 제안한다. 제안하는 비발디 안테나 구조의 경우, corrugation 형태의 슬롯 및 sliced notch 구조를 적용함으로써 광대역 특성을 구현하였으며, 인근 복사소자 간 형성되는 parallel-plate mode를 decoupling wall 구조를 통하여 제거함으로써 상호 간섭을 저감시켜 능동반사계수 특성을 개선하였다. 5×5 배열 안테나를 통하여 능동반사계수를 측정하였으며, 동작 주파수 대역 내에서 -6 dB 이하 특성을 만족함을 확인하였다. 5×5 배열 안테나 이득은 정면방향 기준으로 저주파수 대역에서 16.9 dBi, 중심 주파수 대역에서 20.8 dBi, 고주파수 대역에서 22.2 dBi 특성을 갖는다.

Abstract

In this study, we propose a broadband Vivaldi array antenna with an improved active reflection coefficient covering the X-band and Ku-band. The proposed Vivaldi antenna incorporates corrugation slots and sliced notched structure to achieve broadband characteristics. By eliminating the parallel-plate mode using a decoupling wall, the mutual coupling between adjacent elements is reduced, and the active reflection coefficient is enhanced. The measured active reflection coefficient is below 6 dB within the operating frequency range. The 5×5 array antenna gain is 16.9 dBi in the low-frequency, 20.8 dBi in the central-frequency, and 22.2 dBi in the high-frequency region.

Key words: Wideband Array Antenna, Active Reflection Coefficient, Decoupling Wall, Corrugation Slot Vivaldi

I. 서 론

최근 통신, 전자전, 레이더 시스템 등 다양한 환경에서 광대역 안테나를 활용한 배열안테나 요구도가 높아지고 있다. 광대역 안테나의 경우, 넓은 대역폭을 활용하여 많은 양의 데이터를 동시에 전송할 수 있기에 데이터 전송 속도가 증가하게 된다. 하지만, 광대역 배열 안테나를 활용하여 전자식 빔 조향을 수행하는 시스템의 경우, 반드

시 빔 조향 시 grating lobe가 발생하지 않는 복사소자 간격을 고려하여야 한다. Grating lobe의 경우, array factor의 주기성에 의해 나타나는 현상으로 주로 소자 간 간격, 빔 조향 각도 및 전기적 파장에 의해 결정된다. 넓은 각도의 빔 조향을 요구할 경우, 소자 간 간격은 더욱 가까워져야 한다. 이로 인해 복사소자 간 상호간섭이 야기되어 능동 반사계수 특성에 열화가 발생하고, 전체 시스템 운용 능력을 저하시키게 된다. 본 논문에서는 X-대역 및 Ku-대역

「이 논문은 2023년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UG223081TD).」
성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University)

*한화시스템(주) (Hanwha Systems Co., Ltd.)

**국방과학연구소 (Agency for Defense Development)

1: 석·박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0001-8771-6615>), 2: 전문연구원(<https://orcid.org/0000-0002-3974-4766>)

3: 선임연구원(<https://orcid.org/0000-0001-7841-3858>), 4: 정교수(<https://orcid.org/0000-0002-8074-1137>)

· Manuscript received March 20, 2024 ; Revised March 29, 2024 ; Accepted July 15, 2024. (ID No. 20240320-027)

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

을 포함하는 능동반사계수가 개선된 광대역 비발디 안테나를 제안한다. 능동반사계수 개선을 위해 복사소자 사이에 decoupling wall 구조를 추가함으로써 복사소자 간 형성되는 parallel-plate mode를 제거하여 상호 간섭 개선 및 능동 반사계수 특성을 개선시켰다.

II. 단일 안테나 설계

그림 1은 제안된 비발디 안테나 형상을 나타낸다. 상대 유전율 $\epsilon_r=3.0$, 손실탄젠트 $\tan\delta=0.0028$, 두께 1.14 mm인 Taconic社 TLC-30 기판에 설계되었으며, 전체 기판 크기는 14.70 mm×42.82 mm이다. 기판의 전면과 후면에 각각 인쇄된 안티포달(Antipodal) 형태로 구현되어 있으며 비발디 안테나의 flare 영역은 변화를 $P_1(z_1, y_1)$ 및 $P_2(z_2, y_2)$ 에서 곡률 R 에 의해 형성되며(표 1), 이를 구현하기 위해 식 (1) 및 식 (2)의 지수함수를 활용하였다. 광대역에서 임피던스 매칭 특성을 향상시키기 위하여 급전부에 테이퍼드 형태의 transition을 채택하였으며, 50-Ω 동축선로와의 연결을 위해 마이크로스트립 선로의 폭 w_f 를 3 mm로 구현하였다. 지수함수 형태의 flare를 갖는 일반적인 비발디 안테나에 corrugation 형태의 슬롯 구조를 추가함으로써 슬롯에서의 추가적인 공진 및 전류 경로를 늘어나게 함으로써 광대역 특성을 구현하였다^[1]. 각 슬롯 구조의 크기는 식 (3)의 수식을 기반으로 설계 진행하였다.

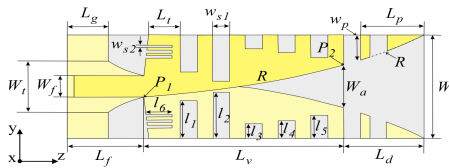


그림 1. 제안된 단일 비발디 안테나 구조
Fig. 1. Geometry of the proposed Vivaldi antenna.

표 1. 단일 복사 소자 설계 파라미터(단위: mm)
Table 1. Design parameters of a radiating element (unit: mm).

W	14.7	w_{s2}	0.4	L_v	24.2	l_3	2
W_a	6	w_p	3.6	L_d	9.8	l_4	2.5
w_t	8.2	L_g	5	L_p	7.7	l_5	3.2
w_f	3	L_f	8.8	l_1	5.3	l_6	3.2
w_{s1}	2	L_t	3.8	l_2	6.6	R	$3e^{-4}$

$$y = c_1 e^{Rt} + c_2 \quad (1)$$

$$c_1 = \frac{y_2 - y_1}{e^{Rz_2} - e^{Rz_1}}, c_2 = \frac{y_1 e^{Rz_2} - y_2 e^{Rz_1}}{e^{Rz_2} - e^{Rz_1}} \quad (2)$$

$$l_s = \frac{\left(\frac{\lambda_r}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) \left(\sqrt{\frac{1 + \epsilon_r}{2}} \right)}{4} \quad (3)$$

그림 2는 제안된 비발디 안테나 설계과정에 따른 반사계수 및 안테나 이득 특성으로 일반적인 형태의 안티포달 비발디에 슬롯 구조가 추가되었을 시 대역 전반에 걸쳐 임피던스 매칭 특성이 향상되었음을 확인할 수 있다.

비발디 안테나의 크기 변화 없이 저주파수 영역에서의 임피던스 매칭 및 안테나 이득 특성을 향상시키기 위해 sliced notch^[2] 형태의 유전체 렌즈를 추가하였다. 유전체 렌즈는 비발디 안테나의 끝단에서 넓게 분포되어 공간으로 방사되는 전계를 표면과 형태로 변형시켜줌으로써 전계를 boresight 방향으로 집중시켜 안테나의 이득을 증가시키게 된다. 이를 기반으로 대역 전반에 걸쳐 안테나 이득이 향상됨을 확인할 수 있다. 안테나 설계의 경우, CST Microwave Studio suite Tool을 활용하여 진행하였다.

III. 배열안테나 설계 및 측정

그림 3은 제안된 5×5 비발디 배열안테나 형상으로 복사 소자 간격 dx 와 dy 는 13 mm, 13.2 mm로 선정하였다.

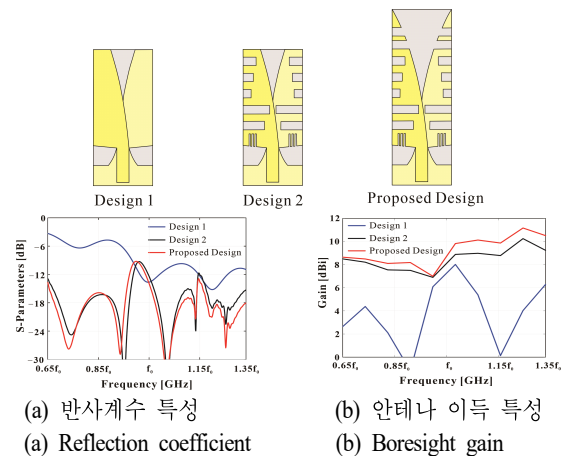


그림 2. 단일 비발디 안테나 시뮬레이션 결과
Fig. 2. Simulation result of single Vivaldi antenna.

비발디 안테나와 같은 평판형 타입의 안테나를 배열할 경우, 인근 복사소자 사이의 **parallel-plate mode**가 형성되어 방사가 제대로 이루어지지 않고 상호 간섭으로 나타나게 된다. 이를 개선하고자 각 복사소자 사이에 **decoupling wall** 구조를 추가하였다. **Parallel-plate mode**의 경우, 소자 간 간격에 의해 결정되기에 **decoupling wall** 구조의 폭 w_D 에 의해 주파수 대역이 결정되어진다. 또한 **decoupling wall** 구조가 소자와 결합되기에 길이 l_D 의 경우 **transition** 영역과 전반적인 임피던스 매칭 특성에 영향을 주게 된다. 따라서 각 슬롯의 길이 l_s , 크기 w_s , **transition** 영역의 w_t 및 **decoupling wall** 구조의 폭 w_D , 길이 l_D 변수를 빔 조향 경우를 포함하여 **GLPSO**(genetic-learning particle swarm optimization)^[3] 기법을 활용하여 최적화를 진행하였다. 비용함수의 경우, 능동 반사계수가 대역 전반에 걸쳐 -6 dB 이하 특성을 만족하도록 하였으며, 해당 최적화 기법의 경우 **GA**에 의해 생성된 **learning materials**로 인해 **PSO**의 입자 탐색이 다양화되어 넓은 대역폭을 갖는 안테나이기에 국소 해에 국한될 수 있는 상황을 회피할 수 있게 된다. 설계된 비발디 안테나 구조를 통하여 **decoupling wall** 구조 유/무에 따른 전계분포 시뮬레이션 결과를 그림 4에 도시하였으며, **decoupling wall** 구조로 인해 복사소자 간 형성되는 **parallel-plate mode**가 제거됨에 따라 복사소자 간 상호간섭을 저감시킬 수 있게 된다. **Decoupling wall**의 경우, l_D 는 5 mm, w_D 는 4.4 mm로 설계되었다. 그림 5는 **decoupling wall** 구조 유/무에 따른 능동반사계수 결과로 능동반사계수의 경우, 식 (4)를 활용하여 중심소자(13번)에 대해 계산하였다. 이때 x_n 과 y_n 은 복사소자의 위치, θ_0 와 ϕ_0 는 빔 조향 각도, $S_{13,n}$ 은 타 복사소자로부터 중심소자로의 상호 결합계수를 의미한다.

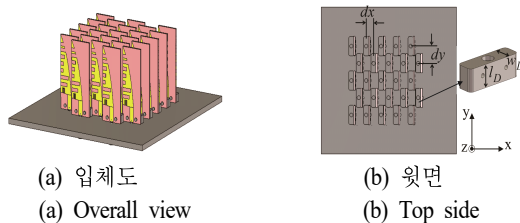


그림 3. 제안된 5×5 비발디 배열 안테나 구조
Fig. 3. Geometry of the proposed Vivaldi antenna.

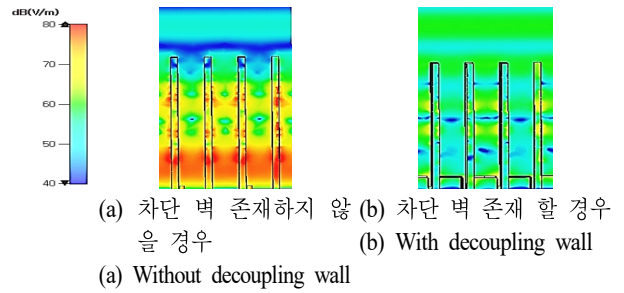


그림 4. Decoupling wall 유/무에 따른 전계분포 시뮬레이션
Fig. 4. Electric field distribution (with/without decoupling wall).

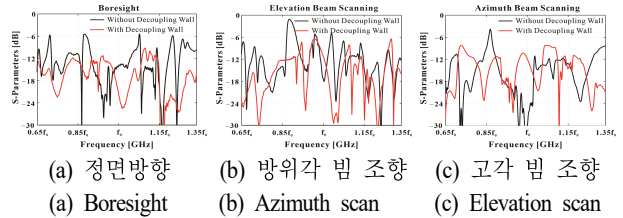


그림 5. Decoupling wall 유/무에 따른 능동반사계수 결과
Fig. 5. Active S-parameter (with/without decoupling wall).

$$\Gamma_{13} = \sum_{n=1}^{25} S_{13,n} \cdot e^{-jk(x_n \sin \theta_0 \cos \phi_0 + y_n \sin \theta_0 \sin \phi_0)} \quad (4)$$

제안된 비발디 배열 안테나의 경우, 정면방향 빔 형성 시 및 방위각, 고각 조향 시 능동반사계수 특성 모두 -6 dB 이하 특성을 만족하며, **decoupling wall** 구조 존재 시 전반적으로 능동반사계수가 개선됨을 확인할 수 있다.

그림 6은 제작된 5×5 비발디 배열안테나 형상 및 원거리 방사패턴 측정 환경을 보인다. 능동 반사계수의 경우, **VNA**(vector network analyzer)를 통하여 중심소자로부터 각 소자로의 S_{21} 산란계수를 측정하여 식 (4)를 통해

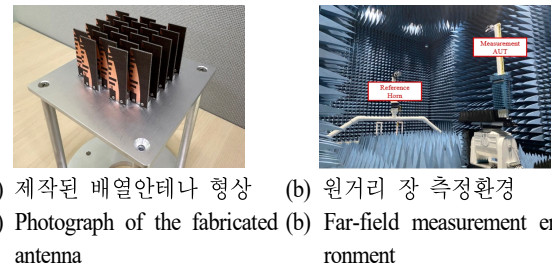


그림 6. 제작된 5×5 비발디 배열 안테나 구조 및 방사패턴 측정 환경
Fig. 6. Fabricated 5×5 Vivaldi array antenna structure and environment of radiation pattern measurement.

능동반사계수를 계산하였다.

그림 7은 제작된 5×5 비발디 배열 안테나 능동반사계수 측정 결과로 전반적으로 -6 dB 이하 능동반사계수 특성을 만족함을 확인하였으며, 시뮬레이션과 유사한 결과를 보인다. 배열 안테나의 경우, 다수의 급전부를 갖기에 모든 소자를 동시 급전하여 방사패턴을 측정하는데 다소 어려움이 존재한다. 따라서 중심소자 이외 다른 소자는 모두 50-Ω Termination시킨 후 중심소자를 급전하여 얻는 능동방사패턴을 많이 활용하게 되며, 이는 각 소자의 상호간섭이 모두 고려된 방사패턴으로 해당 방사패턴에 array factor를 곱함으로써 동시 급전 시 방사패턴을 대체할 수 있게 된다. 그림 8 및 그림 9는 능동 방사패턴 측정 결과로 각 주파수에 따른 방위각, 고각 평면 방사패턴을 도시하였다. 시뮬레이션 결과와 비교 시 전반적으로 유사한 경향성을 보인다. 그림 10 및 그림 11에 빔 조향 시 방사패턴을 도시하였으며, 각 방위각±30° 및 고각±15° 빔 조향 시 grating lobe가 발생하지 않으며, 빔 조향 특성을

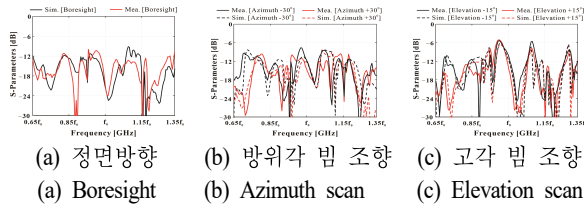


그림 7. 능동반사계수 측정 결과
Fig. 7. Measured active S-parameter.

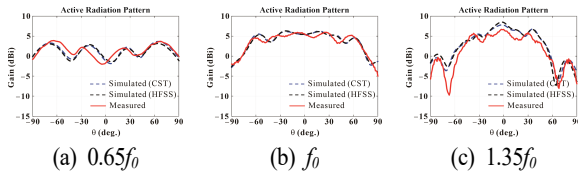


그림 8. 방위각 평면 능동 방사패턴 측정 결과(φ=0°)
Fig. 8. Measured azimuth plane radiation pattern (φ=0°).

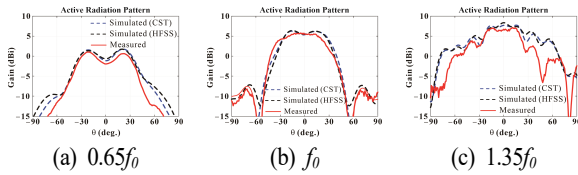


그림 9. 고각 평면 능동 방사패턴 측정 결과(φ=90°)
Fig. 9. Measured elevation plane radiation pattern (φ=90°).

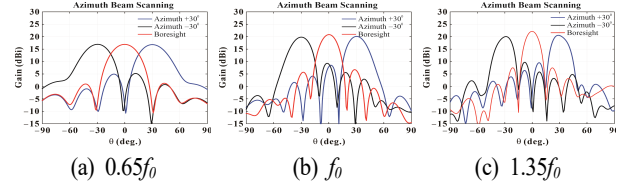


그림 10. 방위각 ±30° 빔 조향 시 방사 패턴(φ=0°)
Fig. 10. Azimuth beam scanning radiation pattern (φ=0°).

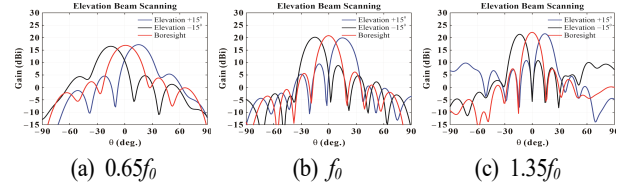


그림 11. 고각 ±15° 빔 조향 시 방사 패턴(φ=90°)
Fig. 11. Elevation beam scanning radiation pattern (φ=90°).

만족함을 확인하였으며, 이득의 경우 0.65f₀에서 약 16.9 dBi, 1.35f₀대역에서 약 22.2 dBi 이상을 만족한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 X-대역 및 Ku-대역에서 동작하는 광대역 비발디 배열 안테나를 제안한다. Decoupling wall 구조를 통해 인접 소자 간 발생하는 parallel-plate mode를 억제함으로써 능동 반사계수 특성을 개선하였으며, 빔 조향 시 grating lobe가 발생하지 않음을 확인하였다. 따라서 제안된 비발디 배열 안테나의 경우, 능동위상배열레이다용 광대역 안테나로 활용 가능할 것으로 사료된다.

References

- [1] Z. Changfei, F. Jiahui, K. Weidong, S. Quan, and G. Yan, "A miniaturized wideband Vivaldi antenna and phased array," in *Proceedings of 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, Harbin, Jul. 2014, pp. 569-572.
- [2] J. T. Logan, R. W. Kindt, and M. N. Vouvakis, "A 1.2 ~12 GHz sliced notch antenna array," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 4, pp. 1818-1826, Feb. 2018.
- [3] Y. J. Gong, J. J. Li, Y. Zhou, Y. Li, H. S. H. Chung, and Y. H. Shi, et al., "Genetic learning particle swarm optimization," *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 46, no. 10, pp. 2277-2290, Oct. 2016.