

E/H-평면의 방사 패턴 대칭성이 개선된 이중슬롯 비발디 안테나의 설계

Design of Dual-Slot Vivaldi Antenna with Improved Symmetry of Radiation Patterns in E/H-Plane

김우중 · 소영민* · 박성진 · 윤영중

Woojoong Kim · Youngmin So* · Sung Jin Park · Young Joong Yoon

요 약

종래의 이중슬롯 비발디 안테나는 이중슬롯 구조를 통하여 E-평면으로 전기장이 집중되어 E-평면의 빔 폭이 감소한다. 따라서 E-평면과 H-평면의 방사 패턴 비대칭성이 발생한다. 본 논문에서는 이중슬롯 비발디 안테나의 E/H-평면에 대한 방사 패턴 대칭성을 향상하기 위해 확장된 유전체 구조를 가지는 이중슬롯 비발디 안테나를 제안한다. 제안된 안테나는 확장된 유전체와 공기 사이의 경계면에서 전기장이 굴절되는 현상을 이용하여, H-평면상의 전기장을 안테나의 축 방향으로 집중시켜 빔 폭을 줄였다. 이를 통해서 E/H-평면에 대한 방사 패턴 대칭성을 개선하였다. 확장된 유전체의 유무에 따른 H-평면의 빔 폭 감소 효과를 비교한 결과, 확장된 유전체 구조는 주파수에 따라 최대 25도의 빔 폭 감소 효과를 가진다.

Abstract

In the conventional dual-slot Vivaldi antenna, the beam is concentrated in the E-plane by the dual-slot structure, thereby reducing the beam width of the E-plane. Therefore, radiation pattern asymmetry of the E-plane and H-plane occurs. In this work, a double-slot Vivaldi antenna with an extended dielectric structure is proposed to improve the radiation pattern symmetry of the double-slot Vivaldi antenna in the E/H-plane. The proposed antenna reduces the beam width by focusing the E-field on the H-plane in the axial direction of the antenna, using the phenomenon of the refraction of the electric field at the interface between the extended dielectric and air, so that the radiation pattern exhibits symmetry. The effects of reducing the beam width in the H-plane when the extended dielectric is present or absent were compared. It was found that the extended dielectric structure has a beam width reduction effect of as much as 25° according to the frequency.

Key words: Double-Slot, Double-Slot Vivaldi Antenna, Extended Dielectric, E/H Pattern Symmetry

I. 서 론

비발디 안테나는 대표적인 end-fire traveling wave 안테나로 초광대역, 로우 프로파일, 비교적 높은 지향성 그리

「이 연구는 2001학년도 연세대학교 대학 연구비의 지원으로 연구되었음.」

연세대학교 전기전자공학과(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

*해군본부(H.Q., Republic of Korea Navy)

· Manuscript received September 25, 2019 ; Revised November 29, 2019 ; Accepted May 20, 2020. (ID No. 20190925-091)

· Corresponding Author: Young Joong Yoon (e-mail: yjyoon@yonsei.ac.kr)

고 제작의 용이성 등의 장점이 있어 레이더, 마이크로파 이미징 등과 같은 시스템에 널리 사용되어 왔다^[1]. 그러나 비발디 안테나는 얇은 두께의 유전체 기판상에 제작되기 때문에, 고주파수에서 주엽이 갈라지고, 이에 따른 이득 저하가 발생하는 한계를 가진다^[2]. 따라서 비발디 안테나의 문제점을 해결하기 위해서, 개구면 상에 높은 유전율을 가지는 렌즈, 제로-계수 메타물질, 기생 패치 등을 삽입하는 방법 등으로 안테나의 방사 특성을 개선하고자 하였다^{[3]~[5]}. 그러나 높은 유전율을 가지는 렌즈는 안테나의 제작비용을 증가시키고, 제로-계수 메타물질과 기생 패치는 좁은 동작 주파수 대역을 가지는 단점이 있다. 이러한 방법들의 한계를 극복하기 위해, 이중슬롯 비발디 안테나가 제안되었다. 이중슬롯 구조는 안테나 개구면 상에 균질한 전기장 분포를 형성하기 때문에 고주파수에서 주엽이 갈라지지 않으며, 같은 크기를 가지는 종래의 비발디 안테나와 비교하여 더 높은 이득을 가지는 장점이 있다^[6]. 이중슬롯 비발디 안테나의 두 개의 슬롯으로부터 방사된 전기장은 E-평면 방향으로 집중되어 E-평면에서의 빔 폭을 감소시키는 효과를 가진다. 일반적으로 비발디 안테나는 E-평면의 빔 폭이 H-평면보다 좁으며, 이중슬롯 비발디 안테나의 경우에는 이중슬롯 구조로 인하여 E-평면의 빔 폭이 더 줄어들기 때문에 E-평면과 H-평면의 빔 대칭성이 저하된다. 이를 급전부 빔의 대칭성이 안테나의 효율에 영향을 미치는 반사판 안테나의 급전부로 적용할 때, 개구 효율이 저하되는 문제가 있다^[7].

본 논문에서는 이중슬롯 비발디 안테나의 E/H-평면에 대한 방사 패턴 대칭성을 향상하기 위해서 확장된 유전체를 가지는 이중슬롯 비발디 안테나를 제안한다. 종래의 비발디 안테나에 적용된 확장된 유전체는 원형 형태로 형상화하여 E-평면의 전기장을 집중시켜 빔폭을 줄이며 이득을 높인다^[8]. 반면, 제안된 안테나의 확장된 유전체는 H-평면의 빔폭만을 줄이는데 효과적이므로 E/H-평면 대칭성 향상에 유리한 장점을 가진다. 제안된 안테나는 모의실험과 측정을 통해 확장된 유전체가 H-평면에 대한 빔 폭을 감소시켜, E/H-평면 방사 패턴 대칭성 향상에 효과적임을 확인하였다.

II. 안테나 설계 및 분석

확장된 유전체를 가지는 이중슬롯 비발디 안테나의 형

상이 그림 1에 제시되었다. 안테나는 방사체부와 방사체의 두 개의 슬롯을 급전하기 위한 급전부로 구성되어 있다.

2-1 방사체부 설계

이중슬롯 비발디 안테나의 방사체부는 그림 1과 같이 두 개의 안티포달 비발디 안테나를 거울 대칭형으로 맞붙여 놓은 형태로 설계된다. 이때 안테나가 축 방향으로 주엽을 형성하기 위해서는 각 슬롯에 180도 위상차의 신호가 인가되어야 한다. 또한 각 슬롯으로부터 방사되는 전기장이 안테나의 축 방향에서 집중되어 최대 이득을 가지도록 inner ridge 부의 길이(L_4)가 조절되었다.

대부분의 비발디 안테나의 E-평면(그림 1의 xy 평면)은 H-평면(그림 1의 xz 평면)보다 좁은 빔 폭을 가진다. 이중슬롯이 적용된 비발디 안테나는 E-평면상에 두 개의 안테나가 배열되어 전기장이 집중되기 때문에 E-평면의 빔 폭이 더욱 좁아지게 되므로, E/H-평면에 대한 방사 패턴의 비대칭성이 증가한다. 제안된 안테나는 H-평면의 빔 폭을 감소시키기 위해 안테나 개구면 상에 유전체를 확장함으로써, E/H-평면에 대한 방사 패턴의 대칭성을 개선하였다.

$$n_0 \sin \alpha_0 = n_1 \sin \alpha_1 \quad (1)$$

확장된 유전체에 의해 안테나의 빔 폭이 감소하는 원

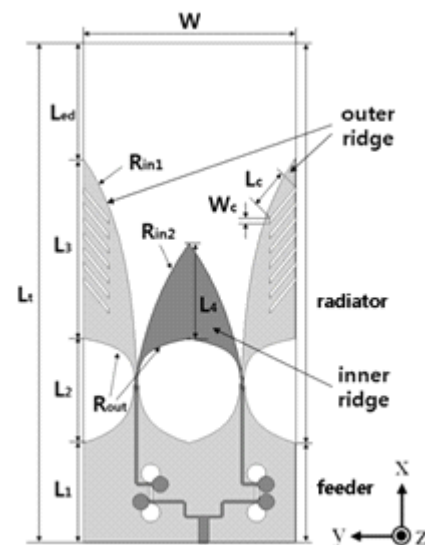


그림 1. 제안된 이중슬롯 비발디 안테나의 구조

Fig. 1. Geometry of the proposed double-slot Vivaldi antenna.

리가 그림 2에 제시되었고, 이는 식 (1)의 스넬의 법칙에 의해서 해석될 수 있다. 유전체의 굴절 계수는 공기의 굴절 계수보다 더 크기 때문에, α_0 는 α_1 보다 더 큰 각을 가진다. 따라서, 유전체의 측면과 공기의 경계면을 지나서 전기장은 안테나의 축 방향을 향해 굴절되어 집중되기 때문에 빔 폭이 감소하며, 이득이 개선된다. 이때, 확장된 유전체 측면에서 유전체와 공기로 이루어진 경계면에 도달하는 전기장의 양이 많을수록 스넬의 법칙에 따라 경계면에서 안테나의 축 방향을 향해 굴절되는 전기장의 양도 증가한다. 따라서 제안된 안테나에서 H-평면은 E-평면과 비교하여 넓은 빔 폭을 가지며, H-평면에 대한 확장된 유전체의 폭은 좁기 때문에, 유전체 측면을 통해 진행하는 전기장의 양이 비교적 많다. 반면, E-평면상에서 유전체 폭은 안테나의 개구면 폭과 같고, H-평면 대비 좁은 빔 폭을 가지기 때문에, E-평면상의 확장된 유전체 측면에 의한 전기장의 굴절은 H-평면에 비하여 미미한 효과를 가진다. 이는 확장된 유전체는 H-평면의 빔 폭을 감소시키는데 효과적임을 의미한다. 따라서, 제안된 이중슬롯 비발디 안테나는 확장된 유전체에 의해서 기존의 이중슬롯 안테나와 비교하여 E/H-평면에서 개선된 방사 패턴의 대칭성을 가진다.

비발디 안테나와 같이 광대역 안테나는 주파수에 따라 위상 중심의 위치가 변화하기 때문에, 유전체에 의한 빔 폭을 효과적으로 줄이기 위해서는 확장된 유전체에 대한 최적의 길이가 선택되어야 한다. 그림 3에는 확장된 유전체 길이에 따른 E-평면과 H-평면에 대한 빔 폭 차를 주파수별로 나타내었다. 유전체 길이가 30 mm 일 때, 전 대역에 걸쳐서 빔 폭의 대칭성이 고르게 향상됨을 확인할 수

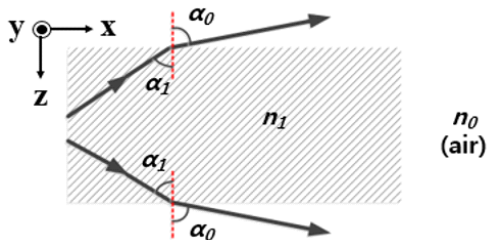


그림 2. 두 매질의 경계에서 전자기파의 전파
Fig. 2. The propagation of an electromagnetic wave at the interface of two medium.

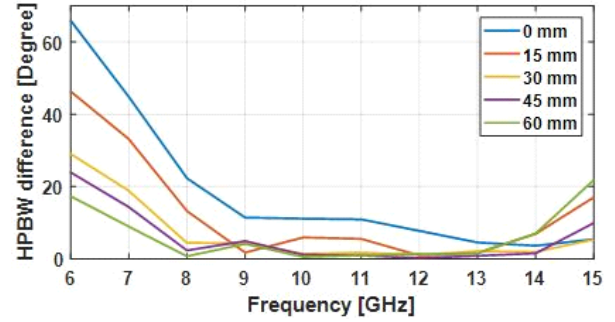


그림 3. 확장된 유전체 길이에 따른 E-평면과 H-평면의 빔 폭 차

Fig. 3. Beamwidth difference for E-plane and H-plane with extended dielectric length.

있다. 따라서 제안된 안테나는 개구면 상단에 30 mm의 유전체가 추가되었다.

제안된 안테나의 방사체부는 유전율 4.3, 손실 탄젠트 0.0035, 두께 1.02 mm의 TRF-43 기판에 설계되었으며, $42.5 \times 87 \text{ mm}^2$ 의 크기를 가진다. 기판 크기 내에서 목표하는 방사 특성을 만족하기 위하여 안테나 파라미터가 최적화되었으며, 안테나를 이루는 곡면은 최적화된 파라미터를 이용해 식 (2)의 지수 커브를 계산하여 정의된다^[9]. 지수 커브의 지수는 개구울 R에 해당하며, 두 점 $P_1(x_1, y_1)$ 와 $P_2(x_2, y_2)$ 는 지수 커브의 시작과 끝점에 해당한다.

$$\begin{aligned}
 y &= c_1 e^{Rx} + c_2 \\
 c_1 &= (y_2 - y_1) / (e^{Rx_2} - e^{Rx_1}) \\
 c_2 &= (y_1 e^{Rx_2} - y_2 e^{Rx_1}) / (e^{Rx_2} - e^{Rx_1})
 \end{aligned} \quad (2)$$

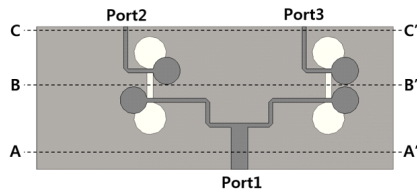
표 1에는 안테나의 방사체부의 설계 파라미터가 제시되었다.

표 1. 방사체부의 설계 파라미터
Table 1. Design parameters of radiator.

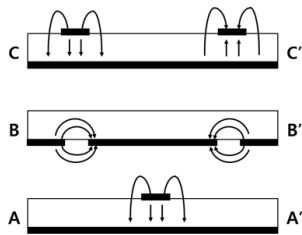
Parameters	Value (mm)	Parameters	Value (mm)
W	42.5	L_c	8
L_1	107	W_c	1
L_2	21	R_{in1}	0.5
L_3	36	R_{in2}	0.5
L_4	19	R_{out}	0.5
L_{ed}	30	R_{gnd}	0.3

2-2 급전부 설계

제안된 안테나의 방사체를 구성하는 두 개의 슬롯에는 균일한 크기와 서로 반대 위상을 가지는 신호가 각각 인가되어야 한다. 이를 위해서, 그림 4(a)와 같이 위상 반전 구조를 포함하는 T형 전력분배기가 설계되었다. 전력분배기는 180도 위상차를 가지는 두 개의 신호를 분할하기 위해서 2개의 위상천이기를 포함하며, 그중 하나는 +90도



(a) 급전부 구조
(a) Geometry of the feeder



(b) 각 파트에서의 전기장 방향
(b) Direction of the E-field on each part

그림 4. 급전부 구조와 각 파트에서의 전기장 방향

Fig. 4. Geometry of the feeder and the direction of the E-field on each part.

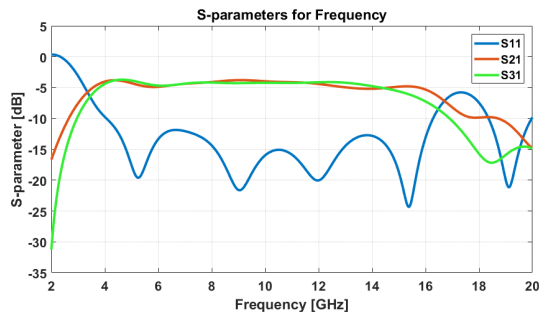


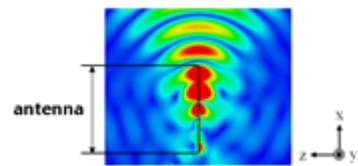
그림 5. 급전부의 시뮬레이션된 반사 계수 및 투과 계수
Fig. 5. Reflection and transmission coefficient of feeder.

를, 다른 하나는 -90° 의 위상천이를 만든다. 그림 4(a)에서 섹션 A-A'는 T형 분배기를 구성하며, 섹션 B-B'에서 C-C'까지는 이중 마이크로스트립과 슬롯 라인으로 이루어진 두 개의 위상천이 구조를 구성한다^[10]. 그림 4(b)에는 각 지점에서의 전기장 분포를 나타낸다.

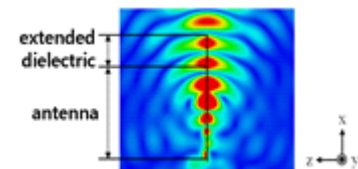
그림 5에는 설계된 급전부의 반사 계수와 투과 계수에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 급전부의 대역폭은 4~16.4 GHz이며, 14 GHz 이하에서 2 dB 이하의 삽입 손실을 가진다.

III. 결과 및 분석

그림 6은 확장된 유전체의 유무에 따른 H-평면에 대한 전기장 분포를 나타낸다. 그림 6(a)의 확장된 유전체를 포함하지 않는 이중슬롯 비발디 안테나는 개구면을 통해 방사된 전기장이 공기를 통해 전파되어 가는 반면, 그림 6(b)의 확장된 유전체를 가지는 이중슬롯 비발디 안테나는 개구면을 통해 방사된 전기장이 확장된 유전체를 따라 전파되어 진행한다. 이때, 확장된 유전체를 가지는 이중슬롯 비발디 안테나의 H-평면에 대한 전기장은 유전체와 공기의 경계면 사이의 유전율 차이에 따라 안테나의



(a) 확장된 유전체를 포함하지 않는 경우
(a) Without extended dielectric



(b) 확장된 유전체를 포함하는 경우
(b) With extended dielectric

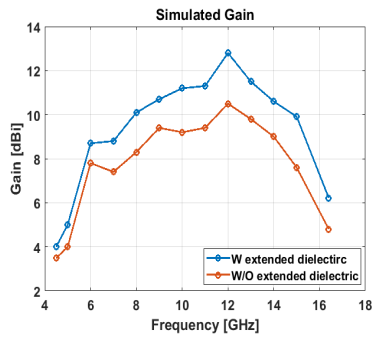
그림 6. 확장된 유전체 유무에 따른 10 GHz에서의 H-평면에 대해 시뮬레이션된 전기장 분포

Fig. 6. Simulated E-field distributions on the H-plane at 10 GHz with or without extended dielectric.

축 방향(x축 방향)을 향하여 굴절된다. 따라서 그림 6과 같이 확장된 유전체를 포함하는 경우, 전기장이 축 방향을 향해 집중되어 분포됨을 확인할 수 있다.

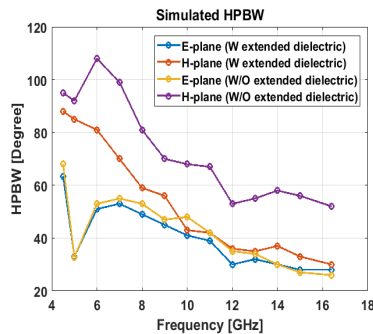
확장된 유전체 유무에 따른 안테나의 반치전력빔폭과 이득에 대한 시뮬레이션 결과가 그림 7에 제시되었다. 확장된 유전체를 가지는 이중슬롯 비발디 안테나는 확장된 유전체 구조에 의해서 개선된 E/H-평면의 대칭성과 이로 인한 향상된 이득을 가진다. 12 GHz 이상에서의 이득 저하는 Sidelobe와 Backlobe 등에 의해 나타나는 비발디 안테나의 일반적인 이득 분포이다^{[11],[12]}.

제작된 안테나의 구조는 그림 8에 제시하였으며, 그림 9에는 제작된 안테나의 측정된 반사 계수가 제시되어 있다. 안테나의 동작 주파수는 4.5~16.4 GHz 대역으로



(a) 유전체 유무에 따른 안테나 이득

(a) Gain of antenna with or without extended dielectric



(b) 유전체 유무에 따른 안테나의 반치전력폭

(b) HPBW of antenna with or without extended dielectric

그림 7. 확장된 유전체 유무에 따른 안테나의 이득과 반치전력폭

Fig. 7. Gain and HPBW of antenna with or without extended dielectric.



그림 8. 제작된 안테나 구조

Fig. 8. Fabricated structure of the proposed antenna.

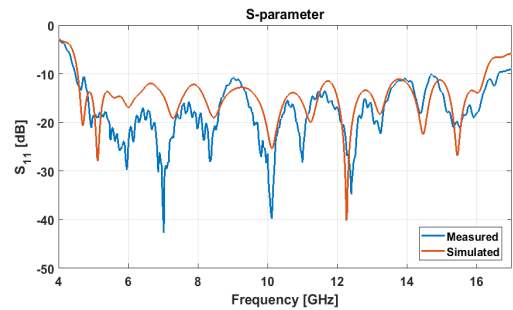


그림 9. 제작된 안테나의 측정된 반사 계수

Fig. 9. Measured reflection coefficient of fabricated antenna.

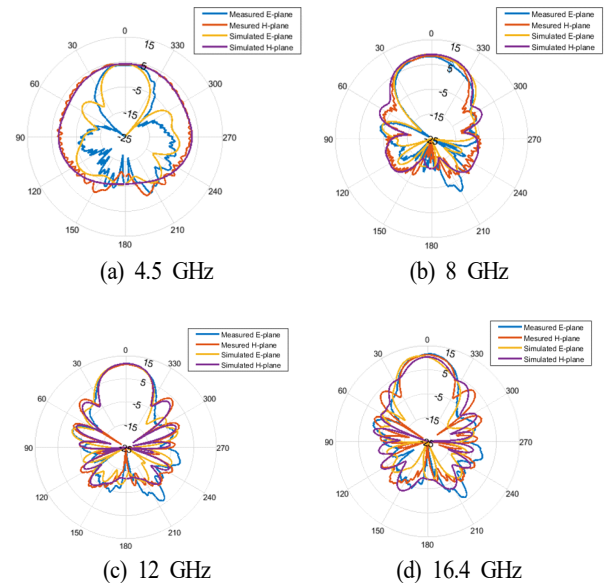


그림 10. 제작된 안테나의 측정된 방사 패턴

Fig. 10. Measured radiation pattern of fabricated antenna.

3.64:1의 대역폭을 가진다. 그림 10는 6, 9, 12 GHz에서 측정된 안테나의 방사 패턴을 보여준다.

IV. 결 론

본 논문에서는, 종래의 이중슬롯 비발디 안테나가 E/H-평면에서 방사 패턴의 비대칭성이 증가하는 문제를 해결하기 위해서, 확장된 유전체를 가지는 이중슬롯 비발디 안테나를 제안하였다. 제안된 안테나의 확장된 유전체는 H-평면상에서 유전체와 공기의 경계면에서 전기장이 굴절되는 원리를 이용하여, 안테나의 축 방향으로 전기장을 집중시킴으로써 H-평면의 빔 폭을 감소시켰다. 결과적으로 종래의 안테나와 비교하여 제안된 안테나는 동작 주파수 내에서 E-평면과 H-평면 간의 빔 폭 차가 최대 25도 감소하는 효과를 가진다.

References

- [1] H. Liu, J. Zhao, and M. Sato, "A hybrid dual-polarization GPR system for detection of linear objects," *IEEE Antennas Wireless Propagation Letter*, vol. 14, pp. 317-320, 2015.
- [2] A. S. Arezoomand, M. N. Moghadasi, I. Arghand, P. Jahangiri, and F. B. Zarrabi, "Photonic band gap implementation for phase centre controlling in Vivaldi antenna," *IET Microwave, Antennas & Propagation*, vol. 11, no. 13, pp. 1880-1886, Oct. 2017.
- [3] I. T. Nassar, T. M. Weller, "A novel method for improving antipodal Vivaldi antenna performance," *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 7, pp. 2713-3324, Jul. 2015.
- [4] J. Bourqui, M. Okoniewski, and E. C. Fear, "Balanced antipodal Vivaldi antenna with dielectric director for near-field microwave imaging," *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 7, pp. 2318-2326, Jul. 2010.
- [5] B. Zhou, T. J. Cui, "Directivity enhancement to Vivaldi antennas using compactly anisotropic zero-index meta-materials," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 326-329, 2011.
- [6] Y. Wang, G. Wang, and B. Zong, "Directivity improvement of Vivaldi antenna using double-slot structure," *IEEE Antennas Wireless Propagation Letter*, vol. 12, pp. 1380-1383, 2013.
- [7] D. C. Chang, M. C. Huang, "Multiple-polarization microstrip reflectarray antenna with high efficiency and low cross-polarization," *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 43, no. 8, pp. 829-834, Aug. 1995.
- [8] G. Teni, N. Zhang, J. Qiu, and P. Zhang, "Research on a novel miniaturized antipodal Vivaldi antenna with improved radiation," *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 417-420, 2013.
- [9] S. Wang, X. D. Chen, and C. G. Parini, "Analysis of ultra wideband antipodal vivaldi antenna design," in *2007 Loughborough Antennas and Propagation Conference*, Loughborough, 2007, pp. 129-132.
- [10] M. E. Bialkowski, Y. Wang, "UWB planar out-of-phase Wilkinson power divider utilizing UWB $\pm 90^\circ$ phase shifters in microstrip-slot technology," in *Asia-Pacific Microwave Conference 2011*, Melbourne, VIC, 2011, pp. 1138-1141.
- [11] J. Eichenberger, E. Yetisir, and N. Ghalichechian, "Antipodal UWB Vivaldi antenna with pseudoelement and notched flares for 2.5~57 GHz applications," in *2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting (APS URSI)*, Boston, MA, 2018, pp. 270-1758.
- [12] P. V. Madhav, M. S. G. Prasad, *Characterization of Printed Podal Vivaldi Antenna(8~18 GHz) on RT Duroid with Single and Double Cavity*, London, IntechOpen, 2019.

김 우 중 [삼성전자 네트워크사업부/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3980-0614>



2011년 2월: 경희대학교 전자정보학부 (공학사)
2011년 8월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
2019년 9월~현재: 삼성전자 네트워크사업부
[주 관심분야] 광대역 안테나, 배열안테나, 전파전파

박 성 진 [연세대학교/석박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0001-7018-6232>



2017년 2월: 국민대학교 전자공학과 (공학사)
2017년 3월~현재: 연세대학교 전자공학과 석·박사 통합 과정
[주 관심분야] 밀리미터파 안테나, 홀로그래픽 안테나

소 영 민 [해군본부/장교]

<https://orcid.org/0000-0003-3003-5987>



2008년 2월: 해군사관학교 전산학과 (이학사)
2017년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
2008년 3월~현재: 해군장교
[주 관심분야] 레이더, 전자전, 위성통신 시스템

윤 영 중 [연세대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-9585-9867>



1981년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
1986년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
1991년 2월: Georgia Institute of Technology (공학박사)
1992년 1993년: 한국전자통신연구원 위성통신기술연구단
1993년~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수
2011년: 한국전자과학회 학회장
[주 관심분야] 안테나 및 전파전파