

신호탐지 정확도를 높이기 위해 최적 배열형상을 고려한 16소자 배열안테나 설계

Configuration of a 16-Element Array Antenna Design to Improve Signal Detection Performances

장도영 · 류성준 · 왕진천* · 이준용** · 추호성

Doyoung Jang · Sungjun Yoo · Jinchun Wang* · Jun-Yong Lee** · Hosung Choo

요 약

본 논문에서는 간접 신호원의 방향을 정확히 탐지 및 식별하기 위해 상호결합특성을 고려한 16소자 배열안테나의 배열 형상 및 개별소자 구조에 대해 연구하였다. 제안된 배열 안테나는 상호결합특성, 능동소자패턴의 편차, 반전력범폭을 고려하여 개별소자의 접지면간 이격거리를 도출하였다. 개별소자는 마이크로스트립 패치안테나로 구성되며, 광대역 특성 및 안테나의 소형화를 위해 접지면과 연결된 방사체 및 L 모양의 간접 급전 급전부로 구성된다. 제안된 안테나를 사용한 신호탐지 성능 평가 결과 제시된 시나리오 범위 내에서 낮은 RMS(root mean square) error의 성능을 갖는 것을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we proposed a 16-element array antenna design to improve signal detection performances. The array antenna characteristics, such as mutual coupling, pattern deviation, and half power beamwidth of the active element, were examined to obtain an optimal spacing between individual elements. The single element of the array antenna consists of an indirect feed using L-shaped feed and shorted radiating patch to achieve a broadband operation. Root mean square(RMS) errors based on the incident angle of the signal were calculated to verify the signal detection performance of the proposed antenna. The results demonstrate that the proposed array antenna with optimal spacing is suitable for detecting interference signals with low RMS error.

Key words: Antennas, Array Antennas, Broadband Antennas, Direction Finding, Signal Detection

I. 서 론

2.4 GHz 대역은 블루투스, Wi-Fi, 이동통신 등 다양한 무선 응용분야에서 활용되고 있다^{[1]~[3]}. 동일 주파수 대

「This work was supported by Institute for Information & communications Technology Promotion(IITP) grant funded by the Korea government(MSIT) (No.2017-0-00984) and the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(Basic Research) (No. NRF-2017R1D1A1B04031890).」

홍익대학교 전자전기공학과(School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

*한국전자통신연구원 부설연구소(Electronics and Telecommunications Research Institute)

**홍익대학교 컴퓨터공학과(School of Computer Engineering, Hongik University)

· Manuscript received April 11, 2019 ; Revised June 7, 2019 ; Accepted June 21, 2019. (ID No. 20190411-038)

· Corresponding Author: Jun-Yong Lee (e-mail: jlee@hongik.ac.kr)

역을 갖는 다수의 응용분야가 제한된 공간의 시스템 및 실내 공간에서 사용될 경우 신호간섭으로 인한 성능 저하가 발생할 수 있으며, 특히 최근에는 무선시스템을 무력화시키기 위한 불특정 신호에 의해 신호간섭 문제가 증가하고 있는 추세이다⁴⁾. 무선시스템이 허용치 이상의 신호간섭을 받을 경우, 시스템의 성능 열화 및 오작동이 발생하기 때문에 신호간섭을 일으키는 불특정 신호를 사전에 추적하고 제거하기 위한 기술이 중요하다. 간섭신호의 방향을 추정하기 위한 기술로 다소자의 배열안테나와 위상천이기를 결합한 빔조향 기술이 널리 사용되고 있지만, 플랫폼이 소형화되며 배열안테나의 개별소자 간 이격거리가 좁아질 경우, 상호 결합특성에 의한 이득 특성 저하 및 방사패턴 왜곡 등의 문제가 발생한다^{5)~7)}. 일반적으로 격리도 특성을 향상시키기 위해 개별소자의 이격거리를 증가시키는 방법을 사용하지만, 소자 간 이격거리가 특정 거리 이상으로 증가 될 경우, 배열안테나의 grating lobe가 발생하여 방향탐지 성능의 오차가 크게 발생하는 문제가 있다. 따라서 배열안테나의 방향탐지 성능을 향상시키기 상호결합특성과 grating lobe 특성을 동시에 고려하여 개별소자 간 최적 거리를 도출하는 것이 중요하다. 배열안테나의 방향탐지 성능을 높이기 위해 배열형상 최적화 연구^{8),9)}, 개별소자의 물리적인 크기를 최소화하기 위한 연구^{10),11)}, 부배열을 사용하여 급전부를 최적화시킨 연구가 제안되었으나^{12),13)} 배열안테나의 상호결합 및 패턴왜곡 특성이 배열안테나의 방향탐지 성능에 미치는 영향을 분석하기에 어려움이 있다.

본 논문에서는 간섭 신호원의 방향을 정확히 탐지 및 식별하기 위해 상호결합 및 패턴 왜곡 특성을 고려한 16 소자 배열안테나 설계를 제안한다. 제안된 배열안테나는 개별소자 간 이격거리에 따른 상호결합특성 및 능동소자 패턴의 편차(pattern deviation), 반전력빔폭(half power beam width) 등을 고려하여 최적 방향탐지 성능을 갖도록 배열안테나의 개별소자 접지면간의 이격거리를 도출하였다. 개별소자는 마이크로스트립 패치안테나로 구성되며, 광대역 특성 및 안테나의 소형화를 위해 접지면과 연결된 방사체, L 모양의 간접 급전 급전부로 이루어져있다. 반사계수, 상호결합특성, 능동소자패턴, 2-D 방사패턴과 같은 안테나 성능을 정확하게 측정하기 위해 전파무반사실

에서 측정하였으며, 추가적으로 제안된 배열안테나의 신호탐지 성능을 평가하기 위해 배열안테나의 빔조향 특성을 확인하였다. 제안된 방향탐지 시나리오에서 배열안테나가 낮은 RMS (root mean square) error를 갖는 것을 확인하였다.

II. 배열안테나의 빔조향 성능

그림 1은 제안된 배열안테나의 배열형상 및 개별소자의 구조를 보여준다. 제안된 배열안테나는 한 변의 길이가 p_r 인 아크릴판 위에 16개의 소자가 사각 평면 배열구조로 이루어져 있으며, 주파수를 특정할 수 없는 불특정 신호원을 탐지하기 위해서 2.4 GHz를 포함하여 넓은 대역의 신호를 탐지할 수 있도록 개별소자 간 간격을 d 로 설계하였다. 개별소자의 접지면은 한 변의 길이가 g_r 인 사각 형태이며, 접지면 사이는 패턴왜곡 및 상호결합특성의 개선을 위해 g 의 이격거리를 갖는다. 배열안테나의 개별소자는 패치안테나로 이루어져 있으며, 방사체의 폭과

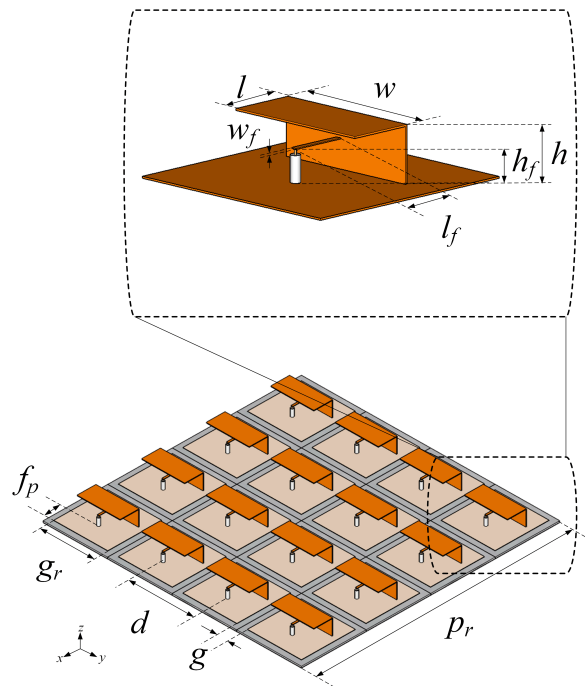


그림 1. 제안된 4x4 사각 배열 패치안테나 형상
Fig. 1. Geometry of the proposed patch antenna with 4x4 planar array.

길이가 각각 w 와 l 로 구성된다. 방사체는 접지면으로부터 동일한 중심점을 갖고 h 만큼 이격되어 있으며, 방사체와 접지면은 단락된 구조를 가져 l 이 약 0.5배 소형화가 되도록 하였다. 급전부는 접지면 외곽에서부터 x 축으로 f_p 만큼 떨어진 위치에 존재하며, 접지면과 SMA 동축케이블로 연결되어 있다. 광대역 특성을 도출하기 위해 급전부는 접지면과 h_f 만큼 이격된 간접 급전구조 형상을 가지며, 급전부의 너비는 w_f , 길이는 l_f 로 설계되었다. 급전부와 방사체 사이는 유전손실이 없는 공기층 (air gap)으로 이루어져 있으며, 제안된 안테나의 최적 변수값을 도출하기 위해 FEKO EM 시뮬레이터^[14]와 유전자 알고리즘^[15]을 연동하여 최적화했다. 제안된 배열안테나의 설계 변수는 표 1에 정리하였다. 그림 2는 제안된 배열안테나에 사용된 개별 소자의 반사계수 특성을 나타내는 그래프이다. 안테나의 측정은 전파 무반사실에서 진행되었으며, 그래프에서 실선은 측정결과를 나타내고, 점선은 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 반사계수 측정 결과, 1.79 GHz부터 2.89 GHz까지 -10 dB 이하의 반사계수를 갖고 fractional bandwidth는 68 %로 나타났다. 그림 3은 배열안테나의 상호결합특성, 능동소자의 패턴편차, 반전력빔폭을 고려하여 접지면간의 이격거리 (g)를 도출한 결과를 보여준다. 그림 3(a)의 실선은 6번 소자와 7, 10, 11번 소자간의 격리도 값을 도출하여 평균낸 것을 나타내며 개별소자 접지면간의 이격

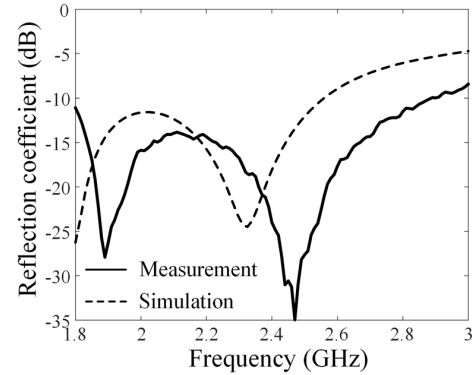


그림 2. 제안된 개별소자의 반사계수 특성
Fig. 2. Reflection coefficient characteristic of the proposed element.

거리를 0 mm부터 9 mm까지 1 mm 간격으로 조절하여 격리도를 살펴보았다. $g=0$ mm 일 경우, 모든 개별소자는 통합된 접지면을 갖는 것을 의미하며, 이 때 17.1 dB의 격리도 특성이 나타난다. 이격거리가 1 mm일 때 1.7 dB의 격리도 특성이 개선되며, 2 mm 이상으로 이격거리가 증가함에 따라 격리도 값이 크게 변하지 않는 것을 확인할 수 있다.

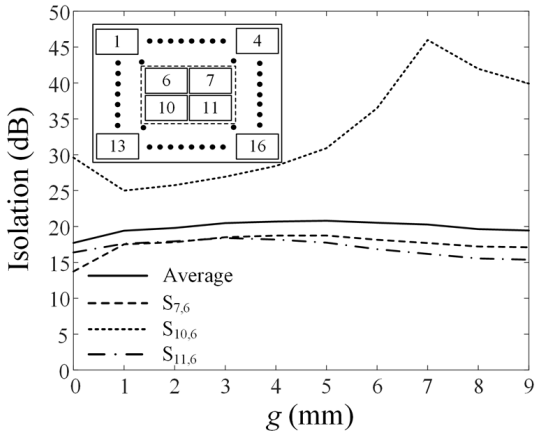
그림 3(b)는 6, 7, 10, 11에 위치한 4개 소자에 대한 능동소자패턴의 편차 및 반전력빔폭의 평균값을 나타내며, 능동소자패턴의 편차는 식 (1)으로 정의된다.

$$\text{Pattern deviation} = \frac{G_{\max}}{G_{\min}}$$

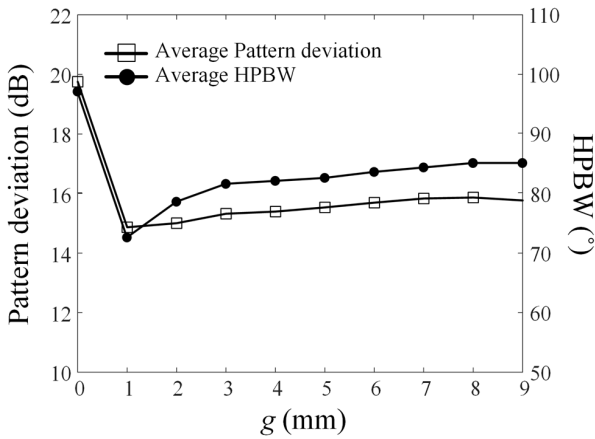
패치면의 전면 방향(+x 축)을 기준으로 $\theta = -90 \sim 90^\circ$, $\phi = -90 \sim 90^\circ$ 범위에서 나타나는 이득의 최대값을 G_{\max} 로, 최소값을 G_{\min} 으로 나타내며, 이 둘의 비율을 패턴의 편차로 정의하였다. 패턴편차는 $g=0$ mm일 때, 19.7 dB의 값을 갖고, g 가 1 mm 이상일 때 패턴 편차는 14.8 dB 이상의 값을 갖는다. 반전력빔폭은 $g=1$ mm일 때 72.5° 로 최소값이 나타나고, g 가 증가함에 따라 값이 상승하는 경향을 보여 $g=9$ mm일 때 85° 의 값을 갖는다. 제안된 안테나의 합성패턴은 소자 간 격리도 특성, 능동소자 패턴편차, 반전력빔폭 등에 의해 결정되며, 능동소자 패턴 편차가 작고 반전력빔폭이 클수록 방사패턴이 넓은 범위에서 균일하게 유지됨을 알 수 있다. 소자 간 이격거리가 0 mm 일 때, 반전력빔폭은 97° 로 최대값을 갖지만 패턴편차 역

표 1. 제안된 안테나에 사용된 설계 변수
Table 1. Parameters for proposed antenna.

Parameters	Dimension (mm)
d	65
g	9
w	52.1
l	21.9
h	13
w_f	3.3
l_f	21
h_f	8.7
f_p	16.5
p_r	340
g_r	56



(a) 격리도 특성
(a) Isolation characteristic



(b) 패턴편차 및 HPBW
(b) Pattern deviation and HPBW

그림 3. g 에 따른 상호결합 및 패턴 왜곡 특성(2.4 GHz)
Fig. 3. Mutual coupling and pattern distortion characteristic according to g .

시 높게 나타난다. 하지만 소자 간 이격거리가 9 mm일 때, 능동소자의 패턴편차가 작아지면서도 높은 반전력 빔폭을 가져, 능동 소자 패턴의 왜곡이 최소화 된 방사패턴이므로 방향탐지 성능이 우수하게 도출될 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 4는 급전네트워크를 포함하여 제작한 배열안테나의 모습을 나타낸다. 급전 네트워크는 입력 신호가 하나의 4x1 전력 분배기를 사용하여 나뉘지고, 나뉜 신호는 위상 조절이 가능하도록 서로 다른 길이를 갖는 마이크

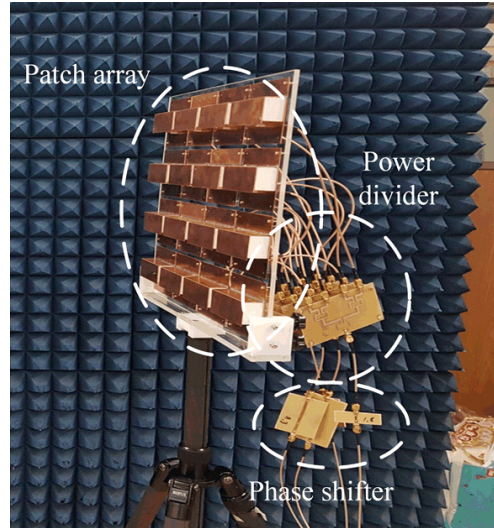
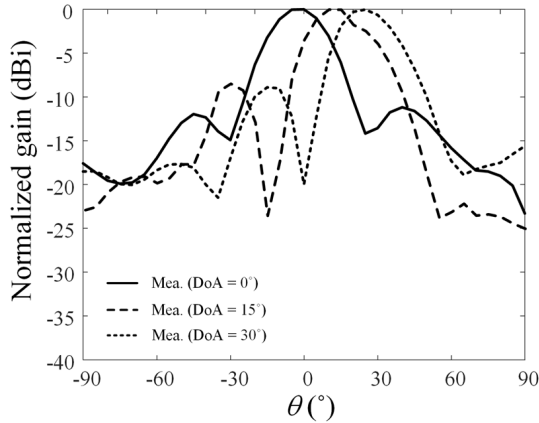


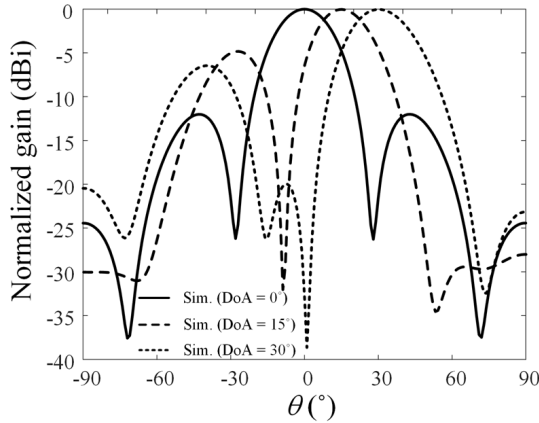
그림 4. 제작된 배열안테나 사진.
Fig. 4. Photographs of the fabricated array antenna.

로스트립 선로로 연결된다. 마이크로스트립 선로로부터 나온 출력들은 각각 서로 다른 4x1 전력분배기로 연결되고 안테나 단으로 연결 돼, 최종적으로 4x4 배열안테나의 각 열이 하나의 부배열로 구성되는 형태로서 빔 조향이 가능하도록 한다. 신호탐지 안테나 측면에서 안테나가 낮은 SLL을 유지하며, 원하는 방향으로 빔조향이 가능하다면 안테나의 reciprocity 특성에 의해 신호탐지 성능도 높을 것으로 예상할 수 있다. 그림 5는 제안된 안테나를 사용한 빔조향 특성을 측정과 시뮬레이션으로 확인한 결과를 보여준다. 급전네트워크의 위상값을 조절하여 빔을 조향하고 $\phi=90^\circ$, $\theta=-90^\circ\sim 90^\circ$ 까지 5° 간격의 측정 범위로 빔조향 성능을 측정했다. 제안된 배열 안테나는 급전 네트워크에 의한 손실을 모두 포함하여 0° 조향 시 전면 방향 이득이 8.67 dB로 나타나며, 빔조향 패턴은 시뮬레이션 결과와 유사한 경향성을 보인다. 제안된 배열안테나를 이용하여 15° , 30° 빔조향이 가능함을 확인하였으며, 시뮬레이션으로 예측한 값과 유사하게 나타난다.

그림 6은 제안된 안테나의 신호탐지 성능특성을 시뮬레이션을 통해 도출한 결과를 나타낸다. 신호의 입사 방향은 두 가지 상황으로 가정하였으며, RMS error 및 Side lobe level(SLL)을 통해 신호탐지 성능을 평가하였다. 신호탐지를 위해 signal-subspace MUSIC 알고리즘^[16]을 사용하였으



(a) 측정 결과
(a) Measurement result



(b) 시뮬레이션 결과
(b) Simulation result

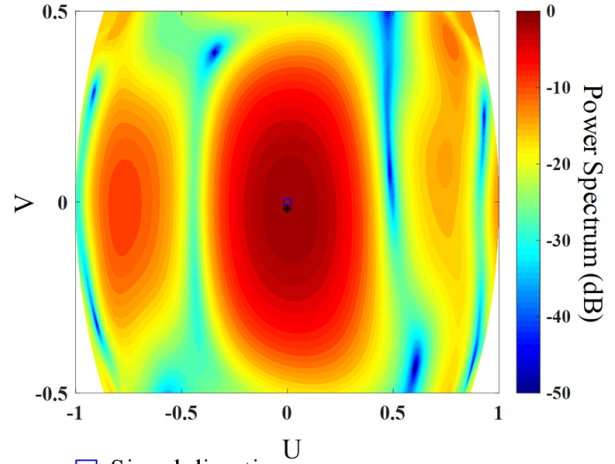
그림 5. 배열 안테나의 빔조향 특성(2.4 GHz, $\phi=90^\circ$).
Fig. 5. Beam steering characteristic of the proposed antenna.

며, 신호탐지 시나리오를 100회 반복하여 얻은 RMS error와 SLL은 식 (2) 및 식 (3)과 같이 정의된다.

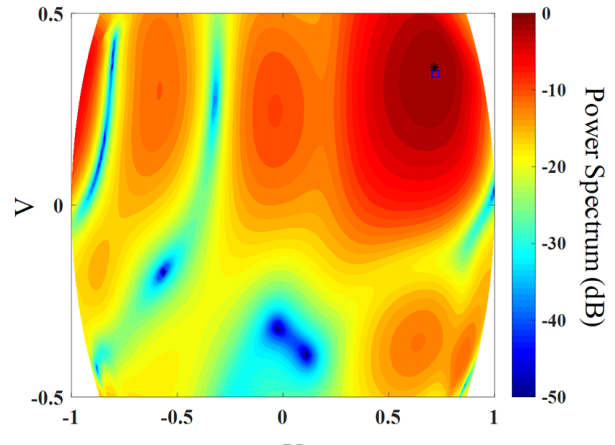
$$RMS\ error = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{[\theta_{est.}(n) - \theta_{real}]^2 + [\phi_{est.}(n) - \phi_{real}]^2}{2}} \quad (2)$$

$$SLL = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{P_{main}(n)}{P_{side}(n)} \quad (3)$$

ϕ_{real} 과 θ_{real} 은 실제 신호의 입사방향이며, $\phi_{est.}$ 과 $\theta_{est.}$ 은 예측된 신호 입사방향으로서 이를 N 번 수행하여 도출된



□ Signal direction
* Estimation direction
(a) 전면방향 추정
(a) Bore-sight direction estimation
($U=0, V=0(\phi=0^\circ, \theta=0^\circ)$)



□ Signal direction
* Estimation direction
(b) 측면방향 추정
(b) Side direction estimation
($U=0.72, V=0.26(\phi=50^\circ, \theta=20^\circ)$)

그림 6. 배열안테나의 DoA 추정 성능(2.4 GHz)
Fig. 6. DoA estimation performance of the proposed antenna.

값의 평균으로 RMS error가 정의된다. 또한 SLL은 주엽의 최대 레벨인 P_{main} 과 부엽의 최대레벨인 P_{side} 의 비로서 N 번 수행하여 도출된 평균값으로 정의된다. 그림 6(a)는 신호가 정면 방향으로 입사하는 경우에 대한 결과며 ($U=$

0, $V=0(\phi=0^\circ, \theta=0^\circ)$), 그림 6(b)는 신호가 측면 방향으로 입사하는 경우에 대한 결과다 ($U=0.72, V=0.26(\phi=50^\circ, \theta=20^\circ)$). 신호의 탐지 범위는 $\theta=-60\sim60^\circ, \phi=-90\sim90^\circ$ ($U=\pm 0.1, V=\pm 0.5$)이며, 신호가 정면으로 입사되는 경우 RMS error=1.1°, SLL=9.6 dB 로 신호가 탐지된다. 측면에서 입사되는 경우 RMS error=1.4°, SLL=3.1 dB로 제시된 시나리오에서 1.2° 미만의 RMS error로 신호를 탐지가 가능한 것으로 확인되었다.

III. 결 론

본 논문에서는 간접 신호원의 방향을 정확히 탐지 및 식별하기 위해 상호결합특성을 고려한 16소자 배열안테나의 배열 형상 및 개별소자 구조를 제안하였다. 제안된 배열 안테나에 사용한 개별소자는 접지면간 이격거리에 따른 상호결합특성, 능동소자패턴의 편차, 반전력빔폭을 고려하여 9 mm의 이격거리를 갖도록 설계되었다. 배열안테나의 평균 격리도 특성은 19.4 dB로 나타나며, 능동소자패턴의 반전력빔폭은 85°, 패턴 편차는 15.7 dB로 확인되었다. 개별소자는 마이크로스트립 패치안테나로 구성되며, 광대역 특성 및 안테나의 소형화를 위해 접지면과 연결된 방사체, L 모양의 간접 급전 급전부로 구성된다. 제안된 안테나를 사용하여 신호탐지 성능을 평가한 결과 제시된 시나리오에서 1.2° 미만의 RMS error 및 3.1 dB 이상의 SLL으로 신호를 탐지가 가능한 것으로 확인되었다.

References

[1] Q. Liang, B. Sun, and G. Zhou, "Multiple beam parasitic array radiator antenna for 2.4 GHz WLAN applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 12, pp. 2513-2516, Dec. 2018.

[2] H. A. Damis, N. Khalid, R. Mirzavand, H. Chung, and P. Mousavi, "Investigation of epidermal loop antennas for biotelemetry IoT applications," *IEEE Access*, vol. 16, pp. 15806-15815, 2018.

[3] Y. W. Chi, K. L. Wong, "Internal compact dual-band printed loop antenna for mobile phone application," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 5, pp.

1457-1462, 2007.

[4] T. Wang, T. Liang, J. Fan, and X. Wei, "Sequential opening multi-jammers localisation in multi-hop wireless network," *IET Information Security*, vol. 12, no. 5, pp. 445-454, Sep. 2018.

[5] C. Zhu, W. Wang, H. Chen, and H. C. So, "Impaired sensor diagnosis, beamforming, and DOA estimation with difference co-array processing," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 7, pp. 3773-3780, Jul. 2015.

[6] C. Liu, P. P. Vaidyanathan, "Super nested arrays: Linear sparse arrays with reduced mutual coupling: Part II: High-order extensions," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 64, no. 16, pp. 4203-4217, Aug. 2016.

[7] J. Yun, D. Park, D. Jang, and K. C. Hwang, "Isolation improvement in vivaldi antennas using DSRR," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 10, pp. 739-744, Oct. 2018.

[8] Q. Liu, M. X. Zhu, Y. B. Wang, J. B. Deng, Y. Li, and G. J. Zheng, et al., "UHF antenna array arrangement optimization for partial discharge direction finding in air-insulated substation based on phased array theory," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 6, pp. 3657-3688, Dec. 2017.

[9] M. Guo, Y. D. Zhang, and T. Chen, "DOA estimation using compressed sparse array," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 66, no. 15, pp. 4133-4146, Aug. 2018.

[10] M. G. Pralon, G. D. Galdo, M. Landmann, M. A. Hein, and R. S. Thoma, "Suitability of compact antenna arrays for direction-of-arrival estimation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 7244-7256, Dec. 2017.

[11] J. Kim, H. Ryu, Y. J. Park, and B. Lee, "Design and fabrication of ultrawideband spinning direction finding antenna for airborne applications," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 4, pp. 320-323, Apr. 2018.

[12] X. Zhang, Y. Li, X. Yang, T. Long, and L. Zheng, "Sub-array weighting UN-MUSIC: A unified frame-

work and optimal weighting strategy," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 21, no. 7, pp. 871-874, Jul. 2014.

[13] S. Kim, J. Han, Y. Jang, and J. Choi, "Study on 2×2 subarray antenna for implementation of VHF band active electronically scanned array," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 6, pp. 473-476, Jun. 2018.

[14] Altair Engineering, Inc., "Altair FEKO suite 2018.2," 2018. <http://www.feko.info>

[15] M. Pazokian, N. Komjani, and M. Karimipour, "Broad-

band RCS reduction of microstrip antenna using coding frequency selective surface," *IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 8, pp. 1382-1385, Aug. 2018.

[16] G. Byun, H. Choo, and H. Ling, "Optimum placement of DF antenna elements for accurate DoA estimation in a harsh platform environment," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 9, pp. 4783-4791, Sep. 2013.

장 도 영 [홍익대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-5629-8294>



2015년 2월: 동양미래대학교 정보통신학과 (공학전문학사)
 2015년~2018년: 모아소프트 RF/EMC 사업부 연구원
 2018년 2월: 동양미래대학교 정보통신학과 (공학사)
 2018년~현재: 홍익대학교 전자전기공학

부 석사과정

[주 관심분야] 방향 탐지용 안테나 설계 및 배열 최적화, 전파 환경 분석

이 준 용 [홍익대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-4041-9565>



1986년 2월: 서울대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
 1988년 2월: 미국미네소타주립대 EECS (공학석사)
 1996년 5월: 미국미네소타주립대 EECS (공학박사)
 1996년 5월~1997년 2월: 미국 IBM 연구원

1997년 3월~현재: 홍익대학교 컴퓨터공학과 교수

[주 관심분야] 컴퓨터시스템 응용, 임베디드 시스템, 실시간 프로세싱 등

류 성 준 [홍익대학교/박사과정]

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



2014년 2월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학사)
 2016년 8월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
 2016년 9월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 박사과정

[주 관심분야] GPS 배열안테나, 안테나 설계 및 위치 최적화

추 호 성 [홍익대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-8409-6964>



1998년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)
 2000년 8월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학석사)
 2003년 5월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학박사)
 2003년 6월~현재: 홍익대학교 전자전기

공학부 교수

[주 관심분야] 초소형 안테나, 최적화 알고리즘을 이용한 안테나 설계, 차량 및 항공기 안테나

왕 진 천 [한국전자통신연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-6174-5872>

현재: 한국전자통신연구원 부설연구소 책임연구원