

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2023.23.1.131>

JIIBC 2023-1-19

원형배열안테나의 편파 특성을 고려한 위상 비교 방향탐지

Phase Comparison Direction Finding of Circular Array Antenna Considering Polarization Characteristics

우대웅*, 김재식*, 박진성*

Daewoong Woo*, Jaesik Kim*, Jinsung Park*

요약 본 논문에서는 8개의 단위 안테나로 구성된 원형배열안테나(Circular Array)의 편파(Polarization) 특성을 고려한 위상 비교 방향탐지에 대해 고찰하였다. 단위 안테나는 6 ~ 12 GHz의 광대역에서 동작하는 Cavity-Backed 패치 안테나를 적용하였으며, 다양한 편파를 수신할 수 있도록 Radial 방향으로 배치하였다. 위상 비교 시 정밀한 각도를 얻기 위해 넓은 간격의 소자들을, 모호성을 해결하기 위해 좁은 간격의 소자들을 적용하였다. 방위각과 고각 모두 $\pm 20^\circ$ 영역에 대해 2차원의 방향 탐지를 수행하였으며 정면 근처에서는 0.5° , 15° 근방 영역에서는 1.6° 이하의 도래각(DOA) 오차가 있음을 확인하였다.

Abstract In this paper, a phase comparison direction finding method of circular array composed of 8 antennas considering polarization characteristics is analyzed. A broadband cavity-backed patch antenna operating in 6 ~ 12 GHz is used, and the antennas are arranged in radial direction to receive various polarization signals. For the phase comparison, widely spaced elements are used to obtain precise DOA(Direction of Arrival), and narrowly spaced elements are used to resolve ambiguity. Two dimensional direction finding is performed for $\pm 20^\circ$ in both azimuth and elevation, and the DOA error is less than 0.5° and 1.6° near the boresight and the $\pm 15^\circ$ region, respectively.

Key Words : Circular Array, Direction Finding, Patch Antenna, Phase Comparison, Polarization

1. 서 론

기존의 소형 레이더에서는 메인 센서로 주로 평면 배열 안테나(Planar Array)를 사용한다. 평면 배열 안테나는 주어진 개구면의 면적을 최대한 활용하고 부엽 등을 고려하여 설계하므로^{[1]-[4]} 고이득/저부엽의 장점이 있으나, 방향 탐지의 관점에서 바라보게 되면 빔폭이 좁으므로, 넓은 각도 영역의 신호원을 탐지하기에는 용이하지 않다. 이러한 측면과 더불어 융복합(다중) 센서를 고려한

다면 보조 센서는 외곽에 원형배열 형태로 배치될 수 있으며, 16개의 이중편파 안테나의 배치 및 측정 결과가 제시된 바 있다^[5].

원형배열안테나, 광대역 안테나 및 방향탐지에 대해 최근 활발히 연구되고 있는 추세이다^{[6]-[16]}. 원형배열안테나의 부엽을 저감하기 위한 가중치 최적화^{[6][7]}, 부엽 식별 기법^{[7]-[9]}, 방향 탐지 및 추적 기법^[10], 주위 환경을 고려한 안테나 설계^[11] 등 다양한 연구가 수행된 바 있다.

적용 관점에서 보면 원형배열안테나의 설계 시 편파에

*정회원, 국방과학연구소

접수일자 2023년 1월 11일, 수정완료 2023년 1월 30일

게재확정일자 2023년 2월 3일

Received: 11 January, 2023 / Revised: 30 January, 2023 /

Accepted: 3 February, 2023

*Corresponding Author: woodw@add.re.kr
Agency for Defense Development, Korea

대한 고려가 필요하다. 선형 편파로만 배치하는 경우(예: 수직(Vertical) 편파 또는 RHCP(Right Handed Circular Polarization), 이의 반대 편파(예: 수평(Horizontal) 편파 또는 LHCP(Left Handed Circular Polarization)의 신호를 수신하는 데 어려움이 따른다. 단위 안테나로 이중 편파를 사용하는 경우 다양한 편파의 신호를 받을 수 있으나, 시스템이 복잡해지게 된다.

따라서 본 논문에서는 수직 또는 수평 편파를 모두 받을 수 있도록 Radial 방향으로 안테나를 배치하였고, 이의 편파 특성을 고려한 위상 비교 방향 탐지 기법에 대해 고찰하였다.

II. 원형배열 위상 비교 방향탐지

원형배열안테나의 형상을 그림 1에 나타내었다. 원형 배열안테나는 총 8개의 안테나로 구성되며 6 ~ 12 GHz 에서 동작하는 Cavity-Backed 패치 안테나를 적용하였다^[12]. 안테나의 기움각은 0도이고 가운데 구조물은 없다고 가정하였다. 원형배열안테나의 뒤쪽 면은 직경 280 mm의 도체 판으로 모델링하였으며, 패치 안테나 개구면의 중심은 반경 120 mm를 기준으로 45° 간격으로 배치되어 있다. 수평편파와 수직편파를 모두 수신할 수 있도록 1번부터 8번 안테나까지 +y축 기준으로 각각 22.5° + 45° × (n-1) (n은 안테나 번호) 회전된 위치에 배치되어 있다. 이러한 형상에서는 안테나 위치 별로 편파 Rotation에 따라 편파 특성이 다르게 형성된다. 예를 들어 1, 4, 5, 8번 안테나의 경우 수평 편파가 수직 편파에

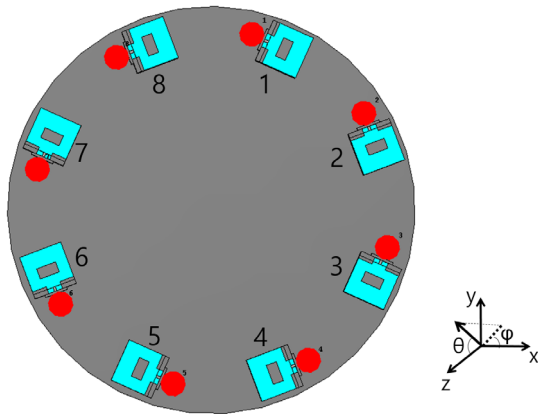


그림 1. 원형배열안테나 형상

Fig. 1. Geometry of Circular Array Antenna

비해 크고, 2, 3, 6, 7번 안테나의 경우 반대로 수직 편파가 수평 편파에 비해 큰 특성을 가진다.

위상 비교 방향탐지를 위해 긴 방향의 거리 소자들과 짧은 방향의 거리 소자들을 적용하였다. 먼저 긴 방향의 거리 소자로는 2번, 7번(방위각 방향) 및 1번, 4번(고각 방향)을 선정하였으며 정밀한 도래각(Direction of Arrival) 각도 계산에 적용할 수 있다. 반면에 위상차가 크기 때문에 도래각의 모호성이 발생하게 되며 이를 해결하기 위해 짧은 방향의 거리 소자인 1번, 8번(방위각 방향)과 2, 3번(고각 방향)을 선정하였다.

도래각(θ , ϕ)을 구하는 식은 아래와 같다^{[17][18]}. 식 (1a)~(1d)는 긴 방향 거리 소자에 해당하는 식이고, 식 (2a)~(2d)는 짧은 방향 거리 소자에 해당하는 식이다. 예를 들어 Φ_{18} 와 d_{18} 은 각각 1번과 8번 안테나의 위상차와 거리차를 의미한다. λ 는 파장(Wavelength)이며 θ 는 z축과 이루는 각도, ϕ 는 xy 평면으로 정사영(Projection)한 다음 x축과 이루는 각도에 해당한다. θ_L (θ_S)는 긴(짧은) 간격 안테나로부터 산출된 θ 를 의미하고, ϕ_L (ϕ_S)는 긴(짧은) 간격 안테나로부터 산출된 ϕ 를 의미한다. 각각의 위상차에는 상수 k (Integer)가 포함되어 있는데 이는 모호성을 풀기 위해 구해야 하는 값이다. θ 와 ϕ 를 구한 다음 각도 변환에 의해 방위각(Azimuth Angle)과 고각(Elevation Angle)을 산출한다.

$$\Phi_{27} = \left(\frac{2\pi d_{27}}{\lambda} \right) \sin\theta_L \cos\phi_L + 2\pi k_{27} \quad (1a)$$

$$\Phi_{14} = \left(\frac{2\pi d_{14}}{\lambda} \right) \sin\theta_L \sin\phi_L + 2\pi k_{14} \quad (1b)$$

$$\theta_L = \sin^{-1} \sqrt{\left(\frac{\Phi_{27}\lambda}{2\pi d_{27}} \right)^2 + \left(\frac{\Phi_{14}\lambda}{2\pi d_{14}} \right)^2} \quad (1c)$$

$$\phi_L = \tan^{-1} \left(\frac{\Phi_{14} d_{27}}{\Phi_{27} d_{14}} \right) \quad (1d)$$

$$\Phi_{18} = \left(\frac{2\pi d_{18}}{\lambda} \right) \sin\theta_S \cos\phi_S + 2\pi k_{18} \quad (2a)$$

$$\Phi_{23} = \left(\frac{2\pi d_{23}}{\lambda} \right) \sin\theta_S \sin\phi_S + 2\pi k_{23} \quad (2b)$$

$$\theta_S = \sin^{-1} \sqrt{\left(\frac{\Phi_{18}\lambda}{2\pi d_{18}} \right)^2 + \left(\frac{\Phi_{23}\lambda}{2\pi d_{23}} \right)^2} \quad (2c)$$

$$\phi_S = \tan^{-1} \left(\frac{\Phi_{23} d_{18}}{\Phi_{18} d_{23}} \right) \quad (2d)$$

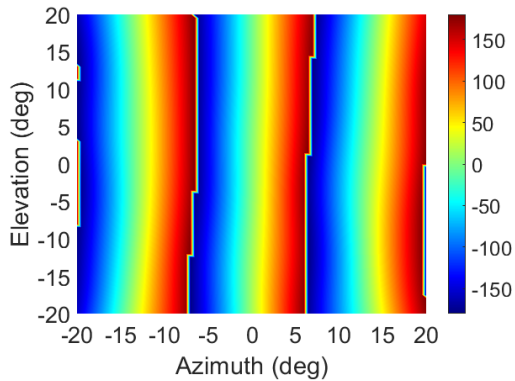


그림 2. 안테나 2-7번 위상차($k_{27} = 0$)
 Fig. 2. Phase Difference of Antenna 2-7($k_{27} = 0$)

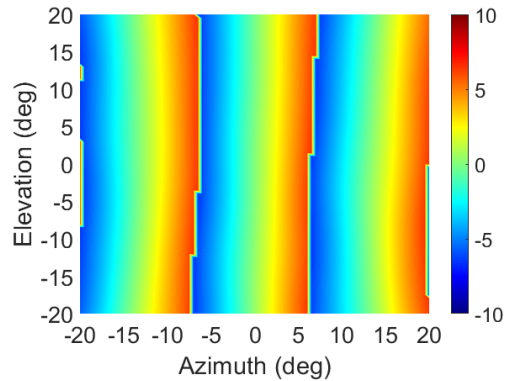


그림 4. 도래각 방위각(긴 거리, $k_{27} = k_{14} = 0$)
 Fig. 4. DOA Azimuth Angle(Long Distance, $k_{27} = k_{14} = 0$)

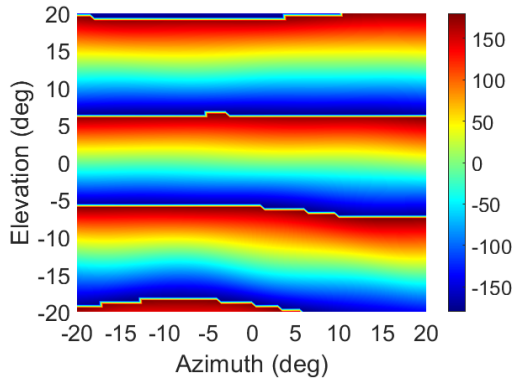


그림 3. 안테나 1-4번 위상차($k_{14} = 0$)
 Fig. 3. Phase Difference of Antenna 1-4($k_{14} = 0$)

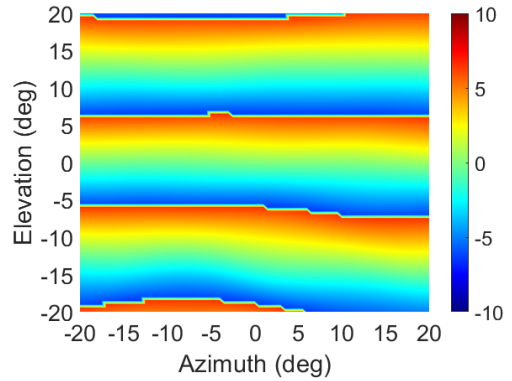


그림 5. 도래각 고각(긴 거리, $k_{27} = k_{14} = 0$)
 Fig. 5. DOA Elevation Angle(Long Distance, $k_{27} = k_{14} = 0$)

II. 편파를 고려한 방향탐지 결과

안테나 동작 주파수는 6 GHz, 편파는 수직편파를 고려하였다. 그림 1 형상에 해당하는 전자파 시뮬레이션은 CST MWS의 Time Domain Solver를 사용하였으며, 방향탐지와 관련된 기울기 보정, 도래각 추출, 모호성 해결 등의 시뮬레이션은 MATLAB을 이용하여 수행하였다.

식(1), (2)에서 짧은 거리인 d_{18} 과 d_{23} 의 물리적인 값은 91.8 mm이고 긴 거리인 d_{27} 과 d_{14} 의 물리적인 값은 221.7mm이다. 하지만 패치 안테나는 급전부 방사 등의 요인으로 인해 Point Source 방사와는 차이를 보이며 또한 편파 특성이 이상적이지 않다. 이를 고려하여 1차원(방위각 평면 및 고각 평면) 위상 비교를 통해 모호성이 발생하지 않는 영역에서의 위상차 기울기를 구하여 등가 거리를 산출함으로써 안테나 특성을 보상하였다.

산출 결과는 $d_{18}=91.0\text{mm}$, $d_{23}=77.5\text{mm}$, $d_{27}=223.6\text{mm}$, $d_{14}=231.2\text{mm}$ 가 나왔다.

안테나 단일 특성 및 배치 특성으로 인해 정면($\theta=0^\circ$)에서 안테나의 위상이 동일하지 않다(약 20도 편차). 이 값들은 미리 알고 신호처리 시 보상을 했다고 가정하였다. 시뮬레이션 각도 영역은 안테나 배열 특성을 감안하여 방위각 ± 20 도, 고각 ± 20 도 영역, 각도 Step은 0.5도로 설정하였다.

먼저 모호성을 풀지 않은 상황에서 위상차 및 도래각을 나타내면 그림 2 ~ 그림 5와 같다. 안테나 배치 특성으로 인해 방위각과 고각 평면을 기준으로 완전하게 대칭이 되지는 않음을 확인할 수 있다. 긴 거리에서는 약 $\pm 6^\circ$ 정도까지가 모호성이 발생하지 않는 영역이고, 짧은 거리에서는 약 $\pm 15^\circ$ 까지 모호성이 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

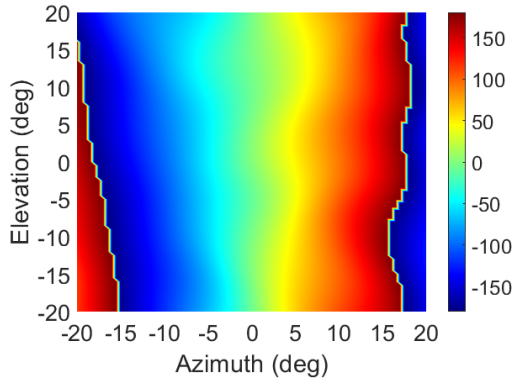


그림 6. 안테나 1-8번 위상차($k_{18} = 0$)
Fig. 6. Phase Difference of Antenna 1-8($k_{18} = 0$)

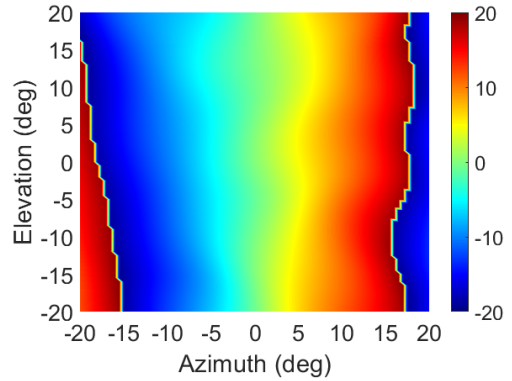


그림 8. 도래각 방위각(짧은 거리, $k_{18} = k_{23} = 0$)
Fig. 8. DOA Azimuth Angle(Small Distance, $k_{18} = k_{23} = 0$)

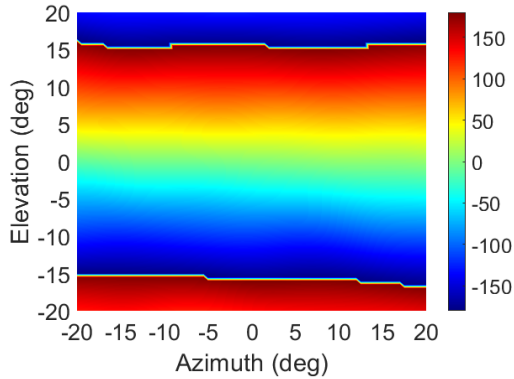


그림 7. 안테나 2-3번 위상차($k_{23} = 0$)
Fig. 7. Phase Difference of Antenna 2-3($k_{23} = 0$)

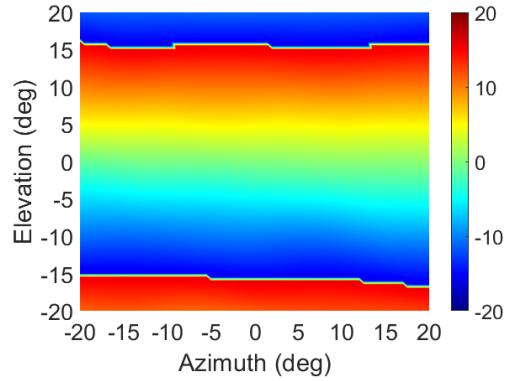


그림 9. 도래각 고각(짧은 거리, $k_{18} = k_{23} = 0$)
Fig. 9. DOA Elevation Angle(Small Distance, $k_{18} = k_{23} = 0$)

다음으로 모호성 해결을 위한 k 값을 적용해야 한다. 그림 2 ~ 그림 5로부터 $\pm 20^\circ$ 영역에서의 k 의 최대/최소는 각각 +2와 -2가 되고, 그림 6 ~ 그림 9로부터 $\pm 20^\circ$ 영역에서의 k 의 최대/최소는 각각 +1과 -1가 됨을 알 수 있다. 이 값을 찾는 과정은 다음과 같다. 1) k 의 총 조합(긴 거리 25개(방위각 5개 \times 고각 5개) \times 짧은 거리 9개(방위각 3개 \times 고각 3개) = 225개에서 긴 거리 및 짧은 거리 위상차를 이용하여 도래각(방위각, 고각)을 구한다. 2) 도출된 긴 거리와 짧은 거리의 도래각(방위각, 고각)의 차이가 각각 Threshold보다 작으면 모호성을 해결하는 k 로 저장한다. 여기서 Threshold 값이 너무 작으면 안테나 및 배열 특성으로 인해 오류 영역이 커질 수 있으므로 적절한 값을 선정하는 과정이 필요하며, 여기서는 4.5로 두었다. 3) 또한 모호성을 해결하기 위한 k 의 조합은 특정 각도일 경우 1개 이상이 될 수 있는

데 정면 부근의 각도 추출이 가장 중요하므로, k 의 절대값의 합이 가장 작은 조합으로 선정하였다.

모호성 상수를 고려한 다음 긴 거리에 대해 도래각을 구하였으며, 구한 결과는 아래 그림과 같다. 도래각 오차는 각도 영역에 따라 차이가 있으며(표 1), $\pm 5^\circ$ 영역은 0.5° 이하, $\pm 15^\circ$ 영역은 1.6° 이하의 오차를 가짐을 알 수 있다. $\pm 15^\circ$ 이후 영역 일부에서 각도 오차가 커지는 부분은 짧은 거리 위상차가 해당 영역에서 이상적이지 않아 모호성 상수 오차가 발생한 것에 기인한다.

표 1. 모호성 상수를 고려한 도래각 오차
Table 1. DOA Error Considering Ambiguity Constant

각도 영역	$\pm 5^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 15^\circ$
방위각	$< 0.15^\circ$	$< 0.32^\circ$	$< 0.46^\circ$
고각	$< 0.48^\circ$	$< 1.13^\circ$	$< 1.54^\circ$

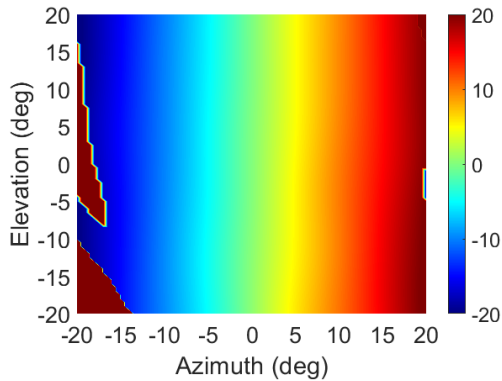


그림 10. 모호성 상수를 고려한 도래각 방위각(긴 거리)
 Fig. 10. DOA Azimuth Angle(Long Distance)
 Considering Ambiguity Constant

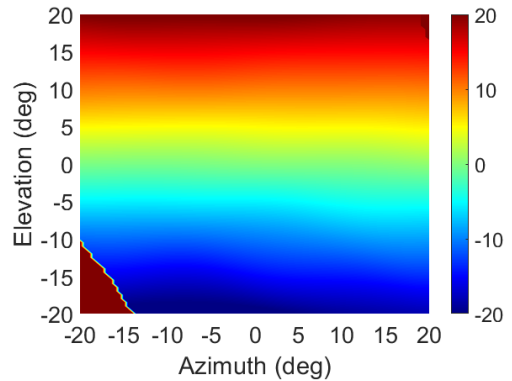


그림 12. 모호성 상수를 고려한 도래각 고각(긴 거리)
 Fig. 12. DOA Elevation Angle(Long Distance)
 Considering Ambiguity Constant

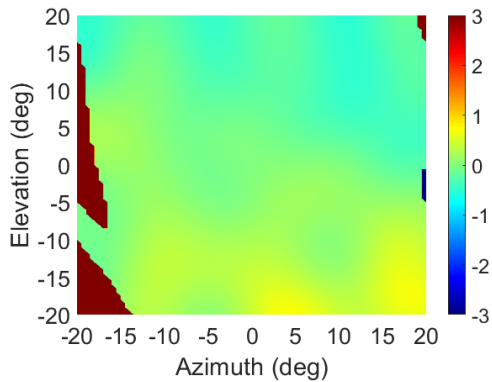


그림 11. 모호성 상수를 고려한 도래각 방위각 오차(긴 거리)
 Fig. 11. DOA Azimuth Angle Error(Long Distance)
 Considering Ambiguity Constant

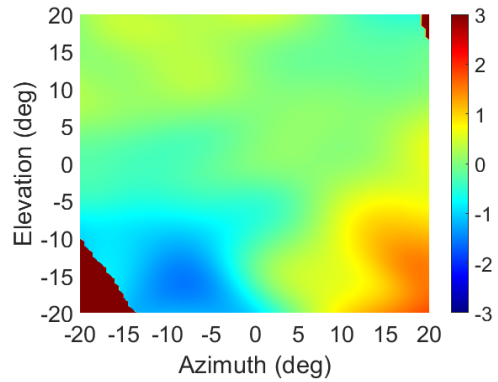


그림 13. 모호성 상수를 고려한 도래각 고각 오차(긴 거리)
 Fig. 13. DOA Elevation Angle(Long Distance) Error
 Considering Ambiguity Constant

V. 결 론

본 논문에서는 원형배열안테나의 배치 및 편파 특성에 따른 위상 비교 특성에 대해 살펴보았다. 이상적인 Point Source와는 다르게 실제 적용되는 안테나의 경우 배치에 따른 편파 및 안테나 자체 특성, 주위 구조물과의 간섭 등으로 인해 위상 특성은 예상과는 다소 차이를 보일 수 있다. 이를 고려하여 위상 비교 방식에서 정면의 위상값을 보상하고 위상 기울기를 보상하였다. 이러한 방법은 추후 챔버 내에서 복사패턴을 측정하고 방향탐지를 적용할 때 1D 측정으로 간단히 보상이 가능하다는 장점이 있다.

다만 선형편파 안테나로 수직/수평 편파를 모두 받아야 하는 구조적인 제한점으로 매우 넓은(예: $\pm 60^\circ$) 각도

영역에서 이러한 방법을 적용하려면 추가적인 알고리즘이 필요할 것으로 판단된다. 다른 소자들을 활용한 추가적인 모호성 해결, 참고문헌들에 제시된 가중치 최적화, 크기 비교 등 여러 기법을 추가로 적용한다면 더 나은 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

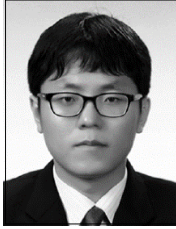
References

- [1] R. S. Elliott, Antenna Theory and Design, Wiley-Interscience, 2003.
- [2] H-K. Lee, Y-U. Park, and H-K. Choi, "Design of X-Band Phased Array Antenna Systems for Satellite Communication", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(IIBC),

- Vol. 5, No. 1, pp. 52-60, Jan. 2005.
- [3] J.-J. Kang, H.-S. Chang, "Design and Manufacture of the Ka-Band Array Antenna for Satellite Communication", *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC)*, Vol. 6, No. 1, pp. 21-26, Mar. 2006.
- [4] S. M. Sherman and D. K. Barton, "Monopulse Principles and Techniques", Artech House, 2011.
- [5] J. S. Park, H. G. Park, D. W. Woo, J. S. Kim, H. S. Yang, J. H. Jeong, D. K. Kong, and W. J. Kim, "Circular Conformal Array Antenna for Multi Mode Sensor", 2018 Conference of Korea Institute of Military Science and Technology(KIMST), pp. 2485-2486, Jun. 2018.
- [6] H. G. Park, J. S. Park, D. W. Woo, and J. S. Kim, "PSO Cost Function Modification for Side-Lobe Reduction of Single-Ring Circular Array Antenna," 2018 Conference of Korea Institute of Military Science and Technology(KIMST), pp. 1203-1204, Jun. 2018.
- [7] H. G. Park, J. S. Park, D. W. Woo, and J. S. Kim, "Side-Lobe Recognition for Sum-Delta Monopulse of Single-Ring Circular Array Antenna using PSO", 2018 Conference of Korea Institute of Military Science and Technology(KIMST), pp. 1205-1206, Jun. 2018.
- [8] D. W. Woo, J. S. Park, H. G. Park, S. Y. Lee, J. H. Shin, and D. K. Kong, "A Side-lobe Recognition Method of Sum-Delta Monopulse in a Circular Array", 2017 International Symposium on Microwave and Optical Technology(ISMOT), Jun. 2017.
- [9] D. K. Kong, D. W. Woo, J. S. Kim, and Y. J. Yoon, "Improved Sidelobe Recognition Method using Boresight Error in a Uniform Circular Array for Wideband Direction Finding System", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 108062-108068, Aug. 2021.
DOI: <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3100647>
- [10] H. G. Park, D. W. Woo, J. S. Kim, and J. S. Park, "Direction Finding and Tracking using Single-Ring Circular Array Antenna and Space Division", *Journal of Korea Institute of Military Science and Technology (KIMST)*, vol. 25, no. 2, pp. 117-124, Apr. 2022.
DOI: <http://doi.org/10.9766/KIMST.2022.25.2.117>
- [11] J. S. Kim, "A Direction-Finding Antenna Inserted into the Surface of Cylindrical Conductor Body," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 4, pp. 531-533, Jul. 2022.
DOI: <http://doi.org/10.26866/jees.2022.4.1.8>
- [12] D. K. Kong, J. S. Kim, D. W. Woo, and Y. J. Yoon, "Broadband Modified Proximity Coupled Patch Antenna with Cavity-Backed Configuration", *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 21, no. 1, pp. 8-14, Jan. 2021.
DOI: <http://doi.org/10.26866/jees.2021.21.1.8>
- [13] J.-Y. Kim, T.-S. Chang, and J. Hur, "A Study on Bandwidth Broadening of U-slot Microstrip Patch Antenna Design with L-Shaped Inset-Feed Structure," *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC)*, Vol. 21, No. 5, pp. 33-39, Oct. 2021.
DOI: <http://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.5.33>
- [14] D.-G. Shin, Y.-M. Lee, and Y.-S. Lee, "Design of Wide Band Folded Monopulse Slot Antenna for 3G/4G/5G/Wi-Fi(Dual Band) Services," *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC)*, Vol. 22, No. 1, pp. 127-134, Feb. 2022.
DOI: <http://doi.org/10.7236/JIIBC.2022.22.1.127>
- [15] P. D. Tung and C. W. Jung, "High Transparent Planar Dipole Antenna using Ionized Salt-water of ASA Structure," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society(JKAIS)*, Vol. 22, No. 3, pp. 492-498, 2022.
- [16] J. Choi and B. Jeong, "Design of CPW-fed Dual-band Circularly Polarized Double V-Shaped Antenna," *The Journal of KIIT*, Vol. 18, No. 2, pp. 87-92, Feb. 2020.
- [17] E. Jacobs and E. W. Ralston, "Ambiguity Resolution in Interferometry", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, vol. AES-17, no. 6, pp. 766-780, Nov. 1981.
- [18] B. L. Cho, J. S. Lee, J. M. Lee, and S. G. Sun, "Performance Comparison to Solve Angle Ambiguity Needed to Angle of Arrival Estimation in 2D Radar Interferometer", *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 3, pp. 410-413, Mar. 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5515/KJKEES.2012.23.3.410>

저 자 소 개

우 대 응(정회원)



- 2007년 2월 : 경북대학교 전자전기컴퓨터공학과(공학사)
- 2013년 2월 : 포항공과대학교 전자공학과(공학박사)
- 2013년 4월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원
- 주 관심분야 : 안테나, 방향탐지, 주기구조

김 재 식(정회원)



- 2011년 2월 : 광운대학교 전파공학과(공학사)
- 2017년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과(공학박사)
- 2017년 1월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원
- 주 관심분야 : 고출력 안테나, 배열 안테나 시스템 설계

박 진 성(정회원)



- 2008년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
- 2010년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원
- 주 관심분야 : 레이다용 RF 송수신기 등

※ 이 성과는 2015-2018년 정부(방위사업청)의 재원으로 수행된 연구임.