JPNT 10(4), 291-296 (2021)
https://doi.org/10.11003/JPNT.2021.10.4.291

JPNT Journal of Positioning, Navigation, and Timing

On the Utilization of Polarization Dependency Acquired by an Intentionally Misaligned Antenna Array for Mitigation of GPS Jammers

Kwansik Park, Jiwon Seo†

School of Integrated Technology, Yonsei University, Incheon 21983, Korea

ABSTRACT

Recently, the dual-polarized antenna array has drawn attention due to the dependency of its signal processing gain on the signal polarization. Even though this polarization dependency makes it possible to mitigate a non-right-hand circularly polarized (non-RHCP) jamming signal from the same direction as a GPS signal, the dual-polarized antennas are not yet widely used for various applications. This study suggests a method that can acquire the polarization dependency of the signal-processing gain by intentionally misaligning antenna elements in a single-polarized antenna array. The simulation results show that the proposed method can successfully mitigate a non-RHCP jammer from the same direction as a GPS signal as if a dual-polarized antenna array does and provide comparable signal-to-jammer-plus-noise ratio (SJNR) performance with a completely aligned single-polarized antenna array and a dual-polarized antenna array.

Keywords: misaligned antenna array, dual-polarized antenna array, polarization dependency, jammer mitigation

1. 서 론

미국의 Global Positioning System (GPS)을 비롯한 위성항법 시스템에서 제공하는 위치, 항행 및 시각 정보는 항공, 선박, 통신 등 민간 및 군사의 다양한 분야에서 필수적으로 활용되고 있다 (Chiang et al. 2014, Kim et al. 2014, Yang et al. 2016, Yu 2018, Lim et al. 2019, Stallo et al. 2019). 그러나 약 20,000 km 고도의 궤도를 공전하는 위성으로부터 전송되는 항법 신호는 지표면 도달 시 일반적인 열잡음보다 낮을 정도로 그 세기가 매우 미약하여 (Borre et al. 2007) 의도적 전파교란인 재밍에 취약하다는 단점이 있다 (Wildemeersch et al. 2014). 이를 위해 다수의 재밍 신호를 동시에 감쇄할 수 있는 배열 안테나 항재밍 신호처리 기법이 폭넓게 연구되어 왔으며 (Gupta & Moore 2004, Seo et al. 2011, Khabbazibasmenj et al. 2012, Chen et al. 2012, Zhu et al. 2019, Akkad et al. 2020, Luijten et al. 2020), 그 중 이중편파 배열 안테나 기법은 신호처리 이득의 편파 의존성을 통해 기존의 일반적인 단일편파 배열 안테나와 달리 GPS 신호와 동일한 방향으로 입사하는 비 우회전 원편파 재머의 감쇄가 가능한 것으로 알려져 있으나 (Fante & Vaccaro 2002, Park et al. 2018, Park & Seo 2020), 일반적인 단일편파 안테나에 비해 높은 제작 난이도 및 가격 등으로 인해 보편적으로 상용되고 있지 않으므로 다양한 분야로의 폭넓은 적용에는 한계가 있다고 볼 수 있다.

이를 위해 본 논문에서는, 단일편파 배열 안테나의 각 안테나 소자를 의도적으로 각기 다른 방향으로 정렬함으로써 상기 이중편파 안테나와 같이 GPS 신호와 동일한 방향으로 입사하는 비 우회전 원편파 재머의 감쇄가 가능하도록 하였다. 각 안테나 소자가 모두 동일한 방향으로 정렬된 기존의 일반적인 배열 안테나의 경우, 신호처리 이득이 입사 신호의 방향에만 의존하는 함수이므로 GPS 신호와 동일한 방향의 재머가 입사할 경우 두 신호에 대하여 각기 다른 이득 값을 가질 수 없으므로 GPS 신호의 보존과 재머의 감쇄를 동시적으로 수행할 수 없다. 반면, 의도적으로 비정렬된 배열 안테나의 신호처리 이득은 입사 신호의 방향뿐만 아니라 편파에 의존하는 함수이므로 GPS 신호와 재머가 동일한 방향으로 입사하더라도 두 신호 간 편파 차이가 존재할 경우 적절한 신호처리 알고리즘을 통해 두 신호에 대하여 각기 다른 이득 값을 가질 수 있으며, 따라서 GPS 신호를 보존함과 동시에 비 우회전 원편파 재머를 감쇄할 수 있다.

본 논문에서 제시된 기법의 정성적 분석을 위하여, 비정렬된 배열 안테나를 위한 Minimum Variance Distortionless Response

Received Jul 04, 2021 **Revised** Aug 04, 2021 **Accepted** Aug 05, 2021
†**Corresponding Author**
E-mail: jiwon.seo@yonsei.ac.kr
Tel: +82-32-749-5833 Fax: +82-32-818-5801
Kwansik Park http://orcid.org/0000-0002-1486-7516
Jiwon Seo http://orcid.org/0000-0003-1781-533X

Copyright © The Institute of Positioning, Navigation, and Timing

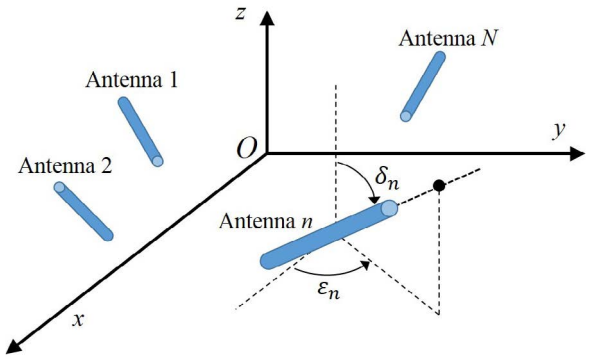

Fig. 1. Coordinate systems for the *N*-element misaligned antenna array. The orientation of each antenna element are determined by δ_n and ε_n.

(MVDR) 빔포밍 기법 (Park & Seo 2017)을 활용하여 GPS 신호와 동일한 입사 방향의 비 우회전 원편파 재머를 포함한 다수의 재머가 존재하는 시나리오에 대한 시뮬레이션을 통해 이득 패턴을 제시함으로써 GPS 신호의 보존과 비 우회전 원편파 재머의 감쇄가 동시에 가능함을 보였다. 또한 정량적 분석을 위해, 두 종류의 재밍 시나리오에 대하여 각 안테나 소자가 모두 정렬된 일반적인 단일편파 배열 안테나를 활용한 MVDR 빔포밍 기법과 이중편파 배열 안테나를 활용한 MVDR 빔포밍 기법과 함께 제안된 기법을 신호 대 재머 및 잡음 비 (SJNR: Signal to Jamming-plus-Noise Ratio)를 제시 및 비교하였다.

2. 비정렬된 배열 안테나 수신 신호 모델 및 MVDR 빔포밍 기법

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 각 안테나 소자가 각기 다른 방향으로 정렬된 N개 소자 배열 안테나를 고려하며, (δ_n,ε_n) $(n=1,2,\cdots,N)$는 각각 3차원 좌표계에서의 z축 및 x축과 평행한 직선에 대한 n번째 안테나 소자의 정렬 각을 의미한다. 상기 배열 안테나가 배치된 좌표계의 원점을 향해 방위각(azimuth angle) φ ($-180^\circ \le \varphi \le 180^\circ$)와 고각(elevation angle) θ ($0^\circ \le \theta \le 90^\circ$)로 입사하는 신호 $s(t)$에 대하여, n번째 안테나 소자의 수신 신호 $r_n(t)$는 Eq. (1)과 같이 표현된다.

$$r_n(t) = \mathbf{G}_n(\varphi,\theta) \bullet \hat{\mathbf{E}}(\gamma,\eta) s(t) \exp[j\omega_n(\varphi,\theta)] \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{G}_n(\varphi,\theta)$는 φ,θ 방향에 대한 n번째 안테나 소자의 이득 및 편파를 나타내는 complex radiation field function이고 (Kildal 1999), $\omega_n(\varphi,\theta)$는 원점에 대한 n번째 안테나 소자에 수신된 $s(t)$의 상대적 위상차이며, $\hat{\mathbf{E}}(\gamma,\eta)$는 입사 신호 $s(t)$의 편파를 나타내는 단위 전기장 벡터로서 Eq. (2)와 같이 표현된다 (Stutzman 1992).

$$\hat{\mathbf{E}}(\gamma,\eta) = \cos\gamma\,\hat{\boldsymbol{\varphi}} + \sin\gamma \exp[j\eta]\hat{\boldsymbol{\theta}} \quad (2)$$

여기서 γ 및 η는 서로 직교하는 두 전기장 벡터 성분의 상대적 크기 및 위상을 나타내는 매개변수이다. 우회전 원편파인 GPS 신호의 경우, $\gamma_{GPS}=90^\circ$, $\eta_{GPS}=-45^\circ$이다.

수신 신호 모델 Eqs. (1)과 (2)를 활용한 비정렬된 배열 안테나에서의 spatial processing을 위한 MVDR 빔포밍 기법은 Eq. (3)과 같이 표현된다 (Park & Seo 2017).

$$\begin{aligned} &\text{minimize } \mathbf{w}^H\mathbf{R}\mathbf{w} \text{ subject to } \mathbf{w}^H\mathbf{c}(\varphi_{\text{GPS}},\theta_{\text{GPS}}) = 1 \\ &\mathbf{c}(\varphi_{\text{GPS}},\theta_{\text{GPS}}) = [c_1 \quad \cdots \quad c_N]^{\text{T}} \\ &c_n = \left\{\mathbf{G}(\varphi_{\text{GPS}},\theta_{\text{GPS}}) \bullet \hat{\mathbf{E}}(90^\circ,-45^\circ)\right\} \exp[j\omega_n(\varphi_{\text{GPS}},\theta_{\text{GPS}})] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{w}$는 가중치 벡터이고, $\mathbf{R}$은 이중편파 배열 안테나의 각 안테나 소자에서의 잡음을 포함한 수신 신호간 공분산 행렬이고, $\mathbf{c}(\varphi_{\text{GPS}},\theta_{\text{GPS}})$는 GPS 신호의 입사 방향 $(\varphi_{\text{GPS}},\theta_{\text{GPS}})$으로 배열 안테나 신호처리 이득을 1로 유지하기 위해 사용되는 조향 벡터 (steering vector)이다. 입사각 (φ,θ) 및 편파 매개변수 (γ,η)를 가지고 입사하는 신호에 대하여, Eq. (3)에 의해 계산된 가중치 벡터가 적용된 신호처리 이득은 Eq. (4)와 같다.

$$g(\varphi,\theta,\gamma,\eta) = \sum_{n=1}^{N} w_n^* \mathbf{G}_n(\varphi,\theta) \bullet \hat{\mathbf{E}}(\gamma,\eta) \exp[j\omega_n(\varphi,\theta)] \quad (4)$$

Eq. (4)와 같이, 비정렬된 배열 안테나의 경우 신호처리 이득이 입사 신호의 방향 뿐만 아니라 편파에도 의존하는 함수이므로 동일한 방향으로 입사하는 서로 다른 편파의 두 신호에 대하여 각기 다른 이득 값을 부여할 수 있으며, 이는 GPS 신호와 동일한 방향으로 입사하는 비 우회전 원편파 재머의 감쇄가 가능함을 의미한다. 반면 일반적인 배열 안테나의 경우 모든 안테나 소자가 동일한 방향으로 정렬되어 $\mathbf{G}_1(\varphi,\theta)=\cdots=\mathbf{G}_N(\varphi,\theta)$이므로, Eq. (4)의 $\mathbf{G}_n(\varphi,\theta) \bullet \hat{\mathbf{E}}(\gamma,\eta)$항이 신호처리 이득에 영향을 주지 않게 되고, 결과적으로 신호처리 이득은 신호의 입사 방향에만 의존하는 함수로서 Eq. (5)와 같이 표현된다 (Chen et al. 2012).

$$\tilde{g}(\varphi,\theta) = \sum_{n=1}^{N} w_n^* \exp[j\omega_n(\varphi,\theta)] \quad (5)$$

따라서 기존의 일반적인 배열 안테나의 경우 동일한 방향으로 입사하는 두 신호에 대하여 각기 다른 이득 값을 부여할 수 없으므로 GPS 신호와 동일한 방향으로 입사하는 비 우회전 원편파 재머의 감쇄가 불가능하다.

3. 시뮬레이션을 통한 성능 분석

제 2장에서 제시된 항재밍 신호처리 기법의 정성적 및 정량적 분석을 위하여, Fig. 2a와 같이 비정렬된 8개의 Hertzian dipole 안테나로 구성된 배열 안테나를 가정하였으며 각 안테나 소자는 GPS L1 신호의 반파장($0.5\lambda_{GPS}$=0.095 m) 간격으로 배치되었다고 가정하였다. 정량적 성능 비교를 위하여 Figs. 2b와 2c 같이 정렬된 8개 소자 Hertzian dipole 배열 안테나 및 직교하는 Hertzian dipole 안테나로 구성된 4개 소자 이중편파 배열 안테나를 고려하였고 Fig. 2의 모든 안테나 소자는 x, y 평면 상에 위치한

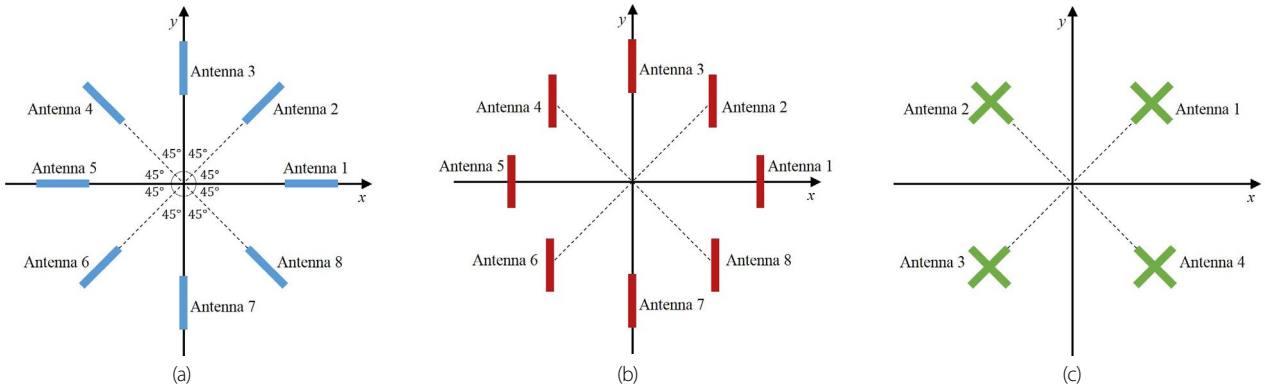

Fig. 2. Geometry of antenna elements in the three kinds of antenna arrays. (a) Misaligned antenna array; (b) Conventional aligned antenna array; (c) Dual-polarized antenna array.

Table 1. Locations and orientations of antennas in the misaligned antenna array in Fig. 2a.

Antenna	Location on xy-plane	Orientation (deg)
1	(0.1243,0)	(90, 0)
2	(0.089,0.089)	(90, 45)
3	(0,0.1243)	(90, 90)
4	(-0.089,0.089)	(90, 135)
5	(-0.1243,0)	(90, 180)
6	(-0.089,-0.089)	(90, 225)
7	(0,-0.1243)	(90, 270)
8	(0.089,-0.089)	(90, 315)

Table 2. Parameters of injected signals.

Antenna	Direction (deg)	Polarization (deg)	Intermediate frequency (MHz)	Signal power
GPS	(50, 85)	(45, -90)	0.2	SNR = -14 dB
Jammer 1	(50, 85)	(23, 70)	1.75	JSR = 40 dB
Jammer 2	(-105, 35)	(45, -90)	1.02	JSR = 40 dB
Jammer 3	(-15, 65)	(6, 52)	-0.45	JSR = 40 dB

다고 가정하였다. δ,ε 방향으로 정렬된 Hertzian dipole 안테나의 complex radiation field function은 Eq. (6)과 같다 (Cox 1983).

$$\mathbf{G}(\varphi,\theta) = [\sin\delta(\sin\varphi\cos\varepsilon - \cos\varphi\sin\varepsilon)]\hat{\boldsymbol{\varphi}} + [\sin\theta\cos\delta - \cos\theta\sin\delta(\cos\varphi\cos\varepsilon + \sin\varphi\sin\varepsilon)]\hat{\boldsymbol{\theta}} \quad (6)$$

비정렬된 배열 안테나의 각 안테나 소자의 정렬각 및 위치는 Table 1과 같고, Fig. 2b의 정렬된 배열 안테나의 각 안테나 소자의 정렬각은 비정렬된 배열 안테나의 첫 번째 안테나 소자와 동일하다고 가정하였으며, 각 소자의 위치는 Table 1과 동일하다고 가정하였다. 또한 n번째 이중편파 안테나 소자의 두 안테나 성분은 각각 비정렬된 배열 안테나의 $2n$번째 안테나 소자의 정렬각 및 그와 직교하는 방향으로 정렬되었다고 가정하였으며 위치는 비정렬된 배열 안테나의 $2n$번째 안테나 소자의 위치와 동일하다고 가정하였다. 상기 3 종류의 배열 안테나 모두 해당 수신 신호 모델을 활용한 MVDR 빔포밍 기법을 적용하였다.

먼저 정성적 분석을 위하여 Table 2와 같이 1개의 GPS 신호와 3개의 연속파(continuous wave) 재머가 입사하는 시나리오를 고려하였다. 3개의 재머는 2개의 임의의 비 우회전 원편파 및 1개의 원편파 재머로 구성되어 있으며 2개 중 1개의 비 우회전 원편파 재머는 GPS 신호와 동일한 방향으로 입사한다고 가정하였다. 상기 재밍 시나리오에 대한 각 재머의 감쇄 및 GPS 신호의 보존 여부를 관찰하기 위하여 Fig. 3과 같이 이득 패턴을 도시하였으며, 각 신호에 대한 이득 패턴은 Eq. (4)의 γ,η를 각 신호의 편파 매개변수 값으로 고정시킨 후의 신호 입사 방향 (φ,θ)에 따른 신호처리 이득의 2차원 그래프와 같다.

우선 제 2장에서 설명한 바와 같이 비정렬된 배열 안테나의 신호처리 이득은 입사 신호의 편파에 의존하는 함수이므로, Figs. 3a–c를 통해 편파가 서로 다른 3개의 재머에 대하여 각기 다른 이득 패턴이 얻어진 것을 확인할 수 있다. 반면 세 번째 재머는 GPS 신호와 동일한 우회전 원편파 신호로 가정하였으므로($\gamma_{J3}=\gamma_{GPS}=45^\circ$,$\eta_{J3}=\eta_{GPS}=-90^\circ$), Figs. 3c,d를 통해 두 신호에 대하여 동일한 이득 패턴이 얻어진 것을 확인할 수 있다. Figs. 3a–c를 통해 모든 재머의 방향에 대하여 낮은 이득 값을 나타난 것을 확인할 수 있고 이는 각 재머가 적절하게 감쇄되었음을 의미하며, Fig. 3d를 통해 GPS 신호 방향으로 약 0 dB의 이득 값이 나타난 것을 확인할 수 있고 이는 재머 감쇄와 동시에 GPS 신호의 보존이 적절하게 이루어졌음을 의미한다. 비록 Figs. 3a–c에서 재머의 방향이 아닌 다른 방향들에 대하여 낮은 이득 값이 나타나지만, GPS 신호 방향에 대하여 신호처리 이득이 유지되었으므로, 재머 방향 외 낮은 이득 값의 영향은 미미하다고 볼 수 있다.

다음으로 정량적 분석을 위해 두 종류의 시나리오에 대하여 Fig. 2에 나타낸 3종류의 배열안테나의 성능을 비교하였으며, 나머지 두 종류의 배열 안테나 빔포밍 기법으로는 Chen et al. (2012)과 Park et al. (2018)에서 제시한 MVDR 빔포밍 기반 spatial-temporal processing에서 single time tap 설정을 통해 본 논문의 기법과 마찬가지로 spatial processing을 수행하도록 하였다. 첫 번째 시나리오는 Table 2와 동일하며, 두 번째 시나리오는 Table 2의 첫 번째 재머의 입사 방향을 $\varphi=-130^\circ$, $\theta=45^\circ$로 변경하여 모든 신호가 각기 다른 방향으로 입사하도록 설정하였다. 설정된 각각의 두 시나리오에 대하여, 항재밍 분야 연구에서 설정하는 보편적인 재머 대 신호 비(JSR: Jammer to Signal Ratio)를 포함하는 범위인 (Rao & Swamy 2006, Chen et al. 2012, Lu & Jin 2014, Park et al. 2018, Park & Seo 2020) 30 dB부터 45 dB까지 3 dB 간격으로 증가시키며 3가지 안테나 타입의 신호 대 재머 및 잡음 비 변화 추이를 관찰하여 Fig. 4에 도시하였다.

먼저 기존의 정렬된 배열 안테나의 경우 GPS 신호와 동일한

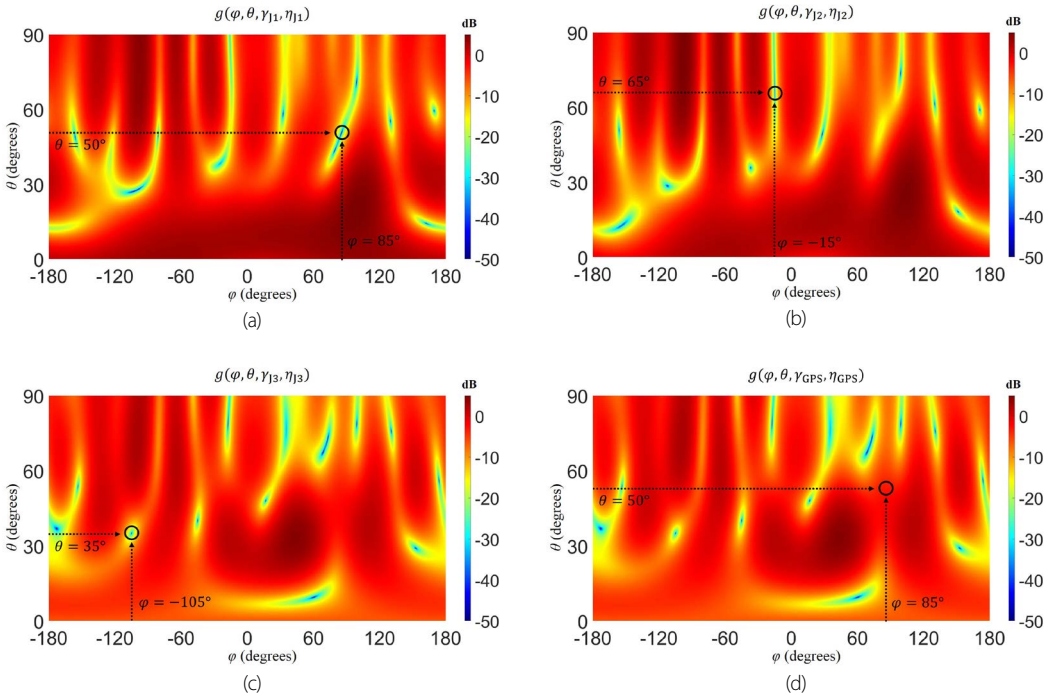

Fig. 3. Gain patterns of the misaligned antenna array in the jamming scenario in Table 2. Each subfigure was obtained by fixing γ, η as the values corresponding to the four incoming signals in Table 2. (a) Jammer 1; (b) Jammer 2; (c) Jammer 3; (d) GPS signal.

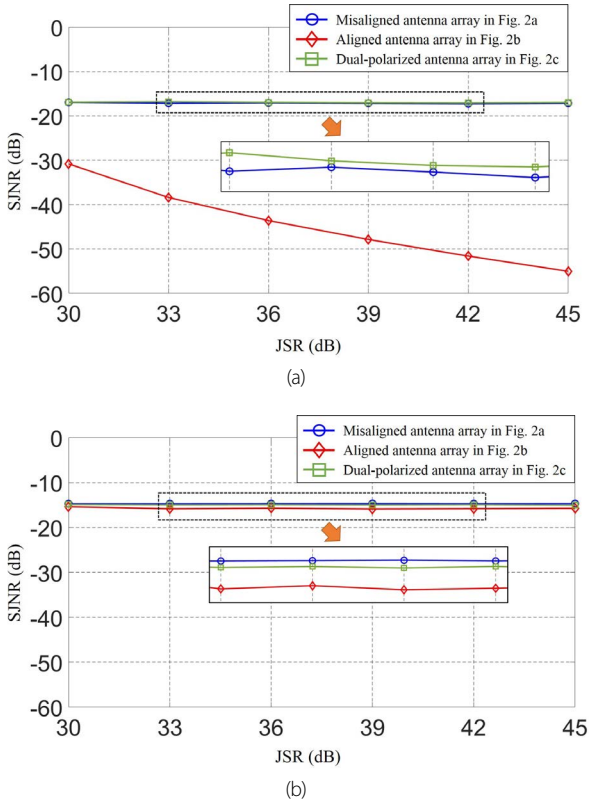

Fig. 4. Comparison of the SJNR performance of three antenna arrays, i.e., misaligned, aligned, and dual-polarized antenna arrays when the GPS signal and Jammer 1 are incident from (a) the same direction; (b) different directions.

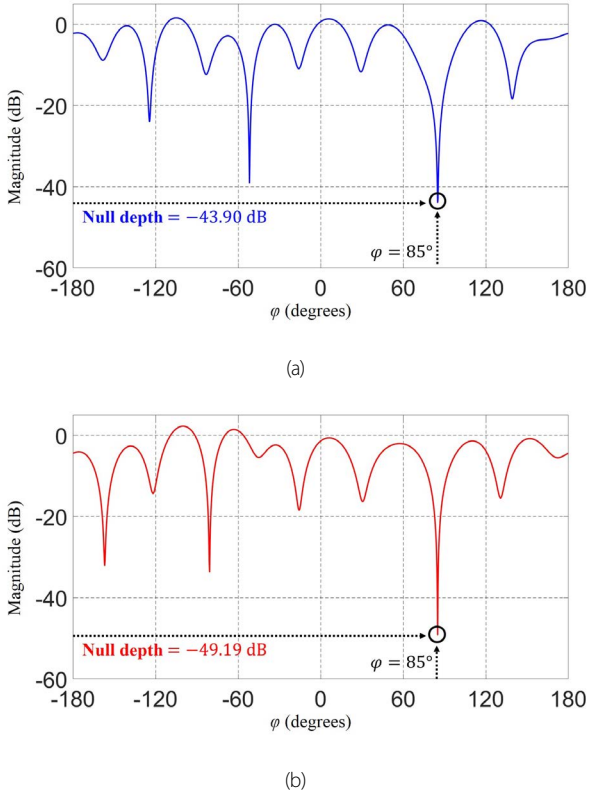

Fig. 5. Comparison of null depths generated in the direction of Jammer 1, when the GPS signal and Jammer 1 are incident from (a) the same direction; (b) different directions.

방향의 재머 감쇄가 불가능 하므로 해당 시나리오를 나타내는 Fig. 4a를 통해 재머 대 신호 비가 증가할수록 신호 대 재머 및 잡음 비 성능이 가파르게 감소함을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 4a에서 비정렬된 배열 안테나 및 이중편파 배열 안테나는 거의 동등한 신호 대 재머 및 잡음 비 성능을 재머 대 신호 비에 상관없이 유지하는 것을 확인할 수 있는데 이는 두 배열 안테나 모두 신호처리 이득의 편파 의존성으로 인해 시뮬레이션에서 설정한 재머 대 신호 비 범위에 있어서 재머가 적절하게 감쇄되었다고 해석할 수 있다.

반면 모든 신호가 서로 다른 방향으로 입사하는 두 번째 시나리오를 나타내는 Fig. 4b에서는 3 종류의 배열 안테나 모두 유사한 신호 대 재머 및 잡음 비 성능을 재머 대 신호 비에 상관없이 유지하는 것을 확인할 수 있으며, 이 역시 해당 시나리오에 대하여 3 종류의 배열 안테나 모두 시뮬레이션에서 설정한 재머 대 신호 비 범위에 있어서 적절하게 재머 감쇄를 수행했다고 볼 수 있다. 한편 비정렬된 배열 안테나 및 이중편파 배열 안테나의 경우 Fig. 4b에 비해 Fig. 4a에서의 신호 대 재머 및 잡음 비 성능이 소폭 낮은 것을 확인할 수 있다. 두 배열 안테나 모두 입사 신호를 공간(φ,θ) 및 편파(γ,η) 영역에서 각 신호의 구분이 가능한데, GPS 신호 및 재밍 신호가 동일한 방향에서 입사하는 경우 두 입사 신호는 오직 편파 영역에서만 구분이 가능하다. 이는 신호처리 측면에서의 자유도 감소를 의미하며 Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 공간 널(null) 깊이의 감소를 야기하고 결과적으로 신호 대 재머 및 잡음 비 성능 감소로 귀결된다.

4. CONCLUSIONS

본 논문에서는 단일편파 배열 안테나의 각 안테나 소자의 의도적 비정렬화를 통해 얻어지는 신호처리 이득의 편파 의존성을 항재밍 신호처리 관점에서 분석하였다. 먼저 GPS 신호와 비 우회전 원편파 재머가 동일한 방향으로 입사하는 시나리오에서의 각 재머에 대한 이득 패턴 분석 결과, 의도적 비정렬화로 얻어지는 신호처리 이득의 편파 의존성을 통해 단일편파 배열 안테나로도 이중편파 배열 안테나와 같이 해당 재머의 감쇄가 가능함을 확인하였다. 또한 정량적 비교 및 분석을 위하여, 기존의 정렬된 단일편파 배열 안테나 및 이중편파 배열 안테나를 비교 대상으로 상정하고 GPS 신호 및 비 우회전 원편파 재밍 신호의 입사 방향 간 일치 여부에 따른 두 종류의 시나리오에 대하여 시뮬레이션을 통해 재머 대 신호 비에 따른 신호 대 재머 및 잡음 비 변화 추이를 관찰하였다. 시뮬레이션 결과, 기존의 정렬된 배열 안테나의 경우 신호처리 이득이 오직 신호 방향에만 의존하므로 GPS 신호와 재밍 신호가 동일한 방향에서 입사하는 경우 감쇄가 불가능함을 확인하였다. 또한 비정렬된 배열 안테나 및 이중편파 배열 안테나의 경우 두 시나리오에서 모두 설정한 재머 대 신호 비 범위 전체에 대하여 적절하게 재머 감쇄가 이루어졌음을 확인하였으며, GPS 신호와 재밍 신호가 동일한 방향에서 입사하는 경우 신호처리 영역 상 자유도 감소로 인한 공간 널 깊이가 감소하여 성능이 소폭 감소함을 확인하였다. 본 연구 결과는 단일편파 배열 안테나를 통해 기존 이중편파 배열 안테나와 유사한 항재밍 특성을 얻을 수 있음을 의미하며 추후 안테나 패턴에 대한 사전 정보 없이 수신된 신호의 처리를 통해 MVDR 빔포밍 기법의 조향 벡터를 계산할 수 있는 후속 연구가 요구된다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단, 무인이동체원천기술개발사업단의 지원을 받아 수행되었음 (No. 2020M3C1C1A01086407).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, K. Park and J. Seo; methodology, K. Park and J. Seo; software, K. Park; validation, K. Park; formal analysis, K. Park; investigation, K. Park; writing—original draft preparation, K. Park; writing—review and editing, J. Seo.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

Akkad, G., Mansour, A., ElHassan, B. A., Inaty, E., Ayoubi, R., et al. 2020, A Pipelined Reduced Complexity Two-Stages Parallel LMS Structure for Adaptive Beamforming, IEEE Transactions on Circuits and Systems I, 67, 5079-5091. https://doi.org/10.1109/TCSI.2020.2994812

Borre, K., Akos, D. M., Bertelsen, N., Rinder, P., & Jensen, S. H. 2007, A Software-Defined GPS and Galileo Receiver: A Single-Frequency Approach (Boston: Birkhäuser) https://doi.org/10.1007/978-0-8176-4540-3

Chen, Y.-H., Juang, J.-C., Seo, J., Lo, S., Akos, D. M., et al. 2012, Design and Implementation of Real-Time Software Radio for Anti-Interference GPS/WAAS Sensors, Sensors, 12, 13417-13440. https://doi.org/10.3390/s121013417

Chiang, K., Psiaki, M., Powell, S., Miceli, R., & O'Hanlon, B. 2014, GPS-based attitude determination for a spinning rocket, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 50, 2654-2663. https://doi.org/10.1109/TAES.2014.120822

Cox, D. C. 1983, Antenna diversity performance in mitigating the effects of portable radiotelephone orientation and multipath propagation, IEEE Transactions on Communications, 31, 620-628. https://doi.org/10.1109/TCOM.1983.1095860

Fante, R. L. & Vaccaro, J. J. 2002, Evaluation of adaptive space–time-polarization cancel-lation of broadband

interference, in 2002 IEEE Position Location and Navigation Symposium, Palm Springs, CA, USA, 15-18 Apr 2002. https://doi.org/10.1109/PLANS.2002.998881

Gupta, I. J. & Moore, T. D. 2004, Space-frequency adaptive processing (SFAP) for radio frequency interference mitigation in spread-spectrum receivers, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 52, 1611-1615. https://doi.org/10.1109/TAP.2004.829850

Khabbazibasmenj, A., Vorobyov, S. A., & Hassanien, A. 2012, Robust adaptive beamforming based on steering vector estimation with as little as possible prior information, IEEE Transactions on Signal Processing, 60, 2974-2987. https://doi.org/10.1109/TSP.2012.2189389

Kildal, P.-S. 1999, Equivalent circuits of receive antennas in signal processing arrays, Microwave and Optical Technology Letters, 21, 244-246. https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2760(19990520)21:4<244::AID-MOP3>3.0.CO;2-S

Kim, M., Seo, J., & Lee, J. 2014, A comprehensive method for GNSS data quality determination to improve ionospheric data analysis, Sensors, 14, 14971-14993. https://doi.org/10.3390/s140814971

Lim, C., Yoon, H., Cho, A., Yoo, C.-S., & Park, B. 2019, Dynamic performance evaluation of various GNSS receivers and positioning modes with only one flight test, Electronics, 8, Article no. 1518. https://doi.org/10.3390/electronics8121518

Lu, G. & Jin, H.-Y. 2014, Covariance-Based Barrage Jammer Nulling Filter for Surveillance Radar, IEICE Transactions on Communications, E97-B, 512-518. https://doi.org/10.1587/transcom.E97.B.512

Luijten, B., Cohen, R., de Bruijn, F. J., Schmeitz, H. A. W., Mischi, M., et al. 2020, Adaptive Ultrasound Beamforming Using Deep Learning, IEEE Transactions on Medical Imaging, 39, 3967-3978. https://doi.org/10.1109/TMI.2020.3008537

Park, K., Lee, D., & Seo, J. 2018, Dual-polarized GPS antenna array algorithm to adaptively mitigate a large number of interference signals, Aerospace Science and Technology, 78, 387-396. https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.04.029

Park, K. & Seo, J. 2017, An MVDR beamforming method for an array of misaligned antenna elements, in 2017 IPNT Conference, Jeju, Korea, 1-3 Nov 2017, pp.351-354. http://ipnt.or.kr/2017proc/75

Park, K. & Seo, J. 2020, Single-Antenna-Based GPS Antijamming Method Exploiting Polarization Diversity, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 57, 919-934. https://doi.org/10.1109/TAES.2020.3034025

Rao, K. D. & Swamy, M. N. S. 2006, New approach for suppression of FM jamming in GPS receivers, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 42, 1464-1474. https://doi.org/10.1109/TAES.2006.314586

Seo, J., Chen, Y.-H., De Lorenzo, D. S., Lo, S., Enge, P., et al. 2011, A real-time capable software-defined receiver using GPU for adaptive anti-jam GPS sensors, Sensors, 11, 8966-8991. https://doi.org/10.3390/s110908966

Stallo, C., Neri, A., Salvatori, P., Capua, R., & Rispoli, F. 2019, GNSS integrity monitoring for rail applications: Two-tiers method, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 55, 1850-1863. https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2876735

Stutzman, W. L. 1992, Polarization in Electromagnetic Systems (Norwood: Artech House)

Wildemeersch, M., Slump, C. H., & Rabbachin, A. 2014, Acquisition of GNSS signals in ur-ban interference environment, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 50, 1078-1091. https://doi.org/10.1109/TAES.2013.120094

Yang, Y., Yue, X., & Dempster, A. G. 2016, GPS-based onboard real-time orbit determination for LEO satellites using consider Kalman filter, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 52, 769-777. https://doi.org/10.1109/TAES.2015.140758

Yu, K. 2018, Simplified tsunami modeling and waveform reconstruction with GNSS-R observations, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 54, 1470-1484. https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2793398

Zhu, X., Xu, X, & Ye, Z. 2019, Robust adaptive beamforming via subspace for interference covariance matrix reconstruction, Signal Processing, 167, Article no. 107289. https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2019.107289

Kwansik Park received the B.S. degree in electrical and electronic engineering from Yonsei University, Incheon, Korea, and the Ph.D. degree in integrated technology from Yonsei University, Incheon, Korea. His current research mainly focuses on GPS anti-interference technologies. Dr. Park is a post-doctoral researcher at Yonsei University.

Jiwon Seo received the B.S. degree in mechanical engineering (division of aerospace engineering) in 2002 from Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Korea, and the M.S. degree in aeronautics and astronautics in 2004, the M.S. degree in electrical engineering in 2008, and the Ph.D. degree in aeronautics and astronautics in 2010 from Stanford University, Stanford, CA, USA. He is currently an associate professor with the School of Integrated Technology, Yonsei University, Incheon, Korea. His research interests include GNSS anti-jamming technologies, complementary PNT systems, and intelligent unmanned systems. Prof. Seo is a member of the International Advisory Council of the Resilient Navigation and Timing Foundation, Alexandria, VA, USA.