JPNT 9(2), 59-63 (2020)
https://doi.org/10.11003/JPNT.2020.9.2.59

JPNT Journal of Positioning, Navigation, and Timing

Performance Analysis of GPS Anti-Jamming Method Using Dual-Polarized Antenna Array in the Presence of Steering Vector Errors

Kwansik Park, Jiwon Seo†

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

ABSTRACT

The antenna arrays are known to be effective for GPS anti-jamming and the performance can be improved further if a dual-polarized antenna array is used. However, when the Minimum Variance Distortionless Response (MVDR) beamformer is used as a signal processing algorithm for the dual-polarized antenna array, the anti-jamming performance can degrade in the presence of errors in the steering vector that is a key factor of the MVDR beamformer. Therefore, in this paper, the effect of the steering vector error on the anti-jamming performance of the dual-polarized antenna array is analyzed by simulations and the result is compared to that of the single-polarized antenna array.

Keywords: dual-polarized antenna array, anti-jamming, MVDR beamformer, steering vector

1. 서 론

위성항법시스템(Global Navigation Satellite System)은 현대의 다양한 분야에서 위치, 항행 및 시각 정보 획득을 위해 활용되고 있으나 (Seo et al. 2007, Kim et al. 2014, Yoon & Lee 2014, Kim et al. 2017, Park et al. 2017), 지상에서의 매우 낮은 수신 세기로 인하여 재밍에 취약하다는 단점 있다 (Wildemeersch et al. 2014, Kim & Seo 2017, Lee et al. 2019, Son et al. 2019). 이를 위해 배열 안테나를 이용한 항재밍 기법이 폭넓게 연구 및 활용되고 있으며 (Gupta & Moore 2004, Seo et al. 2011), 안테나 편파 다양성을 활용한 이중편파 배열 안테나 기법은 기존 단일 편파 배열 안테나 기법에 비해 동일한 안테나 소자로도 약 두 배 정도 많은 재밍 신호를 감쇄할 수 있는 것으로 알려져 있다 (Fante & Vaccaro 2002, Park et al. 2018).

배열 안테나 항재밍 기법의 신호처리 알고리즘으로 Minimum Variance Distortionless Response (MVDR) 알고리즘이 널리 활용되고 있는데 (Van Trees 2002), GPS 신호 방향에 대한 배열 안테나 이득 유지에 활용되는 steering 벡터 설계 시 실제 GPS 신호의 입사 방향과 수신기에서 추정된 입사 방향 간 오차가 존재하는 경우 성능이 하락하게 된다 (Khabbazibasmenj et al. 2012). 이를 해결하기 위해, 단일편파 배열 안테나의 경우 steering 벡터 오차에 따른 성능 분석 및 강인성 확보 연구가 이미 폭넓게 이루어져오고 있고 (Besson & Vincent 2005, Liu et al. 2016), 이중편파 배열 안테나의 경우 안테나 패턴의 모델링 오차가 적용된 steering 벡터에 대한 성능 분석이 수행된 바 있으나 (Park et al. 2018), MVDR 알고리즘의 성능에 보다 지배적인 영향을 미치는 GPS 신호의 입사 방향 추정 오차에 대한 분석은 이루어지지 않았다.

한편, 단일 편파 배열 안테나를 위한 MVDR 기법의 steering 벡터는 GPS 신호의 입사방향에 대한 각 안테나 소자 수신 신호의 위상으로 구성된 반면, 이중편파 배열 안테나에서의 steering 벡터는 상기 위상과 더불어 GPS 신호의 입사 방향에 대한 안테나 패턴으로 구성되어 있다. 따라서 steering 벡터 설계 시 사용되는 GPS 신호의 입사 방향 추정치와 실제 GPS 신호의 입사 방향 간 오차가 존재할 경우, 단일편파 배열 안테나에 비해 steering 벡터의 오차가 커지게 되어 보다 큰 항재밍 성능 감소가 야기될 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 GPS 신호의 입사 방향 추정 시 발생하는 steering 벡터 오차에 따른 이중편파 배열 안테나 기반 MVDR 기법의 성능 변화를 분석하고 이를 기존 단일편파 배열 안테나 기법과 비교하였다.

Received Mar 24, 2020 **Revised** Apr 24, 2020 **Accepted** Apr 24, 2020
†**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

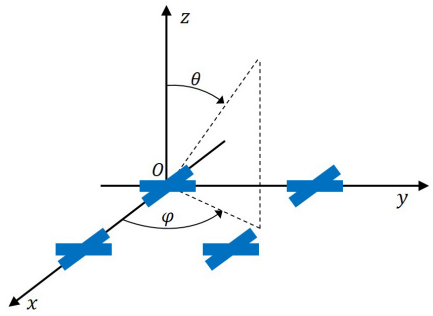

Fig. 1. Coordinate system for the 4-element dual-polarized antenna array.

2. 이중편파 배열 안테나 MVDR 알고리즘

본 연구에서는 성능 분석을 위하여 Fig. 1의 3차원 좌표계의 xy-평면에 배치된 4소자 이중편파 안테나를 고려하고, 각 이중편파 안테나는 좌표계의 x축 및 y축 방향으로 정렬된 Hertzian dipole 안테나 소자로 구성되어 있다고 가정한다. 이중편파 배열 안테나의 수신 신호에 적용되는 가중치 벡터 계산을 위한 MVDR 알고리즘은 Eq. (1)과 같이 표현된다 (Park et al. 2018).

$$\text{minimize } \mathbf{w}^H\mathbf{R}\mathbf{w} \text{ subject to } \mathbf{w}^H\mathbf{c} = 1 \tag{1}$$

여기서 $\mathbf{w}$는 가중치 벡터이고, $\mathbf{R}$은 이중편파 배열 안테나의 각 안테나 소자에서의 잡음을 포함한 수신 신호간 공분산 행렬이다. Fig. 1와 같이 좌표계의 원점으로 입사하는 신호의 azimuth angle 및 elevation angle을 φ 및 θ라고 하고 GPS 신호의 입사 방향을 ($\varphi=\varphi_{\text{GPS}}$, $\theta=\theta_{\text{GPS}}$)라고 하면, GPS 신호의 입사 방향 ($\varphi_{\text{GPS}}$, θ_{GPS})로 배열 안테나 이득을 1로 유지하기 위해 사용되는 steering 벡터인 $\mathbf{c}$는 Eq. (2)와 같다 (Park et al. 2018).

$$\begin{aligned}\mathbf{c} &= [c_{1,x} \quad c_{1,y} \quad \cdots \quad c_{N,x} \quad c_{N,y}] \\ c_{n,x} &= \{\mathbf{G}_x(\tilde{\varphi}_{\text{GPS}}, \tilde{\theta}_{\text{GPS}}) \bullet \hat{\mathbf{E}}(\gamma = 45°, \eta = -90°)\} \exp[j\omega_n(\tilde{\varphi}_{\text{GPS}}, \tilde{\theta}_{\text{GPS}})] \\ c_{n,y} &= \{\mathbf{G}_y(\tilde{\varphi}_{\text{GPS}}, \tilde{\theta}_{\text{GPS}}) \bullet \hat{\mathbf{E}}(\gamma = 45°, \eta = -90°)\} \exp[j\omega_n(\tilde{\varphi}_{\text{GPS}}, \tilde{\theta}_{\text{GPS}})]\end{aligned} \tag{2}$$

여기서 ($\tilde{\varphi}_{\text{GPS}}$, $\tilde{\theta}_{\text{GPS}}$)는 수신기에서 추정된 GPS 신호의 입사 방향이고, $\mathbf{G}_x(\tilde{\varphi}_{\text{GPS}}, \tilde{\theta}_{\text{GPS}})$ 및 $\mathbf{G}_y(\tilde{\varphi}_{\text{GPS}}, \tilde{\theta}_{\text{GPS}})$는 ($\tilde{\varphi}_{\text{GPS}}$, $\tilde{\theta}_{\text{GPS}}$)에 대한 n번째 이중편파 안테나의 두 dipole 안테나 소자의 이득 및 편파를 나타내는 complex radiation field function이다 (Kildal 1999). 또한 $\hat{\mathbf{E}}(\gamma,\eta)$는 입사 신호의 편파를 나타내는 단위 전기장 벡터로서, γ=45° 및 η=-90°는 GPS 신호의 우회전 원편파를 나타내는 매개변수이고, $\omega_n(\tilde{\varphi}_{\text{GPS}}, \tilde{\theta}_{\text{GPS}})$는 원점에 대한 n번째 이중편파 안테나 소자에 수신된 GPS 신호의 위상으로 입사 방향에 의해 결정된다. 이 논문에서 가정한 Hertzian dipole 안테나의 complex radiation field function (Cox 1983) 및 Eq. (2)의 $\hat{\mathbf{E}}(\gamma$=45°, η=-90°)는 Eq. (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\mathbf{G}_x(\tilde{\varphi}_{\text{GPS}}, \tilde{\theta}_{\text{GPS}}) &= \sin\tilde{\varphi}_{\text{GPS}}\,\mathbf{e}_\varphi - \cos\tilde{\theta}_{\text{GPS}}\cos\tilde{\varphi}_{\text{GPS}}\,\mathbf{e}_\theta \\ \mathbf{G}_y(\tilde{\varphi}_{\text{GPS}}, \tilde{\theta}_{\text{GPS}}) &= -\cos\tilde{\varphi}_{\text{GPS}}\,\mathbf{e}_\varphi - \cos\tilde{\theta}_{\text{GPS}}\sin\tilde{\varphi}_{\text{GPS}}\,\mathbf{e}_\theta \\ \hat{\mathbf{E}}(\gamma = 45°, \eta = -90°) &= \cos 45°\,\mathbf{e}_\varphi + \sin 45°\exp[j(-90°)]\,\mathbf{e}_\theta\end{aligned} \tag{3}$$

Table 1. Parameters of injected signals.

	Direction (φ,θ) (°)	Polarization (γ,η) (°)	Intermediate frequency (MHz)
GPS	(30, 55)	(45, -90)	0.2
Jammer 1	(35, 60)	(46, -89)	1.75
Jammer 2	(-105, 35)	(15, 124)	-0.63

여기서 $\mathbf{e}_\varphi$ 및 $\mathbf{e}_\theta$는 3차원 구면 좌표계의 φ 및 θ 방향 단위 벡터이다. 이와 비교하여, 단일편파 배열 안테나에서의 steering 벡터는 Eq. (4)와 같다.

$$\begin{aligned}\mathbf{c} &= [c_1 \quad c_2 \quad \cdots \quad c_{N-1} \quad c_N] \\ c_n &= \exp[j\omega_n(\tilde{\varphi}_{\text{GPS}}, \tilde{\theta}_{\text{GPS}})]\end{aligned} \tag{4}$$

Eq. (3)과 같이, 이중편파 배열 안테나에서의 steering 벡터는 단일편파 배열 안테나에서의 steering 벡터와 달리 GPS 신호의 입사 방향에 대한 위상 뿐 아니라, 이중편파 안테나의 패턴으로 이루어져 있다. 따라서, GPS 신호의 실제 입사 방향 (φ_{GPS}, θ_{GPS})에 대한 추정치 ($\tilde{\varphi}_{\text{GPS}}$, $\tilde{\theta}_{\text{GPS}}$) 계산 시 발생하는 azimuth angle 및 elevation angle의 추정오차를 각각 $\Delta\varphi_{\text{GPS}}=\varphi_{\text{GPS}}-\tilde{\varphi}_{\text{GPS}}$ 및 $\Delta\theta_{\text{GPS}}=\theta_{\text{GPS}}-\tilde{\theta}_{\text{GPS}}$라고 하면, $\Delta\varphi_{\text{GPS}}$ 및 $\Delta\theta_{\text{GPS}}$가 증가할수록 단일편파 배열 안테나에 비해 GPS 신호의 입사 방향에 대한 배열 안테나 이득에 보다 큰 왜곡이 발생하게 되며 이는 보다 큰 항재밍 성능 감소로 귀결될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 GPS 신호 입사 방향의 추정 오차 $\Delta\varphi_{\text{GPS}}$ 및 $\Delta\theta_{\text{GPS}}$에 따른 항재밍 성능을 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

3. 시뮬레이션을 통한 성능 분석

GPS 신호의 입사 방향 추정 오차에 따른 이중편파 배열 안테나 spatial processing 기법의 항재밍 성능을 분석하기 위하여 Fig. 1의 4소자 배열 안테나에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 기존 연구들에서는 GPS 신호의 반 파장 간격으로 각 안테나 소자가 배치된 배열 안테나를 상정하였으나, 실제로 배열 안테나가 배치될 시 탑재 공간이 충분치 않는 경우가 많다. 따라서 보다 실질적인 경우에서의 성능 분석을 위하여, Fig. 1과 같이 crossed Hertzian dipole 안테나가 배치된 정사각 배열 안테나를 가정하였으며, 인접한 두 안테나 소자 간 간격은 GPS 신호의 파장 λ_{GPS}의 1/4로 가정하였다. 또한 비교를 위하여 4개의 x축 방향 dipole 안테나로 구성된 단일편파 배열 안테나를 가정하였으며, 각 소자는 상기 이중편파 배열 안테나와 동일한 위치에 배치되었다고 가정하였고, 간단한 분석을 위하여 각 안테나 소자 간 mutual coupling의 영향은 시뮬레이션에 반영하지 않았다.

위와 같이 가정한 배열 안테나에 대하여 Table 1과 같이 한 개의 GPS 신호와 서로 다른 임의의 입사 방향 (φ,θ), 편파 (γ,η), 중심 주파수 (f)를 갖는 두 개의 재밍 신호가 입사하는 시나리오를 설정하였으며, 두 재밍 신호의 재머 대 신호 비(Jammer to Signal Power Ratio)는 30 dB로 설정하였다. 이중편파 배열 안테나 steering 벡터의 오차 영향을 보다 명확하게 보이기 위하여 첫 번째 재밍 신호는 GPS 신호와 유사한 입사 방향 및 편파를 갖도록

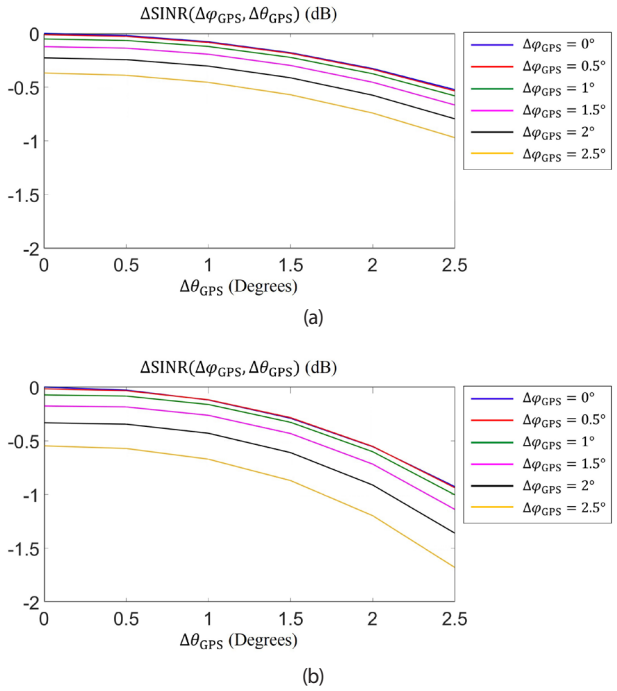

Fig. 2. The SINR degradation versus $\Delta\theta_{GPS}$ for various values of $\Delta\varphi_{GPS}$. (a) Single-polarized antenna array; (b) Dual-polarized antenna array.

설정하였다.

상기 시나리오에 대하여, $\Delta\varphi_{GPS}$를 0°부터 2.5°까지 0.5° 단위로 증가시키고, 각 $\Delta\varphi_{GPS}$마다 $\Delta\theta_{GPS}$를 0°부터 2.5°까지 0.5° 단위로 증가시키며 Signal to Interference-plus-Noise Ratio (SINR)을 관찰하였다. 성능 분석의 결과로서, GPS 신호 방향 추정 오차가 없는 이상적인 상황에서의 SINR에 대한 각 $\Delta\varphi_{GPS}$ 및 $\Delta\theta_{GPS}$ 값에서의 상대적인 SINR인 $\Delta SINR(\Delta\varphi_{GPS}, \Delta\theta_{GPS})$을 Eq. (5)와 같이 계산하여 단일편파 및 이중편파 배열 안테나 각각에 대하여 Fig. 2에 도시하였다.

$$\Delta SINR(\Delta\varphi_{GPS}, \Delta\theta_{GPS}) = SINR(\Delta\varphi_{GPS}, \Delta\theta_{GPS}) - SINR(\Delta\varphi_{GPS} = 0°, \Delta\theta_{GPS} = 0°) \quad (5)$$

Fig. 2에서의 각 그래프는 각 $\Delta\varphi_{GPS}$값에서의 $\Delta\theta_{GPS}$ 증가에 따른 Eq. (5)의 $\Delta SINR(\Delta\varphi_{GPS}, \Delta\theta_{GPS})$ 변화를 의미한다. 먼저 Fig. 2a를 통해 단일 편파 안테나의 경우 각 $\Delta\varphi_{GPS}$값마다 $\Delta\theta_{GPS}$ 범위에 대하여 최대 약 0.6 dB의 SINR 감소가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 $\Delta\varphi_{GPS}$ 및 $\Delta\theta_{GPS}$가 증가할수록 steering 벡터에 의해 MVDR 알고리즘이 단일편파 배열 안테나의 이득을 유지하는 방향이 실제 GPS 신호 입사 방향과 멀어지면서 GPS 신호 입사 방향의 이득이 감소함과 동시에 GPS 신호 입사 방향과 인접한 첫 번째 재머의 입사 방향으로 형성되는 공간 널 깊이에 영향을 주기 때문이다. 이는 기존 단일 편파 안테나에서의 steering 벡터 오차에 따른 MVDR 알고리즘 성능 연구와 유사한 결과이다 (Besson & Vincent 2005, Liu et al. 2016).

반면 이중편파 배열 안테나의 경우, Fig. 2b에 보인 바와 같이, 동일한 steering 벡터 오차에 대하여 단일편파 배열 안테나에서보다 큰 SINR 감소가 발생하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 이중편파 배열 안테나의 steering 벡터는 Eq. (2)와 같이 GPS 신호의 위상뿐만 아니라 GPS 신호 입사 방향의 complex radiation field function으로 구성되어 있기 때문이다. 따라서 $\Delta\varphi_{GPS}$ 및 $\Delta\theta_{GPS}$가 증가할수록 실제 GPS 신호 입사 방향과 MVDR 알고리즘에 의한 배열 안테나 이득 유지 방향이 멀어짐에 따라 complex radiation field function에서의 추가적인 오차로 인하여 단일 편파 배열 안테나에 비해 인접한 첫 번째 재머의 입사 방향으로 형성되는 공간 널 깊이에 보다 큰 영향을 주게 되고 이는 보다 큰 SINR 감소로 귀결된다. 따라서 Fig. 2a와 같이 단일편파 배열 안테나의 SINR 최대 감소 폭이 약 0.6 dB 인것과 달리, Fig. 2b와 같이 이중편파 배열 안테나에서는 약 1.2 dB의 SINR 감소 폭을 보이는 것을 확인할 수 있다. 그리고 인접한 두 안테나 소자 간 간격을 GPS 신호의 파장 λ_{GPS}의 1/2로 설정하고 동일한 시뮬레이션을 수행하였을 경우에는, 단일편파 배열 안테나의 SINR의 최대 감소 폭이 약 0.2 dB 인것과 달리, 이중편파 배열 안테나에서는 약 3.5 dB 정도로 큰 SINR 감소 폭을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이는 이중편파 배열 안테나에서의 MVDR 알고리즘 구현 시 항재밍 성능이 단일 편파 배열 안테나에 비해 steering 벡터의 정확도에 보다 민감하게 영향을 받는 것으로 볼 수 있다.

4. CONCLUSIONS

본 논문에서는 이중편파 배열 안테나에서 구현된 MVDR 알고리즘 기반의 항재밍 기법에 대한 steering 벡터의 오차 영향을 분석하였다. 이를 위하여 기존의 이중편파 배열 안테나 MVDR 알고리즘에 사용되는 steering 벡터 설계 시 실제 GPS 신호의 입사 방향 및 수신기에서 추정된 GPS 신호의 입사 방향 간 오차를 반영하였다. GPS 신호의 입사 방향에 대한 추정 오차가 반영된 steering 벡터의 영향을 정량적으로 분석하기 위하여, 4개 소자로 구성된 이중편파 배열 안테나와 더불어 동일한 소자 수로 구성된 단일편파 배열 안테나를 상정하고 시뮬레이션을 수행하였으며 GPS 신호의 입사 방향 오차에 따른 SINR 성능 추이를 관찰하였다. 시뮬레이션 결과 GPS 신호의 입사 방향 오차가 증가함에 따라 단일편파 배열 안테나에 비해 이중편파 배열 안테나에서의 SINR 성능이 보다 빠르게 감소하였으며, 이를 토대로 이중편파 배열 안테나에서의 재밍 감쇄 성능이 steering 벡터의 정확도에 크게 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구 결과는 이중편파 배열 안테나 기법의 실제 구현 및 적용 시 각 안테나에 대하여 상당히 높은 정확도의 GPS 신호 입사 방향 추정이 요구되는 것을 의미하므로 일정 범위 내의 추정 오차에도 충분한 항재밍 성능을 확보할 수 있는 후속 연구가 요구된다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 ICT 명품인재양성사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2019-2017-0-01015).

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

Besson, O. & Vincent, F. 2005, Performance analysis of beamformers using generalized loading of the covariance matrix in the presence of random steering vector errors, IEEE Transactions on Signal Processing, 53, 452-459. https://doi.org/10.1109/TSP.2004.840777

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 cancellation of broadband interference, in 2002 IEEE Position Location and Navigation Symposium, Palm Springs, CA, 15-18 Apr 2002.

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, E. & Seo, J. 2017, SFOL pulse: a high accuracy DME pulse for alternative aircraft position and navigation, Sensors, 17, Article number: 2183. https://doi.org/10.3390/s17102183

Kim, J., Song, J., No, H., Han, D., Kim, D., et al. 2017, Accuracy improvement of DGPS for low-cost single-frequency receiver using modified Flächen Korrektur parameter correction, ISPRS International Journal of Geo-Information, 6, Article number: 222. https://doi.org/10.3390/ijgi6070222

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

Lee, H., Kang, T., & Seo, J. 2019, Safety distance visualization tool for LTE-based UAV positioning in urban areas, Journal of Advanced Navigation Technology, 23, 408-414. https://doi.org/10.12673/jant.2019.23.5.408

Liu, J., Liu, W., Liu, H., Zhang, Z.-J., & Chen, B. 2016, Performance of the SMI beamformer with signal steering vector errors in heterogeneous environments, Signal Processing, 123, 22-29. https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2015.12.011

Park, B., Lim, C., Yun, Y., Kim, E., & Kee, C. 2017, Optimal divergence-free Hatch filter for GNSS single-frequency measurement, Sensors, 17, Article number: 448. https://doi.org/10.3390/s17030448

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

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

Seo, J., Walter, T., Marks, E., Chiou, T.-Y., & Enge, P. 2007, Ionospheric scintillation effects on GPS receivers during solar minimum and maximum, in Proc. International Beacon Satellite Symposium, Boston, MA, 11-15 Jun 2007

Son, P.-W., Rhee, J. H., Hwang, J., & Seo, J. 2019, Universal kriging for Loran ASF map generation, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 55, 1828-1842. https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2876587

Van Trees, H. L. 2002, Optimum Array Processing (New York: John Wiley & Sons, Inc.)

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

Yoon, M. & Lee, J. 2014, Medium-scale traveling ionospheric disturbances in the Korean region on 10 November 2004: Potential impact on GPS-based navigation

systems, Space Weather, 12, 173-186. https://doi.org/
10.1002/2013SW001002