

Performance Evaluation of Cascade AOA Estimator Based on Uniform Circular Array

Tae-yun Kim¹, Suk-seung Hwang^{2†}

¹Department of Electronic Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

²School of Electronic Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

ABSTRACT

For a wireless communication system, the angle-of-arrival (AOA) of the signal has a variety of applications. The signal AOA is estimated utilizing various antenna array structure such as Uniform Linear Array (ULA), Uniform Rectangular Array (URA), and Uniform Circular Array (UCA). In this paper, we introduce a cascade AOA estimation algorithm based on the UCA, which is consisted of CAPON and Beamspace MUSIC. CAPON is employed to estimate approximate AOA groups including multiple AOA signals and Beamspace MUSIC is employed to estimate detailed signal AOAs in the estimated AOA groups. In addition, we provide the computer simulation results for verifying and analyzing the performance of the cascade AOA estimator based on UCA.

Keywords: AOA estimation, uniform circular array (UCA), cascade estimator, CAPON, beamspace MUSIC

1. INTRODUCTION

차세대 무선 통신 시스템에서 신호의 도래각 정보는 신호원의 위치추정, 간섭 및 재밍 신호 제거, 수신신호의 품질 개선 등을 위한 핵심적인 요소이다. 특정 신호의 도래각 추정은 레이더를 포함한 지상 무선통신 시스템 (Choi et al. 2011, Cho et al. 2017, Egger et al. 2017), 무인기 (Kim et al. 2015, Lim et al. 2018), 지구의 특정 궤도를 돌고 있는 위성 (Hwang et al. 2013) 등에서 추정될 수 있다. 또한, 신호의 도래각 추정은 앞서 언급한 다양한 시스템에 특정 평면에 배치되는 ULA, URA, UCA 등의 다양한 형태의 배열 안테나를 적용하여 추정될 수 있다. ULA의 경우 구조가 단순하여 구현하기가 용이하지만 방위각(azimuth angle) 검색에 제한이 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 평면 배열 안테나 구조가 제안되었는데, 이에 해당하는 URA와 UCA는 고도각(elevation angle)과 방위각을 동시에 추정할 수 있다는 장점을 가진다. UCA의 경우 구조적 대칭 특성 및 중앙의 안테나 요소

(element)로 인해, 일반적으로, URA 보다 우수한 도래각 추정 성능을 보인다 (Ioannides & Balanis 2005, Sanudin 2014, Cao et al 2015).

본 논문은 이러한 장점을 가지는 UCA 안테나 구조를 적용한 CAPON과 Beamspace MUSIC으로 구성된 캐스케이드 도래각 추정기를 소개한다. 캐스케이드 도래각 추정알고리즘은 두 알고리즘을 순차적으로 사용하여, 신호원이 존재하는 대략적인 범위를 확인하고, 추정된 범위에 해당하는 각도들만 스캔함으로써, 모든 각도를 스캔하는 MUSIC과 같은 일반적인 도래각 추정알고리즘에 비해 효율적이다. CAPON은 다수개의 신호 도래각들을 포함하는 도래각 그룹들을 추정하고, Beamspace MUSIC은 추정된 도래각 그룹들에 포함된 신호들의 상세한 도래각들을 추정한다. 또한, 캐스케이드 도래각 추정알고리즘 (Kim & Hwang 2018)에 적용할 수 있는 UCA 안테나에 대한 수학적 모델을 제시하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제시된 도래각 추정기의 성능을 평가하고 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 UCA 안테나, 신호 및 잡음을 포함한 수신신호 모델을 제시하고, 3장에서 UCA 안테나 기반의 캐스케이드 도래각 추정기를 소개한다. 4장에서 제시된 UCA 안테나 기반의 도래각 추정기 성능 평가 및 분석을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 보이고, 5장에서 논문의 결론을 맺는다.

Received May 24, 2020 Revised May 29, 2020 Accepted Jun 02, 2020

[†]Corresponding Author

E-mail: hwangss@chosun.ac.kr

Tel: +82-62-230-7741 Fax: +82-62-230-6596

Tae-yun Kim <https://orcid.org/0000-0003-1696-8967>

Suk-seung Hwang <https://orcid.org/0000-0002-0482-6868>

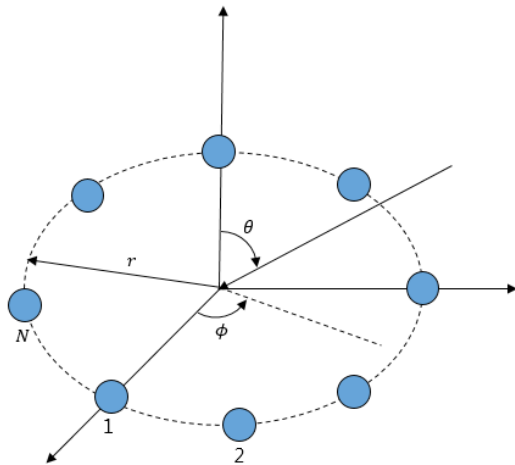


Fig. 1. UCA antenna geometry.

2. RECEIVED SIGNAL MODEL

본 장에서는 수신기의 원형 배열 안테나로 입사되는 다수의 신호들과 잡음을 포함하는 수신신호 모델을 제시한다. 수신기에 적용된 안테나 구조는 Fig. 1의 형상을 가지며, N 개의 안테나 소자를 갖는다고 가정한다. Fig. 1의 UCA 배열 안테나에 L 개의 신호가 입사된다고 가정하면, 샘플 인덱스 k 에 대한 수신신호 벡터는 Eq. (1)과 같이 정의된다.

$$\mathbf{x}(k) \triangleq \mathbf{A}\mathbf{s}(k) + \mathbf{j}(k) \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{x}(k)$ 는 크기 N 의 수신신호 벡터이고, $\mathbf{A}$ 는 크기 $N \times L$ 의 배열 응답행렬이며, Eq. (2)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{A} \triangleq \begin{bmatrix} e^{-jkr \sin \theta_1 \cos(\phi_1 - \Gamma_0)} & \dots & e^{-jkr \sin \theta_L \cos(\phi_L - \Gamma_0)} \\ e^{-jkr \sin \theta_1 \cos(\phi_1 - \Gamma_1)} & \dots & e^{-jkr \sin \theta_L \cos(\phi_L - \Gamma_1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-jkr \sin \theta_1 \cos(\phi_1 - \Gamma_N)} & \dots & e^{-jkr \sin \theta_L \cos(\phi_L - \Gamma_N)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, $k=2\pi/\lambda$ 는 파상수, $r=N/k$ 은 배열안테나의 반지름이며, $\Gamma=2\pi n/N(n=0, 1, \dots, N-1)$ 은 안테나 소자의 위치를 나타내며, θ 는 고도각(elevation angle), ϕ 는 방위각(azimuth angle), λ 는 파장을 나타낸다. $\mathbf{s}(k)$ 는 크기 L 의 신호 벡터이며, $\mathbf{j}(k)$ 는 평균이 0이고, 분산이 σ^2 인 크기 N 의 Additive White Gaussian Noise 잡음벡터이다. 또한, $\mathbf{A}$ 의 각 열(column)은 해당 신호의 배열 응답 벡터가 된다.

3. CASCADE AOA ESTIMATOR BASED ON UCA

본 장에서는 CAPON과 Beamspace MUSIC (Lee et al. 2006, Kim & Hwang 2018)으로 구성된 UCA 기반의 캐스케이드 AOA 추정기를 소개한다. Fig. 2는 고려된 추정기의 기본적인 구조를

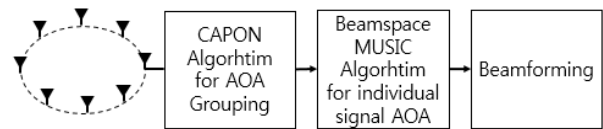


Fig. 2. Block diagram for the basic structure of the cascade AOA estimator.

나타내는 블록 다이어그램이다.

3.1 UCA Antenna

Fig. 1과 같은 UCA 안테나 구조를 캐스케이드 AOA 추정기에 적용하기 위한 특정 고도각 및 방위각에 대한 배열 응답벡터는 Eq. (3)과 같이 정의된다.

$$\mathbf{a}(\theta, \phi) \triangleq \left[e^{-jkr \sin \theta \cos \phi}, e^{-jkr \sin \theta \cos(\phi - 2\pi/N)}, \dots, e^{-jkr \sin \theta \cos(\phi - 2\pi(N-1)/N)} \right]^T \quad (3)$$

여기서 $[\]^T$ 는 전치행렬을 나타낸다. Eq. (3)을 기반으로, 도래각 추정에 대한 추정 정확성을 정량화 하기 위한 각 비용함수(cost function)에 대한 피크 값을 계산하여, AOA 그룹들과 상세한 신호 AOA들을 추정한다.

3.2 CAPON for Estimating AOA Groups

CAPON 알고리즘은 고전적인 빔형성 기법 기반의 도래각 추정 알고리즘의 해상도를 개선하기 위해 설계된 알고리즘 (Capon 1969)으로 원하는 신호의 방향으로 빔(Beam)을 형성하고, 원하지 않는 신호의 방향으로 널(Null)을 형성하여, 출력 스펙트럼 분석을 통해 도래각을 추정하는 알고리즘이다 (Liao et al. 2006). 다수개의 신호들의 AOA들을 포함한 대략적인 AOA 그룹들을 추정하기 위한 CAPON 알고리즘의 공간 스펙트럼은 Eq. (4)와 같이 정의된다.

$$P(\theta, \phi) \triangleq \frac{1}{\mathbf{a}(\theta, \phi)^H \mathbf{R}_c^{-1} \mathbf{a}(\theta, \phi)} \quad (4)$$

여기서, $\mathbf{R}_c = [\mathbf{x}_c(k)\mathbf{x}_c(k)^H]$ 은 Eq. (1)에 대한 공분산 행렬이고, $(\)^H$ 은 켈레 전치이다. Eq. (4)의 피크 값들이 AOA 그룹의 최대값들이 되고, 해당 방위각 및 고도각의 AOA 정보는 해당 AOA 그룹에 포함된다.

3.3 Beamspace MUSIC for Estimating the Detailed Signal AOAs

원형 배열 안테나를 Beamspace MUSIC 알고리즘에 적용하기 위해서는 phase 모드를 생성하기 위한 가중치 벡터가 계산되어야 한다. m 번째 가중치 벡터는 Eq. (5)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{w}_m^H \triangleq \frac{1}{\sqrt{N}} \left[1, e^{jm \frac{2\pi}{N}}, e^{jm \frac{4\pi}{N}}, \dots, e^{jm \frac{2(N-1)\pi}{N}} \right] \quad (5)$$

Eq. (5)를 바탕으로 $(2M+1)$ 차원의 빔공간 행렬 $\mathbf{B}_{PM}$ 을 생성할 수 있으며, Eq. (6)과 같이 정의된다.

Table 1. Summary of the first computer simulation scenario.

Signal	Elevation (θ°)	Azimuth (ϕ°)	Center frequency	Modulation index	Normalized modulation frequency
CW1	71	-103	0.20	-	-
CW2	71	127	0.30	-	-
WB1	71	10	0.41	-	-
WB2	71	-108	0.13	-	-
FM1	71	137	0.05	0.08	0.01

Table 2. Summary the second computer simulation scenario.

Signal	Elevation (θ°)	Azimuth (ϕ°)	Center frequency	Modulation index	Normalized modulation frequency
AM1	-15	79	0.11	0.03	-
AM2	-15	86	0.44	0.03	-
FM1	-15	-97	0.22	0.08	0.01
FM2	-15	-90	0.32	0.08	0.01

$$\mathbf{B}_{PM} \triangleq \mathbf{C}_j \mathbf{B}^H \quad (6)$$

여기서, $\mathbf{B} = [\mathbf{w}_M \dots \mathbf{w}_0 \dots \mathbf{w}_M]$ 는 $N \times 2M+1$ 크기의 phase 모드 행렬이며, $\mathbf{C}_j = \text{diag}\{j^{-M}, \dots, j^{-1}, \dots, 1, j^1, \dots, j^M\}$ 는 $2M+1 \times 2M+1$ 크기의 출력 스케일링 대각행렬이다. 원형 배열안테나가 적용된 Beamspace MUSIC 알고리즘의 빔공간 출력은 Eq. (7)과 같이 정의된다.

$$\mathbf{y}(k) \triangleq \mathbf{F}_r^H \mathbf{x}(k) \quad (7)$$

여기서 $\mathbf{F}_r^H = \mathbf{V}^H \mathbf{B}_{PM}^H$ 이고 $\mathbf{V} = \frac{1}{\sqrt{2M+1}} [\mathbf{v}(\alpha_M) \dots \mathbf{v}(\alpha_0) \dots \mathbf{v}(\alpha_M)]$ 이며, $\alpha_i = \frac{2\pi i}{2M+1}$, $i \in [-M, M]$ 이고, $\mathbf{v}(\phi) = [e^{jM\phi} \dots e^{j\phi} e^0 e^{-j\phi} \dots e^{-jM\phi}]$ 이다. AOA 그룹에 포함된 각 신호의 상세한 AOA 추정을 위한 Beamspace MUSIC 알고리즘의 공간스펙트럼은 Eq. (8)과 같이 정의된다.

$$P(\theta, \phi) \triangleq \frac{[\mathbf{F}_r^H \mathbf{a}(\theta, \phi)]^H [\mathbf{F}_r^H \mathbf{a}(\theta, \phi)]}{[\mathbf{F}_r^H \mathbf{a}(\theta, \phi)]^H \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H [\mathbf{F}_r^H \mathbf{a}(\theta, \phi)]} \quad (8)$$

여기서 $\mathbf{E}_N$ 은 빔공간 잡음 부공간 고유벡터 행렬로서, Eq. (7)의 공분산 행렬의 고유치 분해를 통해 계산되며, Eq. (8)의 피크 값에 대한 방위각 및 고도각이 신호의 상세 AOA 정보가 된다.

4. COMPUTER SIMULATION

본 장에서는 UCA 안테나 구조 기반의 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시한다. 시뮬레이션을 위해 배열 안테나의 반지름(배열 중심으로부터 n 번째 소자까지의 거리)은 0.5λ 로 가정하였고 Beamspace MUSIC 적용 시 $M=kr=\pi$ 조건을 만족시키기 위해 3으로 설정(M 은 정수) 하였으며, 사용된 안테나 요소의 개수는 $N>2M$ 조건을 고려해 8 개의 안테나 요소가 사용되었다 (Mathews & Zoltowski 1994). 시뮬레이션 시나리오는 다양한 신호를 가지는 다양한 경우를 고

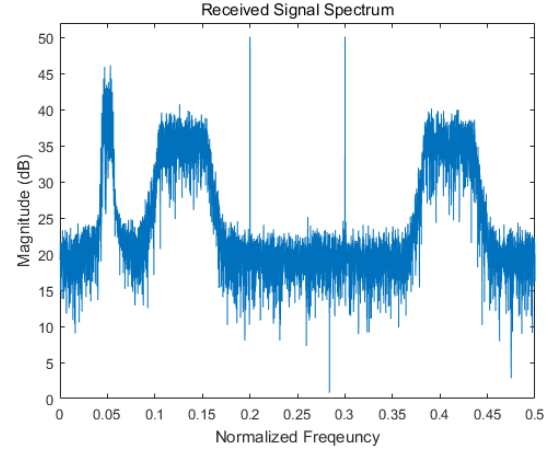


Fig. 3. The received signal spectrum of the first scenario.

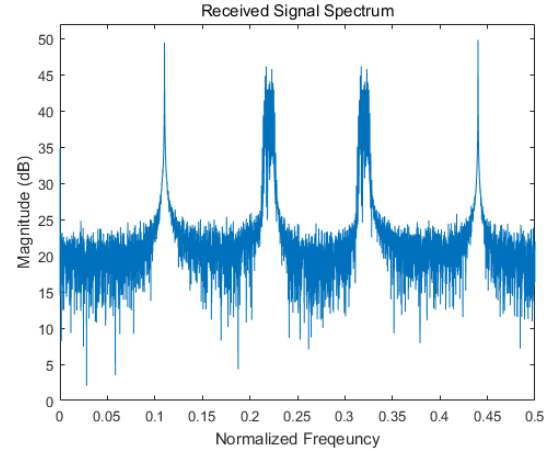


Fig. 4. The received signal spectrum of the second scenario.

려하기 위해 두 가지로 제시된다. 첫 번째 시나리오에서는 두 개의 Continuous Wave (CW) 신호, 한 개의 Frequency Modulation (FM) 신호, 두 개의 Wideband (WB) 신호를 포함해서, 총 다섯 개의 신호를 고려하였고, 두 번째 시나리오에서는 두 개의 Amplitude Modulation (AM) 신호와 두 개의 FM 신호를 포함해서, 총 네 개의 신호를 고려하였다. 첫 번째 시나리오는 인접하는 신호 두 개로 구성된 두 개의 신호 그룹과 비인접 신호 한 개를 고려하였고, 두 번째 시나리오는 인접하는 두 개로 구성된 두 개의 신호 그룹을 고려하였다. 각 신호의 신호-대-잡음비(signal-to-noise ratio)는 20 dB로 가정하였다. 시뮬레이션의 편의를 위해 각 시나리오를 구성하는 신호들의 고도각은 동일하다고 가정하였고, 시뮬레이션에 사용된 각 신호의 주요 매개변수는 Table 1과 Table 2에 정리 하였다. 첫 번째 시나리오에서 한 개의 CW 신호원과 FM 신호가 인접해 있고, 한 개의 CW 신호원과 한 개의 WB 신호원이 인접해 있다고 가정한다. 또한, 두 번째 시나리오에서는 두 개의 AM 신호원들이 인접해 있고, 두 개의 FM 신호원들이 인접해 있다고 가정한다. CAPON 알고리즘의 해상도는 1° , Beamspace MUSIC 알고리즘의 해상도는 0.01° 의 값을 적용하였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 각 시나리오에 대한 수신신호 스펙트럼을 나

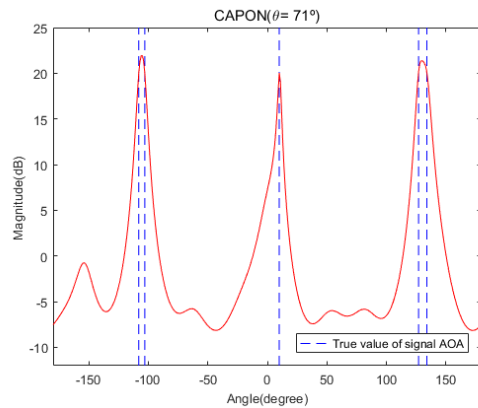


Fig. 5. CAPON spatial spectrum of the first scenario.

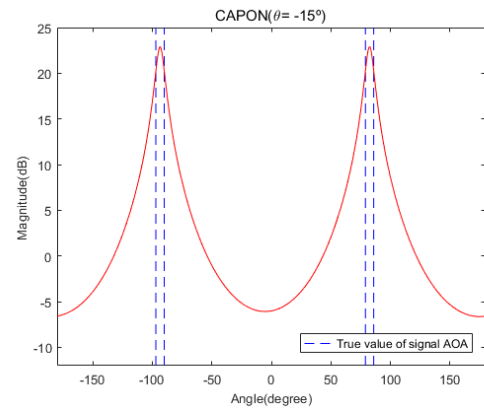


Fig. 7. CAPON spatial spectrum of the second scenario.

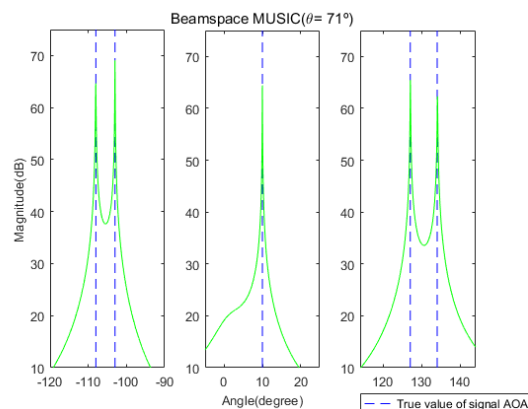


Fig. 6. Beamspace MUSIC spatial spectrum of the first scenario.

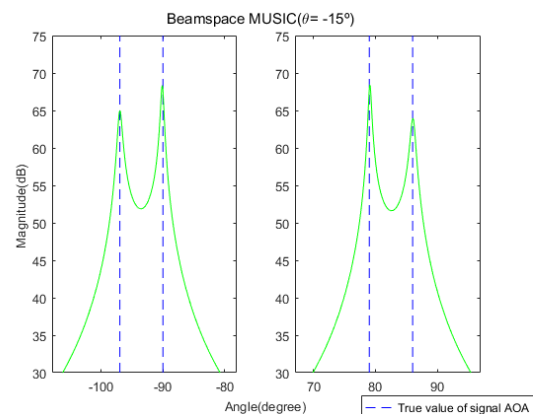


Fig. 8. Beamspace MUSIC spatial spectrum of the second scenario.

타낸다. 그림들로부터 각 시나리오의 안테나 입사 신호들을 확인할 수 있다. Fig. 5와 Fig. 6은 첫 번째 시나리오의 UCA 기반 CAPON과 Beamspace MUSIC의 공간 스펙트럼을 보인다. Fig. 5에서 CW와 FM 신호원들을 포함하는 AOA 그룹, CW와 WB 신호원들을 포함하는 AOA 그룹, 한 개의 WB 신호원을 포함하는 AOA 그룹을 포함하여, 총 세 개의 AOA 그룹들을 확인할 수 있다. Fig. 6에서는 첫 번째 시나리오의 각 AOA 그룹들에 포함되어 있는 신호원들의 상세 AOA에 대한 피크들을 확인할 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8은 두 번째 시나리오의 UCA 기반 CAPON과 Beamspace MUSIC의 공간 스펙트럼을 보인다. Fig. 7에서 두 개의 AM 신호원들을 포함하는 AOA 그룹, 두 개의 FM 신호원들을 포함하는 AOA 그룹을 포함하여, 총 두 개의 AOA 그룹들을 확인할 수 있다. Fig. 8에서는 두 번째 시나리오의 각 AOA 그룹들에 포함되어 있는 신호원들의 상세 AOA에 대한 피크들을 확인할 수 있다. Table 3과 Table 4는 제시된 UCA 기반 캐스케이드 AOA 추정기로 추정된 각 신호원들의 AOA 값들을 각 시나리오 별로 정리해 놓은 결과이다. 약간의 추정 오차는 보이지만, 제시된 UCA 기반 캐스케이드 추정기를 이용하여 인접한 신호들을 포함하여 모든 신호들의 AOA 정보가 효율적으로 추정되었음을 확인할 수 있다.

도래각 추정 알고리즘은 다양한 구조의 배열 안테나에 적용된다. 특히, 위성의 경우 많은 안테나 소자로 구성된 다양한 구조의 배열이 고려되어야 한다. 본 장에서는 캐스케이드 도래각 추정

Table 3. The estimated results for the first computer simulation scenario.

Signal	Original azimuth angle (ϕ°)	Estimation azimuth angle (ϕ°)
CW1	-103	-103.01
CW2	127	126.96
WB1	10	9.99
WB2	-108	-108
FM1	134	133.99

Table 4. The estimated results for the second computer simulation scenario.

Signal	Original azimuth angle (ϕ°)	Estimation azimuth angle (ϕ°)
AM1	79	79.12
AM2	86	85.85
FM1	-97	-97
FM2	-90	-89.98

알고리즘을 UCA 안테나에 적용하여 성능평가를 실시하였고, 그 결과 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘이 UCA 안테나 기반의 환경에서도 효율적인 성능을 보인다는 것을 확인하였다.

5. CONCLUSIONS

본 논문은 UCA 안테나 구조를 적용한 캐스케이드 AOA 추정기를 소개하였다. 캐스케이드 AOA 추정기의 CAPON은 다수개

의 신호들의 AOA를 포함한 AOA 그룹을 추정하고, Beam-space MUSIC은 추정된 AOA 그룹 안에 포함된 상세한 신호들의 AOA를 추정한다. 또한, UCA, 다수개의 입사 신호, 잡음을 포함한 UCA 기반 캐스케이드 AOA 추정기에 대한 수신 신호의 수학적 모델을 제시하여, 알고리즘 연구와 추정기의 성능 평가에 적용하였다. 성능평가를 위해 두 가지의 컴퓨터 시뮬레이션 시나리오를 고려하였고, 다양한 신호들을 시뮬레이션에 적용하였다. 각 시나리오들에 대해 제시된 UCA 안테나 기반 캐스케이드 AOA 추정기가 인접 신호들을 포함한 모든 신호들의 AOA를 효율적으로 추정하였음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENTS

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구임 (No. NRF-2018R1D1A1B07041644).

이 논문은 2019년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구되었습니다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, T. Kim and S. Hwang; methodology, T. Kim and S. Hwang; software, T. Kim; validation, T. Kim.; formal analysis, T. Kim; investigation, T. Kim and S. Hwang; writing—original draft preparation, T. Kim; writing—review and editing, S. Hwang; supervision; S. Hwang.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Cao, M.-Y., Huang, L., Qian, C., Xue, J.-Y., & So, H. C. 2015, Underdetermined DOA estimation of quasi-stationary signals via Khatri-Rao structure for uniform circular array, *Signal Processing*, 106, 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2014.06.012>
- Capon, J. 1969, High-resolution Frequency-wavenumber Spectrum Analysis. *Proceedings of the IEEE*, 57, 1408-1418. <https://doi.org/10.1109/PROC.1969.7278>
- Cho, S., Song, H., You, K.-J., & Shin, H.-C. 2017, A new direction-of-arrival estimation method using automotive radar sensor arrays, *international Journal of Distributed Sensor Networks*, 13, 1-12. <https://doi.org/10.1177/1550147717713628>
- Choi, K.-S., Kim, J.-P., Won, H.-K., Park, J.-H., & Kim, I.-G. 2011, Source Localization Technique for Radar Pulse Emission by Using Scanning Method of Interest Area, *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 39, 889-895. <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2011.39.9.889>
- Egger, N., Ball, J. E., & Rogers, J. 2017, Radar Angle of Arrival System Design Optimization Using a Genetic Algorithm, *Electronics*, 6, 1-26. <https://doi.org/10.3390/electronics6010024>
- Hwang, S., Kwon, G.-R., Pyun, J., & Shin, S. 2013, AOA Selection Algorithm for Multiple GPS Signals, in 2013 Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 3-6 Nov 2013, 481-485. <https://doi.org/10.1109/ACSSC.2013.6810323>
- Ioannides, P. & Balanis, C. A. 2005, Uniform circular arrays for smart antennas, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 47, 192-206. <https://doi.org/10.1109/MAP.2005.1589932>
- Kim, H.-C., Lee, C.-S., & Choi, J.-H. 2015, A Study on Real-Time Position Analysis and Wireless Transmission Technology for Effective Acquisition of Video Recording Information in UAV Video Surveillance, *Journal of Korea Multimedia Society*, 18, 1047-1057. <https://doi.org/10.9717/kmms.2015.18.9.1047>
- Kim, T. & Hwang, S. 2018, Cascade AOA Estimation Using Uniform Rectangular Array Antenna, *The Journal of the Korea institute of electronic communication sciences*, 13, 923-930. <https://doi.org/10.13067/JKIECS.2018.13.5.923>
- Lee, S., Park, Y.-J., & Kim, K.-H. 2006, Estimation of high resolution DOA using digital beamformer and beam-space MUSIC algorithm, In *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences*, Jeju Island, Korea, July 2006, pp.944-947.
- Liao, G. S., Liu, H. Q. & Li, J. 2006, A Subspace-based Robust Adaptive Capon Beamforming, *Progress In Electromagnetics Research Symposium*, Cambridge, USA, March 2006, pp.739-744.
- Lim, K., Lim, H., & Sin, C. S. 2018, Signal Source Localization Using Unmanned Aerial Vehicle with Antenna Array, *The Journal of Korea Institute of Communications and Information Sciences*, 43, 1911-1919. <https://doi.org/10.7840/kics.2018.43.11.1911>
- Mathews, C. P. & Zoltowski, M. D. 1994, Eigenstructure Techniques for 2-D Angle Estimation with Uniform Circular Arrays, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 42, 2395-2407. <https://doi.org/10.1109/78.317861>
- Sanudin, R. 2014, Planar Array Design and Analysis on Direction of Arrival Estimation for Mobile

Communication Systems, PhD Dissertation, Edinburgh University



Tae-yun Kim was born in Gwangju, Korea, and received the B.S. Degree in Mechatronic Engineering for Chosun University, Gwangju, Korea, in 2014 and the M.S. degree in Electronic Engineering from Chosun University, Gwangju, Korea, in 2016. Currently, he is working toward the Ph.D.

degree in Electronic Engineering at Chosun University, where, since March 2014, he has been employed as a teaching assistant or a graduate student researcher. His interests include adaptive signal processing and AOA estimation algorithms for satellite.



Suk-seung Hwang was born in Seoul, Korea, and received the B.S. degree in Control and Instrumentation Engineering from Kwang-Woon University, Seoul, in 1997, and the M.S. and Ph.D. degrees in Electrical and Computer Engineering from the University of California, Santa Barbara (UCSB), in 2001 and 2006, respectively.

At UCSB, his interests included adaptive signal processing applied to wireless communications, interference cancellation for GPS, and adaptive algorithms for an optical switch. He was a Teaching Assistant and a Graduate Student Researcher from 1999 to 2006. From 2006 to 2008, he was a Senior Engineer with the Telecommunication R&D Center, Samsung Electronics Company, Ltd., Suwon, Korea. At Samsung, his research interests included smart antennas and MIMO for channel estimation, and location-based service algorithms. From 2008 to 2014, he was with the Department of Mechatronics Engineering, and since 2014, he has been with the Department of Electronic Engineering, Chosun University, Gwangju, Korea, where he is currently a Professor. His current research interests include adaptive signal processing for wireless communications and interference suppression, location detection technology (LDT) based on GPS and non-GPS, and wireless communications for a tire-pressure monitoring system (TPMS).