

# Angle-of-Arrival Estimation Algorithm Based on Combined Array Antenna

Tae-yun Kim<sup>1</sup>, Suk-seung Hwang<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

<sup>2</sup>Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, School of Electronic Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

## ABSTRACT

The Angle-of-Arrival (AOA) estimation in real time is one of core technologies for the real-time tracking system, such as a radar or a satellite. Although AOA estimation algorithms for various antenna types have been studied, most of them are for the single-shaped array antenna suitable to the specific frequency. In this paper, we propose the cascade AOA estimation algorithm for the combined array antenna with Uniform Rectangular Frame Array (URFA) and Uniform Circular Array (UCA), with the excellent performance for various frequencies. The proposed technique is consisted of Capon for roughly finding AOA groups with multiple signal AOAs and Beamspace Multiple Signal Classification (MUSIC) for estimating the detailed signal AOA in the AOA group, for the combined array antenna. In addition, we provide computer simulation results for verifying the estimation performance of the proposed algorithm.

**Keywords:** AOA estimation, cascade estimation, combined array antenna, Capon, Beamspace MUSIC

## 1. INTRODUCTION

빠르고 정확한 신호의 도래각(Angle-of-Arrival; AOA) 추정 기술은 레이더 및 위성과 같이 실시간으로 특정 타겟의 위치를 파악하거나 추적해야 하는 시스템에서 매우 중요한 기술 중 하나이며, 이를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다 (AI-Sadoon et al. 2018, Pan & Jiang 2020). 도래각 추정을 위해 다양한 형태의 배열 안테나가 고려될 수 있으며, 안테나 형상에 따라 도래각 추정 성능이 달라질 수 있다. Shirvani-Moghaddam & Akbari (2011)에서 저자는 Proposed Array (PA)라 불리는 변형된 Uniform Linear Array (ULA)를 제안하여 Multiple Signal Classification (MUSIC) 과 Minimum Variance Distribution Response (MVDR)에 적용하였고, L-shape 및 V-shape 배열 안테나와 도래각 추정 성능을 비교하였다. Hajian, Coman, & Lighthart (2006)에서는 균일 원형 배

열, 균일 및 비균일 Y배열에 대해 MUSIC 알고리즘의 도래각 추정 성능을 비교하였다. 상기 선행연구의 컴퓨터 시뮬레이션 결과로부터 안테나 형상에 따라 도래각 추정 성능이 달라짐을 확인할 수 있다. 이 밖에도, 단일 형상의 배열 안테나를 이용하여 신호의 도래각을 추정하는 다양한 연구들이 진행되고 있지만, 단일 형상 배열 안테나를 이용하는 경우 특정 신호에 대한 추정은 가능하지만, 다양한 특성을 가지는 신호들이 혼합된 수신신호에 대한 도래각 추정은 쉽지 않다.

본 논문에서는 단일 배열(ULA, Uniform Planer Array; UPA)을 이용하여 도래각을 추정하는 기술과는 다르게, 등간격 사각 프레임 배열(URFA)과 등간격 원형 배열(UCA)로 구성된 혼합 배열 안테나 (Combined Array Antenna; CAA) 기반의 효율적인 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘을 제안한다. 제안된 캐스케이드 알고리즘은 혼합 배열 안테나에 적합한 Capon과 Beamspace MUSIC 알고리즘으로 구성되어 있다. Capon으로 다수개의 신호 도래각들이 포함되어 있는 도래각 그룹들을 대략적으로 찾고, Beamspace MUSIC을 이용하여 각 도래각 그룹들 안에 포함되어 있는 상세한 신호 도래각들을 추정한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 혼합 배열 안테나 모델과 수신신호 모델을 제시하고, 3장에서는 혼합 배열 안테나가 적용된 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘을 소개한다. 4장에서

Received May 12, 2021 Revised May 28, 2021 Accepted May 31, 2021

<sup>†</sup>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>

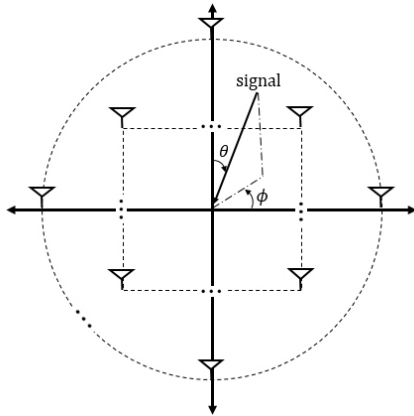


Fig. 1. Geometry of combined array antenna.

는 제안된 도래각 추정 알고리즘의 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션을 제시하고 결과를 분석한다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## 2. RECEIVED SIGNAL MODEL

### 2.1 혼합 배열 안테나 모델

본 논문은 다양한 주파수 대역을 활용하기 위해 Fig. 1의 구조를 가지는 혼합 배열 안테나 구조를 채택한다. 제시된 안테나의 내측 배열은 높은 주파수 대역에 적합한 정사각배열의 테두리에  $M_R (M_R = 2((R_x - 1) + (R_y - 1)))$ 개의 안테나 요소가 배치된 URFA (Haardt et al. 1995, Morris & Wong 2019)을 고려하였고, 안테나 외측 배열은 낮은 주파수 대역에 적합한  $M_C$ 개의 안테나 요소로 구성된 UCA를 고려하여, 총  $M (M = M_R + M_C)$ 개의 안테나 요소로 구성된다. 제시된 혼합 배열 안테나는 URFA와 UCA 안테나의 장점을 모두 활용할 수 있다.

### 2.2 수신신호모델

Fig. 1의 혼합 배열 안테나에 잡음이 포함된  $L$ 개의 신호들이 입사된다고 가정하면, 샘플(sample) 인덱스  $k$ 에 대한 수신신호 모델은 Eq. (1)과 같이 정의된다.

$$\mathbf{x}(k) \triangleq \mathbf{A}\mathbf{s}(k) + \mathbf{n}(k) \tag{1}$$

여기서  $\mathbf{x}(k)$ 는  $M \times 1$  크기의 신호와 잡음으로 이루어진 수신신호 벡터이고,  $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1 \ \mathbf{a}_2 \ \dots \ \mathbf{a}_L]$ 는  $M \times L$  크기를 갖는 배열 응답 행렬이며,  $\mathbf{s}(k)$ 는  $L \times 1$  크기의 신호벡터를 나타내고,  $\mathbf{n}(k)$ 는 크기  $M \times 1$ 의 independent and identically distributed (i.i.d) 특성을 갖는 잡음 벡터이다. 배열 응답 행렬(A)의 각 열(column)은 각 신호의 수신신호 벡터를 의미하고 Eq. (2)와 같이 정의된다 (Kim & Hwang 2021).

$$\mathbf{a}_l = [\mathbf{a}_{Rl} \ \mathbf{a}_{Cl}]^T \tag{2}$$

Eq. (2)에서  $\mathbf{a}_{Rl}$ 은  $l$ 번째 신호에 대한 URFA 조향벡터를 나타내며, Eq. (3)과 같이 정의된다.

$$\mathbf{a}_{Rl} = [\mathbf{a}_{1l} \ \mathbf{a}_{2l} \ \mathbf{a}_{3l} \ \mathbf{a}_{4l}]^T \tag{3}$$

Eq. (3)의 각 행은 Eqs. (4-7)과 같이 정의된다.

$$\mathbf{a}_{1l} = [1 \ e^{-jk d \mu_1} \ \dots \ e^{-jk d (R_x - 1) \mu_1}]^T \tag{4}$$

$$\mathbf{a}_{2l} = e^{-jk d (R_x - 1) \mu_1} [1 \ e^{-jk d \nu_1} \ \dots \ e^{-jk d (R_y - 2) \nu_1}]^T \tag{5}$$

$$\mathbf{a}_{3l} = e^{-jk d (R_y - 1) \nu_1} [e^{-jk d \mu_1} \ e^{-jk d 2 \mu_1} \ \dots \ e^{-jk d (R_x - 1) \mu_1}]^T \tag{6}$$

$$\mathbf{a}_{4l} = [e^{-k d \nu_1} \ e^{-k d 2 \nu_1} \ \dots \ e^{-k d (R_y - 1) \nu_1}]^T \tag{7}$$

Eqs. (4-7)에서  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 는 파상수를 의미하고,  $d$ 는 안테나 소자 간 간격을 나타내며,  $\mu_1 = \sin \theta_1 \cos \phi_1$ ,  $\nu_1 = \sin \theta_1 \sin \phi_1$ 로 각각 정의되며  $\theta_1$ 과  $\phi_1$ 은  $l$ 번째 신호에 대한 고도각과 방위각을 나타낸다. Eq. (2)에서  $\mathbf{a}_{Cl}$ 은  $l$ 번째 신호에 대한 UCA 조향벡터이며, Eq. (8)과 같이 정의된다.

$$\mathbf{a}_{Cl} = \begin{bmatrix} e^{-j\alpha \xi \sin \theta_1 \cos(\phi_1 - \zeta_0)} \\ e^{-j\alpha \xi \sin \theta_1 \cos(\phi_1 - \zeta_1)} \\ \vdots \\ e^{-j\alpha \xi \sin \theta_1 \cos(\phi_1 - \zeta_{C-1})} \end{bmatrix} \tag{8}$$

Eq. (8)에서  $\alpha$ 는 파상수를 의미하고  $\xi > \frac{(R-1)d}{2}$ 는 원형 배열의 반지름을 의미하며  $\zeta_c (c = 0 \ 1 \ \dots \ C-1)$ 는 원형 배열 안테나 요소의 인덱스를 나타낸다.

## 3. CASCADE AOA ESTIMATION ALGORITHM BASED ON COMBINED ARRAY ANTENNA

본 장에서는 혼합 배열 안테나 기반의 Capon과 Beamspace MUSIC으로 구성된 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘을 소개한다. 제안된 캐스케이드 알고리즘의 순서도는 Fig. 2에 나타나 있다. 전체 안테나 요소 중 일부를 활성화하여 Capon으로 대략적인 도래각 그룹들을 찾고, 전체 안테나 요소를 사용하여 Beamspace MUSIC으로 도래각 그룹에 포함된 개별 신호의 상세한 도래각을 추정한다.

### 3.1 도래각 그룹 파악을 위한 Capon 알고리즘

본 논문에서는 혼합 배열 안테나 중 UCA를 통해 수신된 신호를 기반으로 Capon 알고리즘이 도래각 그룹을 찾는다. 본 논문에서 Capon의 역할은 도래각 그룹들을 대략적으로 추정하는 것으로, 전체 요소들 중 일부 요소들만 사용하여도 무방하다. 즉, CAA의 요소들 중 URFA나 UCA 요소들 어떤 것을 사용해도 상관없지만, 본 논문에서는 UCA를 사용하여 도래각 그룹을 추정한다고

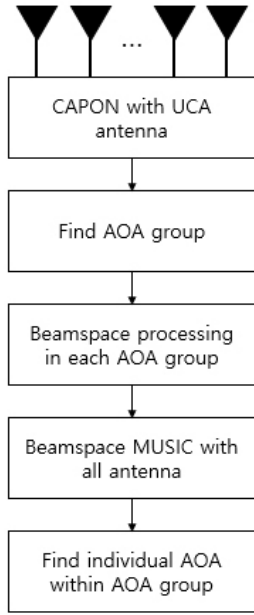


Fig. 2. Flow-chart of the proposed cascade AOA estimation algorithm.

가정한다. 외측 UCA를 기반으로 광범위한 도래각 그룹을 탐색하기 위한 Capon 알고리즘의 공간스펙트럼은 Eq. (9)와 같이 정의된다 (Krim & Viberg 1996).

$$P_{\text{CAPON}} = \frac{1}{\mathbf{a}(\theta, \phi)^H \mathbf{R}_c^{-1} \mathbf{a}(\theta, \phi)} \quad (9)$$

Eq. (9)에서  $\mathbf{a}(\theta, \phi)$ 는 특정 입사각에 대한 원형 배열 응답벡터이고,  $\mathbf{R}_c = E[\mathbf{x}_c(k)\mathbf{x}_c^H(k)]$ 는 외측 UCA를 통해 수신된 신호  $\mathbf{x}_c(k)$ 의 공분산 행렬이며,  $(\cdot)^H$ 는 켈레 전치를 나타낸다. Eq. (9)의 스펙트럼을 통해 계산되는 피크값에 해당하는 각도들이 다수개의 신호 도래각들을 포함하는 도래각 그룹이 된다. 각 도래각 그룹들의 구간은 특정 임계값을 기준으로 정해진다.

### 3.2 개별 신호 도래각 추정을 위한 Beamspace MUSIC 알고리즘

본 장에서는 Capon을 통해 파악된 도래각 그룹 내에 포함된 개별 신호의 도래각을 상세히 추정하기 위한 Beamspace MUSIC 알고리즘을 소개한다. 제시된 방법은 도래각 추정을 위해 전체 각도를 검색하지 않고, 파악된 도래각 그룹들만 검색하므로 계산 복잡도를 상당히 낮출 수 있다.

혼합 배열 안테나의 요소공간(Element space)을 빔공간(Beamspace)으로 변환하기 위한 빔공간 변환행렬  $\mathbf{B}$ 는 Eq. (10)과 같이 정의된다.

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_R & \mathbf{0}_{br \times M_C} \\ \mathbf{0}_{bc \times M_R} & \mathbf{B}_C \end{bmatrix} \quad (10)$$

Eq. (10)에서 영행렬의 하첨자  $br$ 과  $bc$ 는 URFA와 UCA 빔공간 차원을 나타내고,  $\mathbf{B}_R$ 와  $\mathbf{B}_C$ 는 각각  $br \times M_R$  크기의 URFA와  $bc \times M_C$  크기의 UCA의 빔공간 변환 행렬을 나타내며 Eqs. (11)과 (12) 같이 정의된다.

$$\mathbf{B}_R = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_2 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_4 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Eq. (11)에서  $\mathbf{B}_1$ 과  $\mathbf{B}_3$ 는 각각 URFA 안테나의  $x$ 축 아래쪽과 위쪽 안테나 요소에 해당하는 1차원 DFT 빔공간 변환 행렬이고,  $\mathbf{B}_2$ 와  $\mathbf{B}_4$ 는 각각 URFA 안테나의  $y$ 축 오른쪽과 왼쪽 안테나 요소에 해당하는 1차원 DFT 빔공간 변환 행렬이다 (Van Tress 2004).

$$\mathbf{B}_C = \mathbf{W}^H \mathbf{C} \mathbf{P}^H \quad (12)$$

Eq. (12)에서  $\mathbf{W}$ 는 가중치 행렬,  $\mathbf{C}$ 는 스케일 대각행렬,  $\mathbf{P}$ 는 페이즈 모드 행렬을 나타낸다 (Belloni & Koivunen 2006). 빔공간으로 변환된 수신신호를 기반으로 특정 도래각 그룹에 포함된 개별 신호의 도래각을 찾기 위한 Beamspace MUSIC 알고리즘의 공간스펙트럼은 Eq. (13)과 같이 정의된다 (Yuri & Ilia 2015).

$$P_{\text{Beamspace MUSIC}} = \frac{1}{[\mathbf{B}\mathbf{a}(\theta, \phi)]^H \mathbf{E}_{BN} \mathbf{E}_{BN}^H [\mathbf{B}\mathbf{a}(\theta, \phi)]} \quad (13)$$

Eq. (13)에서  $\mathbf{E}_{BN}$ 은 빔공간 잡음 부공간 고유벡터 행렬을 의미하며,  $\mathbf{R}_B = E[\mathbf{B}\mathbf{x}(k)\mathbf{x}^H(k)\mathbf{B}^H]$ 의 고유치 분해를 통해 계산된다. Eq. (13)의 스펙트럼의 피크들을 이용하여 해당 도래각 그룹 내의 도래각을 추정한다.

이와 같은 과정을 파악된 모든 도래각 그룹에 대하여 실행하여, 모든 개별 신호들의 상세한 도래각을 추정한다. 본 논문에서 제시된 방법은 모든 각도를 검색하지 않고, 파악된 도래각 그룹에 해당하는 각도만 검색하므로, 모든 각도를 검색하는 MUSIC과 같은 일반적인 도래각 추정 알고리즘에 비해 매우 효율적이다.

## 4. COMPUTER SIMULATION

본 장에서는 제안된 혼합 배열 안테나 기반의 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘의 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시한다. 시뮬레이션을 위해 2가지 시나리오가 고려되었고, 각 시나리오는 다음과 같다.

- 1개의 도래각 그룹: 3개의 신호 사용(Amplitude Modulation (AM), Continuous Wave (CW), Frequency Modulation (FM))
- 3개의 도래각 그룹: 4개의 신호 사용(1개의 AW신호, 1개의 FM신호, 2개의 Wideband (WB) 잡음 신호)

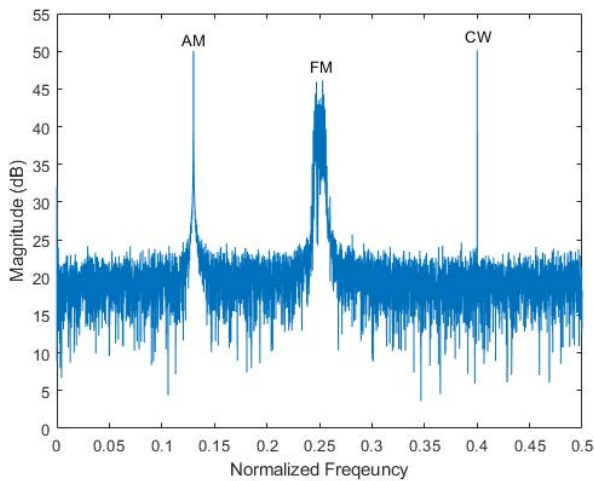
시나리오 1과 2에서 사용된 신호들은 Mun & Hwang (2017)에서 제안한 신호 모델을 사용하였으며, 각 신호의 신호 대 잡음비 (Signal-to-Noise-Ratio)는 20 dB로 가정하였다. 사용된 안테나 요소는 28(12요소 URFA + 16요소 UCA)개로 설정하였고, 신호 모델링을 위한 매개변수 들은 Tables 1과 2에 요약되어 있다. Capon 알고리즘의 검색 해상도는 빠른 검색을 위해 1도로 설정하였고 도래각 그룹 결정을 위한 스펙트럼 임계치는 10 dB로 설

**Table 1.** The first computer simulation scenario.

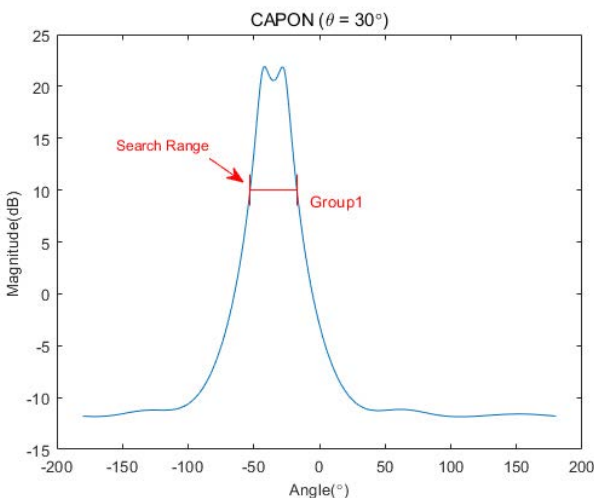
Signal	Elevation ( $\theta^\circ$ )	Azimuth ( $\phi^\circ$ )	Center frequency	Modulation index	Normalized modulation frequency
AM	30	-45	0.12	-	-
CW	30	-35	0.40	-	-
FM	30	-25	0.25	0.08	0.01

**Table 2.** The second computer simulation scenario.

Signal	Elevation ( $\theta^\circ$ )	Azimuth ( $\phi^\circ$ )	Center frequency	Modulation index	Normalized modulation frequency
AM	-75	-75	0.11	0.03	-
FM	-75	15	0.44	0.08	0.01
WB1	-75	-69	0.22	-	-
WB2	-75	80	0.32	-	-

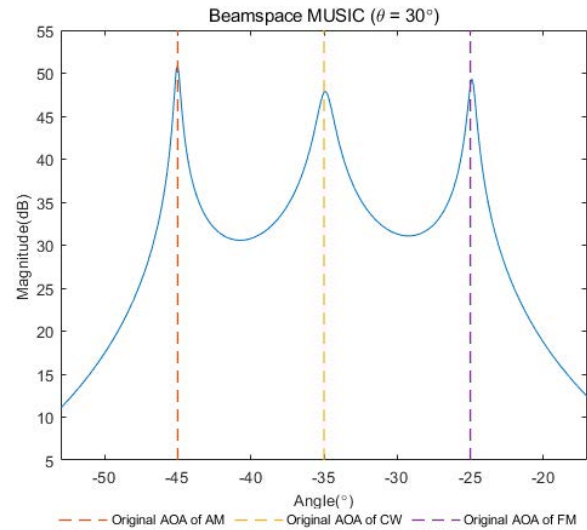


**Fig. 3.** Received signal spectrum of the first scenario.

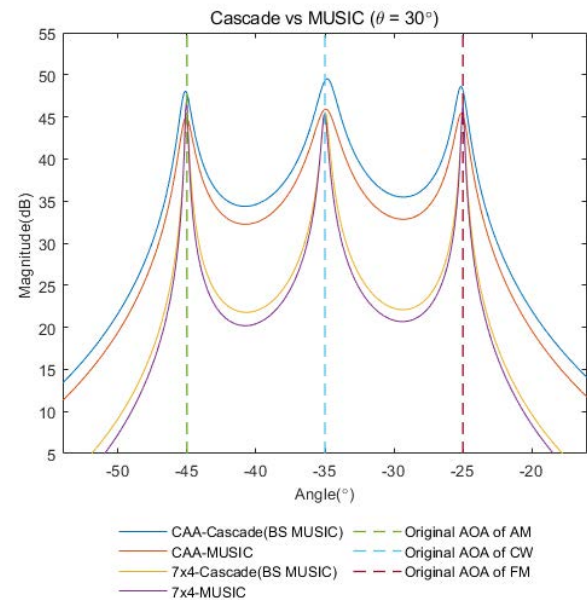


**Fig. 4.** The UCA-Capon spatial spectrum of the first scenario.

정하였다. Beamspace MUSIC 알고리즘의 해상도는 세밀한 검색을 위해 0.1도로 설정하였다. Fig. 3은 시나리오 1에 대한 수신 신호 스펙트럼으로 3개의 신호를 확인할 수 있다. Fig. 4는 첫 번



**Fig. 5.** The CAA-Beamspace MUSIC spatial spectrum of the first scenario.



**Fig. 6.** The comparison of cascade algorithm and MUSIC algorithm based on 7x4 array antenna and CAA for first scenario.

째 시나리오에 대한 신호의 도래각 그룹을 찾기 위한 Capon 알고리즘의 공간 스펙트럼이며, 그림으로부터 -53도부터 -17도까지의 범위를 갖는 하나의 도래각 그룹을 확인할 수 있다. Fig. 5는 Capon의 제 1도래각 그룹 내 개별 신호의 상세 도래각을 찾기 위한 Beamspace MUSIC의 공간스펙트럼이다. 그림으로부터 도래각 그룹에 포함된 세 개 신호의 도래각에서 피크값이 나타남을 확인할 수 있다. Fig. 6은 도래각 추정 성능 비교를 위해 다수개의 URFA로 구성된 7x4 Uniform Rectangular Array (URA) 안테나와 CAA가 적용된 기존의 MUSIC 알고리즘과 제안된 알고리즘의 Beamspace MUSIC 알고리즘 공간 스펙트럼을 나타낸 것이다. Fig. 7은 시나리오 2에 대한 수신신호 스펙트럼으로 4개의 신호를 확인할 수 있다. Fig. 8은 시나리오 2에 해당하는 Capon 알고리즘

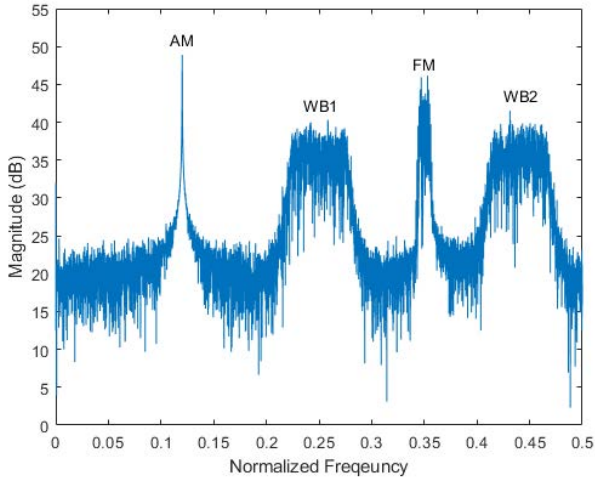


Fig. 7. Received signal spectrum of the second scenario.

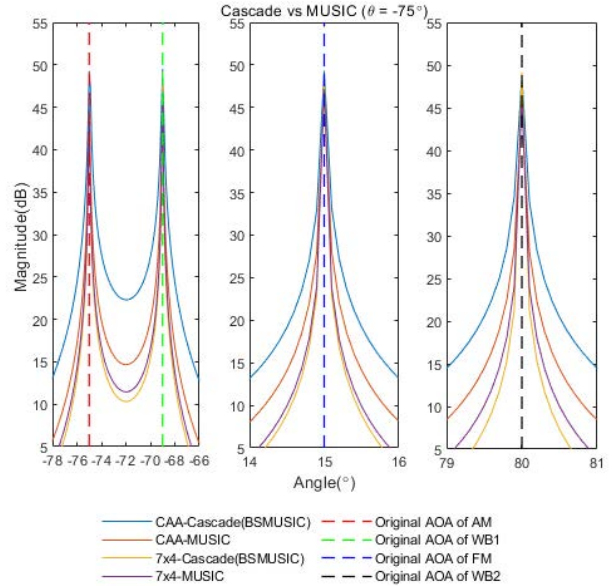


Fig. 10. The comparison of cascade algorithm and MUSIC algorithm based on 7x4 array antenna and CAA for second scenario.

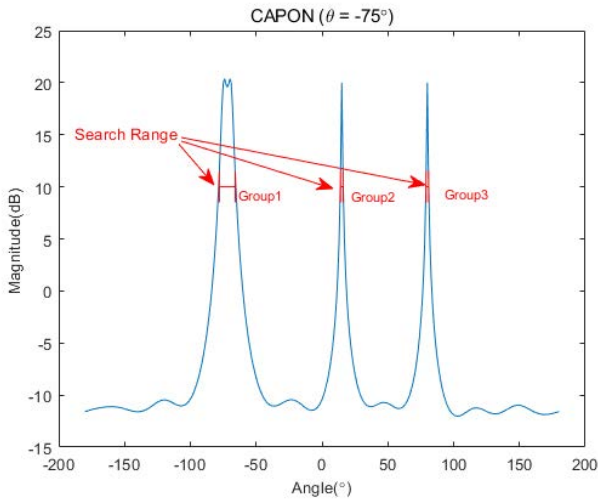


Fig. 8. The UCA-Capon spatial spectrum of the second scenario.

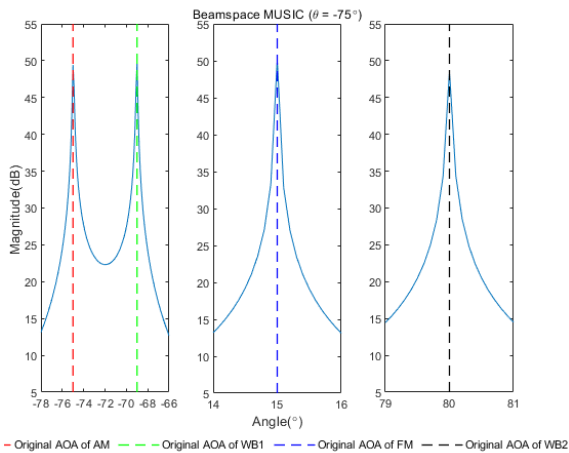


Fig. 9. The CAA-Beamspace MUSIC spatial spectrum of the second scenario.

의 공간 스펙트럼이며, 그림으로부터 3개의 도래각 그룹을 확인할 수 있으며, 제 1도래각 그룹은 -78도부터 -66도까지의 범위를 갖고, 제 2도래각 그룹은 14도에서 16도까지의 범위를 갖고, 제 3도래각 그룹은 79에서 81도의 범위를 갖는다. Fig. 9는 각 도래각 그룹 내 개별 신호의 도래각을 찾기 위한 Beamspace MUSIC의 공간스펙트럼이다. 제 1도래각 범위에서 AM 신호와 WB1 신호의 도래각에서 피크값을 갖음을 확인할 수 있으며, 제 2도래각 범위에서 FM 신호의 도래각에서 피크값을 갖으며, 제 3도래각 범위에서 WB2 신호의 도래각에서 피크값을 갖음을 확인할 수 있다. Fig. 10은 시나리오 2에 대한 도래각 추정 성능 비교를 위해, 7x4 URA 안테나와 CAA가 적용된 기존의 MUSIC 알고리즘과 제안된 알고리즘의 Beamspace MUSIC 알고리즘의 공간 스펙트럼을 나타낸 것이다. Figs. 6과 10을 통해 CAA 안테나를 적용한 경우, 제안된 캐스케이드 알고리즘이 기존 MUSIC 알고리즘과 유사한 도래각 추정 성능을 갖는다는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 본 논문에서 제시된 CAA 안테나는 URA와 다르게, URFA와 UCA의 특성을 모두 가지고 있어 다양한 신호들의 도래각을 추정하는데 보다 효율적이다. 또한, MUSIC 알고리즘은 모든 각도에 대하여 정밀한 해상도를 가지고 검색을 하여야 하지만, 제안된 알고리즘은 특정 구간에서만 정밀한 해상도를 가지고 검색을 하면 되므로, 계산 복잡도 면에서 월등히 우수하다고 할 수 있다.

### 5. CONCLUSIONS

본 논문은 URFA와 UCA가 동일 평면상에 위치하는 혼합 배열 안테나를 적용한 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 다수개의 신호 도래각을 포함한 도래각 그룹을 대략적으로 찾기 위한 Capon, 파악된 도래각 그룹 안에 존재하는 신호의 도래각을 상세하게 추정하기 위한 Beamspace

MUSIC으로 구성되어 있다. Capon 은 전체 안테나 요소 중 UCA 배열 요소만 사용하였고, BeamSpace MUSIC은 정밀한 도래각 추정을 위해 전체 안테나 요소를 사용하였다. BeamSpace MUSIC은 높은 해상도를 가지고 특정한 구간만 검색하므로, 높은 해상도를 가지고 전체 구간을 검색하는 기존의 도래각 추정 알고리즘보다 월등히 낮은 계산 복잡도를 갖는다. 또한, 제안된 알고리즘은 혼합 배열 안테나를 기반으로 하여, 다양한 주파수 대역의 신호들의 도래각을 동시에 추정하는데 효율적인 장점을 갖는다.

## ACKNOWLEDGMENTS

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

이 논문은 2020년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

## 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

- AI-Sadoon, M. A. G., Asif, R., Bin-Melha, M. S., Obeidat, H., Zweid, A., et al. 2018, Low Complexity Antenna Array DOA System for Localization Applications, 2018 6th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM) Marrakesh, Morocco, 16-19 Oct. 2018
- Belloni, F. & Koivunen V. 2006, BeamSpace transform for UCA: error analysis and bias reduction IEEE Transactions on Signal Processing, 54, 3078–3089. <https://doi.org/10.1109/TSP.2006.877664>
- Haardt, M., Zoltowski, M. D., Mathwes, C. P., & Nossék, J. 1995, 2D unitary ESPRIT for efficient 2D parameter estimation, 1995 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing Detroit, MI, USA 9-12 May 1995
- Hajian, M., Coman, C., & Ligthart, L. P. 2006, Comparison of circular, Uniform- and non Uniform Y-Shaped Array Antenna for DOA Estimation using Music Algorithm, 2006 European Conference on Wireless Technology, Manchester, UK, 10-12 Sept. 2006
- Kim, T.-Y. & Hwang, S.-S. 2021, Adaptive Beamforming System Based on Combined Array Antenna, The Journal of the Korea institute of electronic communication sciences, 16, 9-18. <https://doi.org/10.13067/JKIECS.2021.16.1.9>
- Krim, H. & Viberg, M. 1996, Two decades of array signal processing research: the parametric approach, IEEE signal processing magazine, 13, 67-94. <https://doi.org/10.1109/79.526899>
- Morris, Z. N. & Wong, K. T. 2019, Comparing the “Rim” Versus the “Filled” Rectangular Array Grids—Their Direction-Finding Cramér-Rao Bounds, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 55, 1945-1956. <https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2879555>
- Mun, J.-Y. & Hwang, S.-S. 2017, Input Signal Model Analysis for Adaptive Beamformer, The Journal of the Korea institute of electronic communication sciences, 12, 433-438. <https://doi.org/10.13067/JKIECS.2017.12.3.433>
- Pan, J. & Jiang, F. 2020, Low Complexity BeamSpace Super Resolution for DOA Estimation of Linear Array, Sensors, 20, 1-19. <https://doi.org/10.3390/s20082222>
- Shirvani-Moghaddam, S. & Akbari, F. 2011, A novel ULA-based geometry for improving AOA estimation, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 39, 1-11. <https://doi.org/10.1186/1687-6180-2011-39>
- Van Trees, H. L. 2004, Optimum array processing: Part IV of detection, estimation, and modulation theory (New York: John Wiley & Sons)
- Yuri, N. & Ilia, P. 2015, Performance study of beamSpace processing DOA estimation by MUSIC and Capon methods, 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) Omsk, Russia, 1-6, July 2015



**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 2016, 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, 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).