Computational Complexity Analysis of Cascade AOA Estimation Algorithm Based on FMCCA Antenna

Tae-yun Kim¹, Suk-seung Hwang^{2†}

¹Institute of AI Convergence, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

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

ABSTRACT

In the next generation wireless communication system, the beamforming technique based on a massive antenna is one of core technologies for transmitting and receiving huge amounts of data, efficiently and accurately. For highly performed and highly reliable beamforming, it is required to accurately estimate the Angle of Arrival (AOA) for the desired signal incident to an antenna. Employing the massive antenna with a large number of elements, although the accuracy of the AOA estimation is enhanced, its computational complexity is dramatically increased so much that real-time communication is difficult. In order to improve this problem, AOA estimation algorithms based on the massive antenna with the low computational complexity have been actively studied. In this paper, we compute and analyze the computational complexity of the cascade AOA estimation algorithm based on the Flexible Massive Concentric Circular Array (FMCCA). In addition, its computational complexity is compared to conventional AOA estimation techniques such as the Multiple Signal Classification (MUSIC) algorithm with the high resolution and the Only Beamspace MUSIC (OBM) algorithm.

Keywords: AOA estimation, cascade estimation, flexible massive concentric circular array antenna, computational complexity

1. INTRODUCTION

5G New Radio (NR), 더 나아가 Beyond 5G와 같은 mmWave 를 이용하는 차세대 무선통신에서 4K/8K Ultra High Definition (UHD) 영상, Virtual/Augmented Reality (VR/AR), 레벨 3 이상 의 자율주행, 최첨단 Internet of Things (IoT) 센서의 고용량 데 이터 전송을 위해 Uniform Circular Array (UCA) 안테나를 이 용한 Orbital Angular Momentum (OAM) 기술이 대두되고 있 다 (Jung et al. 2019). 또한, 고용량 데이터의 효율적 전송을 위해 Massive Concentric Circular Array (MCCA) 안테나를 적용하여 OAM모드를 생성하는 연구도 활발히 진행중이다 (Cheng et al.

Received May 28, 2022 Revised Jun 05, 2022 Accepted Jun 09, 2022 [†]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

2017), Chen et al. 2018, Saito et al. 2019). UCA 안테나를 기반으 로 한 OAM 기술 연구로 mmWave를 이용한 통신 시스템의 데이 터 전송 속도는 획기적으로 증가시킬 수 있지만, 높은 주파수를 사용하는 만큼 단말 간 통신 거리는 짧아질 수밖에 없다 (Shaikh & Kaur 2019). 이러한 문제 해결을 위해, mmWave 무선통신은 빔 형성 기술이 필수적이며 (Ahmed et al. 2018), 고신뢰/고정밀의 빔형성 기술을 위해 신호원의 정확한 도래각 (Angle of Arrival, AOA) 정보가 파악되어야 한다.

신호원의 도래각은 배열 안테나를 이용한 다양한 도래각 추정 알고리즘을 통해 계산될 수 있으며 (Famoriji & Shongwe 2022), 다수의 안테나 요소를 사용하는 Massive Array (MA) 안테나를 이용하는 경우 추정 정확도를 월등히 높일 수 있다. 하지만, 이 경 우 일반적인 도래각 추정 알고리즘의 계산 복잡도는 실시간 추정 이 어려울 정도로 현격히 높아지게 된다. 최근, MA 안테나 기반 의 도래각 추정 알고리즘의 문제인 높은 복잡도를 해결하기 위해 다양한 연구가 진행되었다 (Yang et al. 2014, Cao et al. 2017, Al-Sadoon et al. 2017, Kim & Hwang 2020).

본 논문은 고분해능의 Multiple Signal Classification (MUSIC)



Fig. 1. Structure of FMCCA antenna with antenna element On/Off function.

알고리즘과 유사한 성능을 보유한, 최근 제안된 Flexible Massive Concentric Circular Array (FMCCA) 안테나 기반의 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘 (Kim & Hwang 2021)의 복잡도를 수학적으 로 분석하고, 기존의 알고리즘과 비교한다. 이를 위해, MCCA 안 테나 기반 MUSIC 알고리즘 (Akkar et al. 2010), MCCA 안테나 기반 Only Beamspace MUSIC (OBM) 알고리즘 (Chan & Chen 2006)을 고려하였으며, 도래각 추정을 위한 각 알고리즘의 매개 변수 및 공간스펙트럼의 복잡도를 수학적으로 모델링 하여 컴퓨 터 시뮬레이션에 적용하고, 최종 복잡도를 비고/분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 논문에서 고려한 FMCCA 안테나 구조와 수신신호 모델을 포함한 데이터 모델을 제시하고, 3장에서는 Kim & Hwang (2021)에서 제안한 캐스케이 드 알고리즘을 간략히 소개한다. 4장에서는 각 알고리즘의 계산 복잡도 비교를 위한 수학적 모델을 제시한다. 4장의 수학적 모델 을 기반으로 각 알고리즘의 계산복잡도 비교를 위한 컴퓨터 시뮬 레이션 결과를 5장에서 제공하고, 6장은 결론이다.

2. DATA MODEL

2.1 안테나 모델

FMCCA 안테나는 배열의 중심이 동일한 N개의 원형 배열 안 테나로 구성되며 그 구조는 Fig. 1과 같다. FMCCA 안테나는 원형 배열이 가지는 안테나 요소의 대칭성을 그대로 가지고 있어 빔폭 과 부엽의 변화 없이 전 방위각을 검색할 수 있는 장점이 있으며, Massive Rectangular Array (MRA) 안테나에 비해 더 작은 면적 에 동일한 안테나 요소를 사용할 수 있어 공간 제약이 있는 수신 기에 효율적으로 적용될 수 있다 (Mangoud et al. 2014, Hamdi et al. 2016).

본 논문에서 FMCCA의 'flexible'이 의미하는 것은 안테나의 각 요소가 On/Off 기능을 가지고 있다는 것을 뜻하는 것으로, 필요 에 따라 안테나 요소가 활성화될 수도 있고 비활성화 될 수도 있 는 기능을 말한다 (Kim & Hwang 2021). FMCCA 안테나는 안테 나 요소 On/Off 기능을 활용하여 상황에 따라 *n*번째 원형 배열의 일부 안테나 요소를 사용하거나, MCCA 안테나를 구성하는 전체 안테나 요소를 사용함으로써, MCCA 안테나의 장점을 유지하면 서 MA 안테나의 단점인 높은 복잡도 문제를 완화시킬 수 있다.



Fig. 2. Basic architecture of cascade AOA estimation algorithm based on FMCCA antenna.

여기서, MCCA 안테나는 FMCCA 안테나의 모든 안테나 요소가 활성화된 경우이다.

2.2 수신신호 모델

본 절에서는 FMCCA 안테나에 적용 가능한 수신신호의 수학 적 모델을 제시한다. 신호의 도래각을 추정하기 위해 수신단 안 테나에 $M = M_1 + M_2 + ... + M_N$ 개의 안테나 요소로 구성된 FMCCA 안테나가 적용되고, Additive White Gaussian Noise (AWGN)잡 음과 *L*개의 신호가 입사한다고 가정하면, 샘플 (sample) 인텍스 *k*에 대한 수신신호 벡터는 Eq. (1)과 같이 주어진다.

$$\mathbf{r}(k) = \mathbf{As}(k) + \mathbf{n}(k) \tag{1}$$

여기서 r(k)는 M×1 크기의 수신신호 벡터이고, A는 M×L 크기의 배열 응답 행렬, s(k)는 L×1 크기의 신호벡터이고, n(k)는 M×1 크 기의 AWGN 벡터이다. Eq. (1)에서 전체 안테나 요소를 고려한 배 열 응답 행렬의 각 열은 각 신호의 배열 응답 벡터를 나타내고, Eq. (2)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{1} & \mathbf{a}_{2} & \cdots & \mathbf{a}_{n} & \cdots & \mathbf{a}_{N} \end{bmatrix}^{T}$$
$$\mathbf{a}_{n-l} = \begin{bmatrix} e^{-j\alpha r_{n}\sin\theta_{l}\cos\phi_{l}} \\ e^{-j\alpha r_{n}\sin\theta_{l}\cos(\phi_{l}-2\pi/M_{n})} \\ \vdots \\ e^{-j\alpha r_{n}\sin\theta_{l}\cos(\phi_{l}-2\pi(M_{n}-1)/M_{n})} \end{bmatrix}$$
(2)

여기서 *a_{n-l}*은 *n*번째 원형 배열의 *l*번째 신호에 대한 배열 응답 벡 터, *α=2π/λ*는 파상수, *r_n*은 *n*번째 원형 배열의 반지름, *θ_i*과 *φ_l*은 *l* 번째 신호에 대한 고도각과 방위각, *M_n*은 *n*번째 원형 배열의 안 테나 개수를 나타낸다.

3. CASCADE ALGORITHM BASED ON FMCCA ANTENNA

Fig. 2의 FMCCA 안테나 기반 캐스케이드 도래각 추정 알고리 즘은 FMCCA 안테나, Capon 알고리즘, Beamspace MUSIC 알고 리즘으로 구성되어 있다.

3.1 Capon 알고리즘

캐스케이드 알고리즘의 첫 번째 단계인 Capon의 목적은 안테 나로 입사하는 신호들의 대략적인 도래각 그룹을 추정하는 것이 다. Capon은 대략적인 도래각 그룹을 계산하므로, 비교적 큰 스 텝 크기를 사용해도 무방하고, FMCCA 안테나 요소들 중 적은 수 의 안테나 요소만 활성화시킨다. 본 논문에서는 안테나 요소 활 성화에 대한 기준을 제시하지 않았지만, 현재 이와 관련된 연구 를 진행중에 있다.

도래각 그룹 추정을 위한 Capon 알고리즘의 공간스펙트럼은 Eq. (3)과 같이 정의된다.

$$P_{n^{th}-UCA} = \frac{1}{\mathbf{a}^{H}(\theta,\phi)_{n^{th}-UCA}} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta,\phi)_{n^{th}-UCA}$$
(3)

여기서 *a*(θ, φ),^{*-UCA}는 *n* 번째 원형 배열의 특정 고도각과 방위각 에 대한 배열 응답 벡터이고, **R** = *E*[**r**(*k*)**r**^{*H*}(*k*)]은 해당 수신신호 벡터의 공분산 행렬이다. Eq. (3)의 피크값을 도래각 그룹의 중심 각으로 추정하고, 특정 임계값 설정을 통해 도래각 그룹의 범위 를 결정한다.

3.2 Beamspace MUSIC 알고리즘

캐스케이드 알고리즘의 두 번째 단계인 Beamspace MUSIC의 목적은 Capon으로 추정한 신호 도래각 그룹에 포함된 신호들의 세부 도래각을 찾는 것이다. 이때, 세부 도래각 계산을 위한 검색 범위는 Capon으로 추정된 신호 도래각 그룹의 범위로 한정하고, FMCCA 안테나의 모든 안테나 요소를 활성화하고, 정밀한 스텝 크기를 적용하여 세밀한 도래각 탐색을 수행한다. 세부 도래각을 추정하기 위한 Beamspace MUSIC 알고리즘의 공간스펙트럼은 Eq. (4)와 같이 정의된다.

$$P_{FMCCA} = \frac{1}{\left[\mathbf{Ba}(\theta,\phi)\right]^{H} \mathbf{\Pi}_{B}\left[\mathbf{Ba}(\theta,\phi)\right]}$$
(4)

여기서 B는 빔공간 변환 행렬이고, $a(\theta, \phi)$ 는 FMCCA 안테나에 대 한 고도각과 방위각 배열 응답 벡터이며, $\Pi_B = \mathbf{E}_{BN} \mathbf{E}_{BN}^H$, \mathbf{E}_N 은 빔공 간 잡음 부공간 고유벡터 행렬로 빔공간 공분산 행렬 ($\mathbf{R}_B = E[\mathbf{r}_B$ $(k)\mathbf{r}_B^H(k)]$)의 고유치 분해를 통해 계산될 수 있다. $\mathbf{r}_B(k) = \mathbf{Br}(k)$ 는 빔공간 출력이다. Eq. (4)의 피크값을 해당 그룹 내 존재하는 신호의 도래각으로 추정한다.

4. COMPUTATIONAL COMPLEXITY MATHEMATICAL MODEL

이번 장에서는 3장에서 소개한 FMCCA 안테나 기반의 캐스케 이드 알고리즘과 일반적인 MUSIC 알고리즘 및 OBM 알고리즘 의 계산 복잡도에 대한 수학적 모델을 제시한다. 이를 이용하여, 일반적인 도래각 추정 알고리즘과 FMCCA 안테나 기반의 캐스 케이드 알고리즘의 복잡도를 비교하고 분석한다.

 Table 1. FMCCA antenna based cascade algorithm computational complexity.

Indov	Operation		
muex	Additional/Subtraction	Multiply/Divide	
\mathbf{R}_{c}	$M_{C}^{2}(K-1)$	$M_C^2 K$	
\mathbf{R}_C^{-1}	$\frac{1}{3}M_{C}^{3} + \frac{1}{2}M_{C}^{2} - \frac{5}{6}M_{C}$	$\frac{1}{3}M_{C}^{3} + M_{C}^{2} + \frac{2}{3}M_{C}$	
$P_{c}(\theta,\phi)$	$M_{C}^{2} - 1$	$M_{C}^{2} + M_{C}$	
$\mathbf{Br}(k)$	BK(K-1)	BKM	
\mathbf{R}_{B}	$B^2(K-1)$	B^2K	
$EVD(\mathbf{R}_{B})$	$\frac{2}{3}B^3 + \frac{3}{2}B^2 - \frac{1}{2}B + 1$	$\frac{2}{3}B^3 - \frac{2}{3}B^2 - \frac{19}{6}B + 2$	
$\mathbf{a}_{\scriptscriptstyle B}(\theta,\phi)$	B(M-1)	BM	
$\Pi_{\scriptscriptstyle B}$	$B^2(B-L-1)$	$B^2(B-L)$	
$P_{\scriptscriptstyle B}(\theta,\phi)$	B^2-1	$B^2 + B$	

4.1 FMCCA 안테나 기반 캐스케이드 알고리즘 복잡도

FMCCA 안테나 기반의 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘 은 대략적인 도래각 그룹 추정을 위한 Capon과 도래각 그룹 내 에 포함된 신호들의 상세한 도래각 추정을 위한 Beamspace MUSIC 알고리즘으로 구성되어 있다. Capon 알고리즘을 통해 도 래각 그룹을 결정하기 위해 공분산 행렬 (R_c), 공분산 행렬의 역 행렬 (**R**^{c1}), 공간스펙트럼 (P_c(θ,φ))에 대한 계산이 필요하다. 또 한, Beamspace MUSIC 알고리즘을 통해 추정된 도래각 그룹 내 존재하는 세부 도래각 추정을 위해 빔공간 조향 벡터 $(\mathbf{a}_{\mathsf{R}}(\theta,\phi))$, 빔공간 공분산 행렬 (R_B), 빔공간 공분산 행렬의 고유치 분해 (EVD(R_c)), 잡음 부공간 행렬 (E_{BN})과 잡음 부공간 행렬의 켤레전 치 (\mathbf{E}_{BN}^{H}) 의 곱 $(\Pi_{B} = \mathbf{E}_{BN} \mathbf{E}_{BN}^{H})$, 공간스펙트럼 $(P_{B}(\theta, \phi))$ 에 대한 계 산이 필요하다. 각 항목에 대한 계산복잡도는 Table 1에 정리되어 있다. Table 1에서 Mc는 Capon 알고리즘 수행 시 사용된 안테나 요소의 개수이고, K는 총 샘플링 횟수, M은 안테나 요소의 차원 (총 안테나 요소의 개수), B는 빔공간 차원 (빔공간 변환 행렬의 열의 크기)을 나타낸다. Table 1과 각 알고리즘의 검색 범위 및 스 텝 크기를 고려한 FMCCA 안테나 기반 캐스케이드 알고리즘의 계산복잡도는 Eqs. (5)와 (6)으로 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Cascade}_{C,C} \left(\text{Add/Sub} \right) &= \frac{360^2}{\Delta_C^2} \left(M_C^2 - 1 \right) + \frac{1}{3} M_C^3 + \left(K - \frac{1}{2} \right) M_C^2 - \frac{5}{6} M_C \\ &+ \sum_{i=1}^G \left[\frac{SR_{B\theta_i} SR_{B\phi_i}}{\Delta_B^2} \left(B_i^2 + (M - 1) B_i \right) + \frac{5}{3} B_i^3 - \left(K - L_i - \frac{1}{2} \right) B_i^2 + \left(K \left(M - 1 \right) - \frac{1}{2} \right) B_i + 1 \right] \end{aligned}$$
(5)

$$Cascade_{c.c} (Mul/Div) = \frac{360^2}{\Delta_c^2} (M_c^2 + M_c) + \frac{1}{3} M_c^3 + (K+1) M_c^2 + \frac{2}{3} M_c$$
$$+ \sum_{i=1}^{G} \left[\frac{SR_{B\theta} SR_{B\phi}}{\Delta_B^2} (B_i^2 + (M+1) B_i) + \frac{5}{3} B_i^3 - (L_i + \frac{3}{2}) B_i^2 + (KM - \frac{19}{6}) B_i + 2 \right]$$
(6)

여기서 $SR_{B\theta_i}$ 와 $SR_{B\phi_i} 는 i$ 번째 도래각 그룹에 대한 Beamspace MUSIC 알고리즘의 고도각과 방위각에 대한 각각의 검색 범위를 나타내고, $\Delta_x(X=C, B)$ 는 Capon 알고리즘과 Beamspace MUSIC 알고리즘의 스텝 크기를 나타내며, G는 도래각 그룹의 개수이고,

 Table 2. MCCA antenna based MUSIC algorithm computational complexity.

Index	Operation		
muex	Additional/Subtraction	Multiply/Divide	
\mathbf{R}_{M}	$M^2(K-1)$	M^2K	
$EVD(\mathbf{R}_{M})$	$\frac{2}{3}M^3 + \frac{3}{2}M^2 - \frac{1}{2}M + 1$	$\frac{2}{3}M^3 - \frac{2}{3}M^2 - \frac{19}{6}M + 2$	
Π_M	$M^2(M-L-1)$	$M^2(M-L)$	
$P_{M}\left(heta,\phi ight)$	$M^2 - 1$	$M^2 + M$	

L_i는 i 번째 그룹에 존재하는 신호의 개수를 나타낸다.

4.2 MCCA 안테나 기반 MUSIC 알고리즘 복잡도

MUSIC 알고리즘은 신호의 도래각 추정을 위해 공분산 행렬 ($\mathbf{R}_{_M}$), 공분산 행렬의 고유치 분해 ($EVD(\mathbf{R}_{_M})$), 잡음 부공간 행렬 ($\mathbf{E}_{_N}$)과 잡음 부공간 행렬의 켤레전치 ($\mathbf{E}_{_N}^{_H}$ ENH) 의 곱 ($\mathbf{II}_{_M} = \mathbf{E}_{_N} \mathbf{E}_{_N}^{^H}$), 공간스펙트럼 ($P_{_M}(\theta, \phi)$)에 대한 계산이 필요하다. 각 항목에 대 한 계산복잡도는 Table 2에 요약되어 있다. Table 2와 스텝 크기 를 고려한 MCCA 안테나 기반 MUSIC 알고리즘의 계산복잡도는 Eqs. (7)과 (8)로 정의된다. MUSIC 알고리즘은 안테나 요소 전체 를 사용하여야 하므로, FMCCA는 MCCA와 같은 구조를 갖는다.

$$\text{MUSIC}_{CC}\left(\text{Add/Sub}\right) = \frac{360^2}{\Delta_M^2} \left(M^2 - 1\right) + \frac{5}{3}M^3 + \left(K - L + \frac{3}{2}\right)M^2 - \frac{1}{2}M + 1 \quad (7)$$

$$\text{MUSIC}_{CC}\left(\text{Mul/Div}\right) = \frac{360^2}{\Delta_M^2} \left(M^2 + M\right) + \frac{5}{3}M^3 + \left(K - L - \frac{1}{2}\right)M^2 + \frac{19}{6}M + 2$$
(8)

여기서 Δ_M은 MUSIC 알고리즘의 스텝 크기를 나타내며, *L*은 신 호의 총 개수를 나타낸다.

4.3 MCCA 안테나 기반 OBM 알고리즘 복잡도

OBM 알고리즘은 도래각 추정을 위해 캐스케이드 도래각 추 정 알고리즘의 Beamspace MUSIC 알고리즘과 동일한 매개변수 및 공간스펙트럼에 대한 계산이 필요하다. 하지만 캐스케이드 알 고리즘과는 다르게 전체 범위를 검색한다. OBM 알고리즘의 각 항목에 대한 계산복잡도는 Table 3에 요약되어 있다. Table 3과 스텝 크기를 고려한 MCCA 안테나 기반 OBM 알고리즘의 계산 복잡도는 Eqs. (9)와 (10)으로 정의된다.

 $OBM_{CC} (Add/Sub) = \sum_{i=1}^{S} \left[\frac{SR_{OBQ}}{\Delta_{OB}^2} \frac{SR_{OBQ}}{\Delta_{OB}^2} \left(B^2 + (M-1)B \right) \right] + S \left[\frac{5}{3}B^3 - \left(K - L_s - \frac{1}{2} \right)B^2 + \left(K(M-1) - \frac{1}{2} \right)B + 1 \right]$ (9)

OBM_{c.c} (Mul/Div) =

$$\sum_{i=1}^{S} \left[\frac{SR_{OBH_i}SR_{OBH_i}}{\Delta_{OB}^2} \left(B^2 + (M+1)B \right) \right] + S \left[\frac{5}{3}B^3 - \left(L_s + \frac{3}{2} \right)B^2 + \left(KM - \frac{19}{6} \right)B + 2 \right]$$
(10)

여기서 SR_{OBP_i} 와 SR_{OBP_i} 은 해당 섹터에 대한 OBM 알고리즘의 고 도각, 방위각 검색 범위를 나타내고, Δ_{OB} 은 OBM 알고리즘의 스

 Table 3. MCCA antenna based Only Baeamspace MUSIC algorithm computational complexity.

Index		Operation		
		Additional/Subtraction	Multiply/Divide	
	$\mathbf{Br}(k)$	BK(K-1)	BKM	
	\mathbf{R}_{B}	$B^2(K-1)$	B^2K	
	$EVD(\mathbf{R}_{\scriptscriptstyle B})$	$\frac{2}{3}B^3 + \frac{3}{2}B^2 - \frac{1}{2}B + 1$	$\frac{2}{3}B^3 - \frac{2}{3}B^2 - \frac{19}{6}B + 2$	
	$\mathbf{a}_{\scriptscriptstyle B}(\theta,\phi)$	B(M-1)	BM	
	Π_B	$B^2 \left(B - L - 1 \right)$	$B^2(B-L)$	
	$P_{\scriptscriptstyle B}(\theta,\phi)$	$B^2 - 1$	$B^2 + B$	

Table 4. Signal parameters for scenario A.

Signal	Elevation angle (θ°)	Azimuth angle (ϕ°)	Normalized Center frequency	Modulation index
AM	-69, -74	22, 19	0.08, 0.45	0.03
CW	-54, -62	25, 17	0.2, 0.4	-
WB	-45	19	0.1	-

Table 5. Signal parameters for scenario B.

Signal	Elevation angle (θ°)	Azimuth angle (ϕ°)	Normalized center frequency	Modulation index
AM	-120	120	0.1	0.03
CW	-112, 72	114, -15	0.2, 0.3	-
FM	-95, 85	100, -5	0.42, 0.37	-
WB	94	3	0.35	-

텝 크기를 나타내며, S는 섹터의 개수를 나타내고, L,는 섹터 내 의 신호 개수를 나타낸다.

5. COMPUTER SIMULATION

본 장은 FMCCA 안테나 기반 캐스케이드 알고리즘과 일반적 인 도래각 추정 알고리즘과의 계산 복잡도 비교를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시한다. 일반적인 도래각 추정 알고리즘으 로 우수한 분해능 성능을 가지는 MUSIC 알고리즘과 효율적인 복잡도를 보유한 OBM 알고리즘을 고려한다. 각 알고리즘의 공 간스펙트럼을 포함한 각 매개변수를 계산하기 위한 연산시간 및 사용된 안테나 개수에 따른 각 알고리즘의 연산 횟수에 대한 컴 퓨터 시뮬레이션을 진행하였고, 시뮬레이션을 위해 다음 2가지 시나리오를 고려하였다.

Α.	1개의 도래각 그룹 :5개의 신호 존재
В.	2개의 도래각 그룹 :6개의 신호 존재
	(각 그룹에 3개의 신호 존재)

수신신호 모델은 (Mun & Hwang 2017)에서 제시한 신호모델 을 사용하였으며, 신호의 매개변수들은 Tables 4와 5에 요약되어 있다.

시나리오 A에서 캐스케이드 알고리즘의 검색범위는 고도각의 경우 40°(-80°~-40°), 방위각의 경우 15°(15°~30°) 이고, 시나리오 B 에는 캐스케이드 알고리즘의 첫번째 도래각 그룹의 검색범위는



Fig. 3. AOA estimation result of each algorithm for scenario A.



Fig. 4. AOA estimation result of each algorithm for scenario B.

고도각은 30°(-123°~-93°), 방위각은 30°(95°~125°)이고, 두번째 도래각 그룹의 검색범위는 고도각은 25°(70°~95°), 방위각은 20° (-16°~4°)이다. MUSIC 알고리즘과 OBM 알고리즘의 검색범위는 전체 범위가 된다. 단, OBM 알고리즘의 경우 전체 검색범위를 81 개의 섹터 (*S*=81) 로 나누어 검색한다. FMCCA 안테나는 배열의 중심을 공유하고, 서로 다른 반경을 가지는 4개의 UCA로 구성되



Fig. 5. One-step calculation time of AOA estimation parameters for cascade, MUSIC, and OBM algorithms.



Fig. 6. Total calculation time of AOA estimation parameters for cascade, MUSIC, and OBM algorithms in scenario A.



Fig. 7. Total calculation time of AOA estimation parameters for cascade, MUSIC, and OBM algorithms in scenario B.

며 배치되는 총 안테나 개수는 240 ($M_{cca}=16+32+64+128$) 개로 설정하였고, 캐스케이드 알고리즘에 Capon은 가장 바깥쪽 UCA 의 128개의 안테나 요소 중 8개의 안테나 ($M_c=8$)를 사용한다고 가정하였다. Beamspace MUSIC은 전체 안테나 요소를 사용하 며, 이때 빔공간 행렬의 크기는 13으로 설정하였고, 각 알고리즘 의 스텝 크기는 Capon 알고리즘은 1°($\Delta_c=1$), Beamspace MUSIC, MUSIC, OBM 알고리즘은 각각 0.5°($\Delta_M, \Delta_B, \Delta_{OB}$) 로 가정하였다.

Figs. 3과 4는 시나리오 A와 시나리오 B에 대한 각 알고리즘의 도래각 추정 결과를 나타낸 것이다. 두 그림에서 각 알고리즘이 수신된 신호들의 도래각에서 공간스펙트럼 피크값을 가짐으로, 세 알고리즘이 유사한 도래각 추정 성능을 가짐을 확인할 수 있 다. Fig. 5는 도래각 추정을 위해 각 알고리즘이 한 스텝 크기에 대



Fig. 8. Addition/subtraction and multiplication/division computational complexity of cascade, MUSIC, and OBM algorithms according to the number of antenna elements employed in scenario A.



Fig. 9. Addition/subtraction and multiplication/division computational complexity of cascade, MUSIC, and OBM algorithms according to the number of antenna elements employed in scenario B.

한 매개변수 및 공간스펙트럼을 계산하는데 소요되는 시간을 나 타낸 것이다. 시간 측정을 위해 MATLAB의 내장함수인 Tic-Toc 함수를 사용하였고, 30번 반복 수행 후 평균값을 취하였다. Fig. 5 의 결과로부터 MUSIC, 캐스케이드, OBM 알고리즘 순으로 한 스 텝 크기당 계산 시간이 오래 소요되는 것을 확인 할 수 있으며, 캐 스케이드 알고리즘은 Capon 알고리즘의 계산량으로 인해 OBM 알고리즘에 비해 약간의 시간이 더 필요하다. Figs. 6과 7은 시나 리오 A와 B 대한 각 알고리즘의 매개변수 및 공간스펙트럼 계산 에 소요되는 전체 시간을 나타낸 것이다. 두 그림에서 캐스케이 드, OBM, MUSIC 알고리즘 순으로 도래각 추정을 위해 더 적은 시간이 소요됨을 확인할 수 있다. 전체 범위를 검색하는 MUSIC 이나 OBM 알고리즘과는 달리 캐스케이드 알고리즘의 경우 특정 범위만 검색하므로, 검색범위에 대한 복잡도를 크게 줄일 수 있 다. Figs. 8과 9는 각 시나리오의 기본 매개변수 (신호의 수, 각 알 고리즘의 스텝 크기, 빔공간 행렬의 크기, 각 시나리오의 고도각

과 방위각 검색범위, Capon 알고리즘 수행 시 사용되는 안테나 요소의 개수)들은 고정하고, 사용된 안테나의 개수를 32, 84, 136, 188, 240개로 늘려가면서 시나리오 A와 B에 대한 각 알고리즘의 총 덧셈/뺄셈, 곱셈/나눗셈 복잡도를 계산한 결과이다. 두 그림의 결과로부터 캐스케이드 알고리즘이 MUSIC 알고리즘과 OBM 알 고리즘 보다 월등히 낮은 복잡도를 갖는 것을 확인할 수 있다. 본 논문의 시나리오는 신호가 특정 각도 부근에 모여 있다고 가정하 였지만, 신호가 전 범위에 퍼져 있는 극단적인 경우, 전체 범위를 검색하게 된다. 극단적인 경우에도 기존 MUSIC 알고리즘에 비해 OBM 알고리즘이 훨씬 낮은 복잡도를 가지고 있으며, 논문에서 제안한 캐스케이드 알고리즘은 Capon 알고리즘으로 인해 OBM 알고리즘보다 약간의 계산량이 추가된다. 하지만, 이는 매우 극 단적인 경우로 실제 상황에서는 거의 고려되지 않으며, 실제로 신호의 개수가 매우 많지 않다면, 신호가 전 범위에 걸쳐 존재하 여도 캐스케이드 알고리즘의 검색 범위는 줄어 들게 된다. 즉, 한 개의 신호들이 포함된 몇 개의 도래각 그룹을 Capon 알고리즘을 통해 추정하게 되어, 일반적인 도래각 추정 알고리즘에 비해 현 격히 낮은 복잡도를 기대할 수 있다.

6. CONCLUSIONS

본 논문은 Massive 안테나를 사용하여 신호의 도래각을 추정 할 시 다수의 안테나 소자로 인해 발생할 수 있는 높은 계산 복잡 도 문제를 해결하기 위해 최근에 제안된 FMCCA 안테나 기반 캐 스케이드 도래각 추정 알고리즘의 실시간 도래각 추정 성능평가 를 진행하였다. 이를 위해, FMCCA 안테나 기반 캐스케이드 도 래각 추정 알고리즘의 복잡도 계산을 위한 수학적 모델들을 제 시하였다. 이를 기반으로, 캐스케이드 알고리즘의 계산 복잡도 를 기존의 대표적인 도래각 추정 알고리즘인 MUSIC 알고리즘과 OBM 알고리즘의 복잡도와 비교하고 분석하였다. MUSIC 알고 리즘과 OBM 알고리즘의 복잡도 계산을 위해, 이들 두 알고리즘 에 대한 복잡도의 수학적 모델 또한 제시하였다. 컴퓨터 시뮬레 이션을 통해, 고려된 세 알고리즘이 유사한 도래각 추정 성능을 가지면서, FMCCA 안테나 기반의 캐스케이드 도래각 추정 알고 리즘이 가장 낮은 계산 복잡도를 가지는 것을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENTS

이 논문은 2018년도 정부 (교육부)의 재원으로 한국연구재단 의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2018R1D1-A1B07041644).

이 논문은 2021년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구되 었음.

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

- Ahmed, I., Khammari, H., Shahid, A., Musa, A., Kim, K. S., et al. 2018, A survey on hybrid beamforming techniques in 5G: Architecture and system model perspectives, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 20, 3060-3097. https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2843719
- Akkar, S., Harabi, F., & Gharsallah, A. 2010, Concentric Circular Array for directions of arival estimation of coherent sources with MUSIC algorithm, In 2010 XIth International Workshop on Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications to Circuit Design (SM2ACD), Gammarth, Tunisia, 4-6 Oct. 2010, pp.1-5. https://doi.org/10.1109/SM2ACD.2010.5672331
- Al-Sadoon, M. A., Ali, N. T., Dama, Y., Zuid, A., Jones, S. M., et al. 2017, A new low complexity angle of arrival algorithm for 1D and 2D direction estimation in MIMO smart antenna systems, Sensors, 17, 2631. https://doi.org/10.3390/ s17112631
- Cao, R., Liu, B., Gao, F., & Zhang, X. 2017, A low-complex onesnapshot DOA estimation algorithm with massive ULA, IEEE Communications Letters, 21, 1071-1074. https:// doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2652442
- Chan, S. C. & Chen, H. H. 2006, Uniform concentric circular arrays with frequency-invariant characteristics—theory, design, adaptive beamforming and DOA estimation, IEEE Transactions on Signal Processing, 55, 165-177. https://doi.org/10.1109/TSP.2006.882109
- Chen, R., Yang, W., Xu, H., & Li, J. 2018, A 2-D FFT-based transceiver architecture for OAM-OFDM systems with UCA antennas, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 67, 5481-5485. https://doi.org/10.1109/ TVT.2018.2817230
- Cheng, W., Zhang, H., Liang, L., Jing, H., & Li, Z. 2017. Orbital-angular-momentum embedded massive MIMO: Achieving multiplicative spectrum-efficiency for mmWave communications. IEEE Access, 6, 2732-2745. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2785125

Famoriji, O. J. & Shongwe, T. 2022, Critical Review of Basic

Methods on DoA Estimation of EM Waves Impinging a Spherical Antenna Array, Electronics, 11, 208. https:// doi.org/10.3390/electronics11020208

- Hamdi, B., Limam, S., & Aguili, T. 2016, Uniform and concentric circular antenna arrays synthesis for smart antenna systems using artificial neural network algorithm, Progress In Electromagnetics Research B, 67, 91-105. https://doi. org/10.2528/PIERB16031508
- Jung, J. H., Kim, M. D., Lee, J. N., Cho, Y. K., Kim, K. S., et al. 2019, Wireless Communication System on Very High Frequency, Electronics and Telecommunications Trends, 34, 28-41. https://doi.org/10.22648/ETRI.2019.J.340603
- Kim, T. Y. & Hwang, S. S. 2020, Cascade AOA estimation algorithm based on flexible massive antenna array, Sensors, 20, 6797. https://doi.org/10.3390/s20236797
- Kim, T. Y. & Hwang, S. S. 2021, Cascade AOA Estimation Algorithm Based on FMCCA Antenna, The Journal of the Korea institute of electronic communication sciences, 16, 1081-1088.
- Mangoud, M. A., Elragal, H. M., & Alshara, M. T. 2014, Design of time modulated concentric circular and concentric hexagonal antenna array using hybrid enhanced particle swarm optimisation and differential evolution algorithm, IET Microwaves, Antennas & Propagation, 8, 657-665. https://doi.org/10.1049/iet-map.2013.0132
- 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
- Saito, S., Suganuma, H., Ogawa, K., & Maehara, F. 2019, Performance enhancement of OAM-MIMO using successive interference cancellation, In 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring), Kuala Lumpur, Malaysia, 28 Apr-1 May 2019. https://doi. org/10.1109/VTCSpring.2019.8746501
- Shaikh, A. & Kaur, M. J. 2019, Comprehensive survey of massive MIMO for 5G communications, In 2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), Dubai, United Arab Emirates, 26 Mar-10 Apr 2019. https://doi.org/10.1109/ICASET.2019.8714426
- Yang, K. Y., Wu, J. Y., & Li, W. H. 2014, A low-complexity direction-of-arrival estimation algorithm for fulldimension massive MIMO systems, In 2014 IEEE International Confere-nce on Communication Systems, Macau, China, 19-21 Nov 2014. https://doi.org/10.1109/ ICCS.2014.7024848



Tae-yun Kim was born in Gwangju, Korea, and received the B.S. degree in Mechatronic Engineering for Chosun University, Gwangju, Korea, in 2014. The M.S. and Ph.D. degrees in Electronic Engineering from the Chosun University, in 2016 and 2022. Since 2022, he has been working as a postdoctoral

researcher at the Institute of AI Convergence and his interests include adaptive signal processing and low complexity AOA estimation algorithms for massive array antenna.



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).