

단일 및 이중 림 어레이 안테나 기반 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘의 계산복잡도 분석

김태윤* · 황석승**

Analysis of Computational Complexity for Cascade AOA Estimation Algorithm Based on
Single and Double Rim Array Antennas

Tae-Yun Kim* · Suk-Seung Hwang**

요약

메시브 배열 안테나를 이용한 메시브 MIMO(Multi Input Multi Output) 기술을 이용하기 위해서는 신호의 도래각(Angle of Arrival : AOA) 파악이 필수적으로 요구된다. 메시브 배열 안테나를 하면 기존 AOA 추정 알고리즘은 뛰어난 추정 성능을 갖지만, 안테나 요소 수에 비례하여 계산복잡도가 증가하는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘이 제안되었으며 다수의 논문을 통해 단일 형상의 (비)메시브 배열 안테나에 대한 성능이 입증되었다. 하지만 단일 및 이중 림 어레이 안테나가 적용된 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘의 계산복잡도 비교는 이루어지지 않았다. 본 논문에서는 단일 및 이중 림 어레이를 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘에 적용된 경우 AOA 추정을 위한 계산복잡도를 비교 분석한다.

ABSTRACT

In order to use the Massive MIMO (Multi Input Multi Output) technology using the massive array antenna, it is essential to know the angle of arrival (AOA) of the signal. When using a massive array antenna, the existing AOA estimation algorithm has excellent estimation performance, but also has a disadvantage in that computational complexity increases in proportion to the number of antenna elements. To solve this problem, a cascade AOA estimation algorithm has been proposed and the performance of a single-shaped (non)massive array antenna has been proven through a number of papers. However, the computational complexity of the cascade AOA estimation algorithm to which single and double rim array antennas are applied has not been compared. In this paper, we compare and analyze the computational complexity for AOA estimation when single and double rim array antennas are applied to the cascade AOA estimation algorithm.

키워드

Cascade AOA Estimation Algorithm, Computational Complexity Analysis, Single Rim Array Antenna, Double Rim Array Antenna
캐스케이드 도래각 추정 알고리즘, 계산복잡도 분석, 단일 림 배열 안테나, 이중 림 배열 안테나

* 조선대학교 AI융합연구원(kimty@chosun.ac.kr)

** 교신저자 : 조선대학교 전자공학부

• 접수일 : 2022. 10. 30

• 수정완료일 : 2022. 11. 20

• 게재확정일 : 2022. 12. 17

• Received : Oct. 30, 2022, Revised : Nov. 20, 2022, Accepted : Dec. 17, 2022

• Corresponding Author : Suk-Seung Hwang

School of Electronic Engineering, Chosun University,

Email : hwangss@chosun.ac.kr

I. 서 론

현대 무선 통신 시스템의 메시브 배열 안테나를 이용하는 메시브 MIMO(Multiple Input Multiple Output)와 같이 효율적인 통신 서비스 운용을 위한 기술에는 빔형성(Beamforming) 기술이 필수적으로 필요하게 된다 [1-3]. 고신뢰/고정밀의 빔형성을 위해서는 안테나로 입사하는 신호의 고도각과 방위각에 해당하는 2차원적인 도래각(Angle-of-Arrival : AOA) 정보가 필수적으로 요구된다. 2차원 도래각 정보 파악을 위해 여러 형상의 (비)균일 평면, (비)균일 적층 배열 안테나를 활용할 수 있으며 해당 안테나를 활용하여 시스템 사양에 맞춘 다양한 도래각 추정 알고리즘이 적용될 수 있다. 신호의 도래각 파악을 위해 대표적으로 사용되는 알고리즘으로 안테나 형상에 제약받지 않으며, 고성능의 도래각 추정 성능을 보유한 Multiple Signal Classification(MUSIC) 알고리즘이 있다. 일반적으로 MUSIC 알고리즘은 사용된 안테나 요소의 개수가 많으면 많을수록 도래각 추정 성능이 좋아진다. 하지만, 다수의 안테나 요소를 사용할 경우 MUSIC 알고리즘의 계산복잡도는 안테나 요소에 비례하여 기하급수적으로 증가하게 된다 [4]. 다수의 안테나 요소로 구성된 메시브 안테나가 적용된 실시간 저 복잡도 고분해능 알고리즘의 수요로 인해 MUSIC 알고리즘과 유사한 분해능을 갖으면서 복잡도는 낮은 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘이 제안되었다 [5]. 해당 알고리즘의 AOA 추정 성능은 단일 형상의 (비)메시브 배열 안테나를 적용한 다양한 논문을 통해 입증되었으나 [6-8], 메시브 안테나로 구성할 수 있는 다양한 형상의 단일 및 이중 림 배열 안테나에 대한 복잡도 분석은 이루어지지 않았다. 따라서 본 논문은 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘의 단일 및 이중 림(rim) 배열 안테나에 대한 복잡도 비교를 위해 메시브 안테나를 이용하여 구성할 수 있는 중앙 요소가 존재하지 않는 Uniform Frame Rectangular Array(UFRA) 안테나와 이중 림 형상의 Concentric Uniform Frame Rectangular Array(CUFRA) 안테나 구조를 제안한다. 제안된 안테나 구조에 대한 수학적 모델을 제시하고, 수학적 모델에 기반한 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘의 계산복잡도를 비교 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 캐스케이

드 AOA 추정 알고리즘의 복잡도 비교를 위해 고려한 안테나의 구조와 해당 안테나 구조에 대한 수신 신호 모델 등을 포함한 데이터 모델을 제시하고, 3장에서는 다양한 배열 안테나가 적용될 수 있는 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘을 소개한다. 4장에서는 각 배열 안테나가 적용된 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘의 계산복잡도 수학적 모델을 제시한다. 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘과 복잡도 비교를 위한 MUSIC 알고리즘의 계산복잡도 수학적 모델 또한 4장에서 제공한다. 5장은 4장의 수학적 모델을 바탕으로 각 배열 안테나가 적용된 각각의 알고리즘의 계산복잡도 비교를 위한 시나리오와 시나리오를 바탕으로 한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제공하고, 6장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 데이터 모델

2.1 안테나 모델

본 절은 논문에서 고려한 단일 및 이중 림으로 구성된 안테나 모델을 소개한다. [9]에서 림 형상의 배열 안테나에 대한 성능검증이 충분히 이루어졌으며, 이를 고려한 안테나의 형상은 그림1에서 확인할 수 있다. 중앙 요소가 존재하지 않는 단일 림으로 구성되는 UFRA 안테나와 배열 안테나의 중심을 공유하는 2개의 URFA로 구성된 CURFA 안테나를 고려하였다.

2.2 수신신호 모델

본 절에서는 안테나에 적용 가능한 수신신호의 수학적 모델을 제시한다. 수학적 모델을 위해 각 안테나는 M 개의 안테나 요소로 구성되며 Additive White Gaussian Noise (AWGN)잡음이 포함된 L 개의 신호가 입사한다고 가정하면, 샘플(sample) 인덱스 k 에 대한 수신신호 벡터는 식(1)과 같이 주어진다.

$$\mathbf{r}(k) = \mathbf{A}\mathbf{s}(k) + \mathbf{n}(k) \quad \dots (1)$$

식.(1)에서 $\mathbf{r}(k)$ 는 $M \times 1$ 크기의 수신신호 벡터이고, $\mathbf{s}(k)$ 는 $M \times L$ 크기의 배열 응답 행렬이며 $\mathbf{s}(k)$ 는 L 크기의 신호 벡터이고 $\mathbf{n}(k)$ 는 M 크기의 AWGN 벡터이다. l 번째 신호에 대한 각 배열에 대한 배열 응답

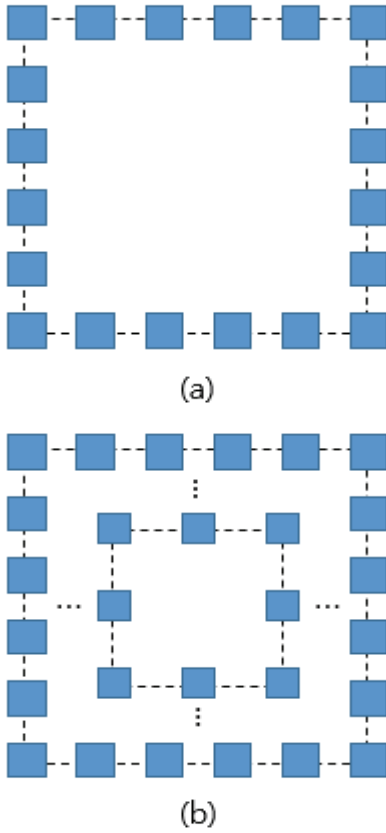


그림 1. 매시브 배열 안테나 구조 : (a) UFRA, (b) CUFRA
 Fig. 1 Massive array antenna structure : (a) UFRA, (b) CUFRA

벡터는 식(2)와 식(3)으로 정의된다.

$$\mathbf{a}_{URFA} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ e^{-j(R_n-2)\mu_l} \\ \vdots \\ e^{-jr_m\nu_l} \\ e^{-j((R_n-1)\mu_l+r_m\nu_l)} \\ \vdots \\ e^{-j(R_m-1)\nu_l} \\ \vdots \\ e^{-j((R_n-1)\mu_l+(R_m-1)\nu_l)} \end{bmatrix} \quad \dots (2)$$

$$\mathbf{a}_{CUREFA} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ e^{-j(R_n-2)\mu_l} \\ \vdots \\ e^{-jr_m\nu_l} \\ e^{-j((R_n-1)\mu_l+r_m\nu_l)} \\ \vdots \\ e^{-j(R_m-1)\nu_l} \\ \vdots \\ e^{-j((R_n-1)\mu_l+(R_m-1)\nu_l)} \end{bmatrix} \quad \dots (3)$$

식(2)와 식(3)에서 R_m 과 R_n 은 림 배열 안테나를 구성하는 x축과 y축에 놓인 총 안테나 요소의 개수를 나타내고, r_m 과 r_n 은 각 축의 안테나 요소의 위치이다. μ_l 과 ν_l 은 $\mu_l = 2\pi(d/\lambda)\cos\phi_l\sin\theta_l$, $\nu_l = 2\pi(d/\lambda)\sin\phi_l\sin\theta_l$ 로 정의되고, ϕ_l 과 θ_l 은 l 번째 신호에 대한 방위각과 고도각을 나타내며 d 는 안테나 요소간 간격, λ 는 파장을 의미한다.

III. 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘

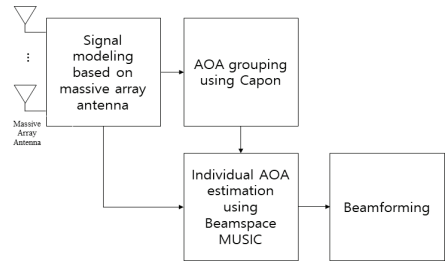


그림 2 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘 구조
 Fig. 2 Cascade AOA estimation algorithm structure

본 장은 [4-8]에서 제안된 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘을 간략히 설명한다. 그림 2는 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘의 기본 구조로써, 알고리즘의 수신단에는 다양한 배열 안테나가 적용될 수 있다. 특히, 매시브 배열 안테나가 적용될 경우에는 안테나 요소 On/Off(Flexible) 기능을 이용하여 Capon 알고리즘에는 적은 수의 안테나를 활성화하고, BeamSpace MUSIC 알고리즘에는 모든 안테나 요소를 활성화할 수 있다. 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘에서 Capon 알고리즘은 신속하게 입사되는 신호의 AOA 그룹을

추정하고, AOA 그룹에 대한 세부 신호 AOA는 Beamspace MUSIC 알고리즘을 통해 추정하게 된다.

3.1 Capon 알고리즘

본 논문의 Capon 알고리즘은 적절한 AOA 그룹 추정을 위해 단일 및 이중 립 배열 안테나의 최외각 립의 일부 소자만을 활성화하지만, 안테나 요소 On/Off 기능이 적용되어 있기에 어떠한 소자를 활성화해도 무관하다. AOA 그룹 추정은 특정 임계값을 결정하여 식(4)의 공간 스펙트럼 분석을 통해 추정된다.

$$P_C = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta, \phi) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta, \phi)} \quad \dots (4)$$

식(4)에서 $\mathbf{a}(\theta, \phi)$ 는 특정 고도각과 방위각에 대한 배열 응답 벡터이고, \mathbf{R}^{-1} 는 수신신호의 공분산행렬 ($\mathbf{R} = E[\mathbf{r}(k)\mathbf{r}^H(k)]$)의 역행렬이다.

3.2 Beamspace MUSIC 알고리즘

Capon 알고리즘으로 추정된 AOA 그룹에서 세부 도래각을 추정하기 위해 메시브 배열 안테나의 모든 요소를 이용한 Beamspace MUSIC 알고리즘을 이용한다. 이때 요소공간에서 빔공간으로 차원을 축소시키고, 검색범위를 특정 AOA 그룹으로 한정 지어 메시브 안테나 사용 시 기존 AOA 추정 알고리즘이 가지는 높은 복잡도 문제를 해결한다. 추정된 AOA 그룹 내 개별 신호에 대한 상세 도래각 추정은 Beamspace MUSIC 알고리즘 공간 스펙트럼 식인 식(5)의 피크값을 취함으로써 얻을 수 있다.

$$P_{BM} = \frac{1}{[\mathbf{B}\mathbf{a}(\theta, \phi)]^H \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H [\mathbf{B}\mathbf{a}(\theta, \phi)]} \quad \dots (5)$$

식(5)에서 \mathbf{B} 는 $M \times B$ 크기의 빔공간 변환 행렬이며, 클로니커 연산자(\otimes)를 통해 생성되며, \mathbf{E}_N 은 빔공간 잡음 부공간 고유벡터 행렬로써, 빔공간 공분산 행렬($\mathbf{R}_B = E[\mathbf{y}(k)\mathbf{y}^H(k)]$)의 고유치 분해를 통해 계산된다. $\mathbf{y}(k)$ 는 빔공간 출력으로 $\mathbf{y}(k) = \mathbf{B}\mathbf{r}(k)$ 로 정의된다.

IV. 계산복잡도 분석을 위한 수학적 모델

본 장은 논문에서 고려한 4가지 메시브 배열 안테나가 적용된 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘의 계산 복잡도 분석을 위한 수학적 모델을 제시한다.

4.1 Capon 알고리즘 계산복잡도

URFA와 CURFA 안테나가 적용된 Capon 알고리즘의 한 스텝에 대한 덧셈/뺄셈, 곱셈/나눗셈 계산복잡도 수학적 모델은 식(6), 식(7)와 같다. 수학적 모델링 위해 고려한 사항은 공간스펙트럼(P_C), 공분산 행렬(\mathbf{R}), 공분산 행렬의 역행렬(\mathbf{R}^{-1})이 고려되었으며, Capon 알고리즘의 복잡도는 배열 안테나를 구성하는 안테나 개수에만 영향을 받는다.

$$C_{A/S} = \frac{1}{3}M_C^3 + \left(K + \frac{1}{2}\right)M_C^2 - \frac{5}{6}M_C - 1, \quad \dots (6)$$

$$C_{M/D} = \frac{1}{3}M_C^3 + (K+1)M_C^2 - \frac{5}{3}M_C, \quad \dots (7)$$

식(6)과 식(7)에서 M_C 는 Capon 알고리즘에 사용된 안테나 요소의 개수이고, K 는 총 샘플링 개수를 나타낸다.

4.2 Beamspace MUSIC 알고리즘 계산복잡도

URFA와 CURFA 안테나를 적용한 Beamspace MUSIC 알고리즘의 한 스텝에 대한 덧셈/뺄셈, 곱셈/나눗셈 계산복잡도 수학적 모델은 식(8), 식(9)와 같다. 수학적 모델링 위해 고려한 사항은 빔공간 변환행렬(\mathbf{B}), 빔공간 출력($\mathbf{y}(k)$), 빔공간 공분산 행렬(\mathbf{R}_B), 빔공간 공분산 행렬의 고유치분해($EVD(\mathbf{R}_B)$), 빔공간 조향벡터($\mathbf{B}\mathbf{a}(\theta, \phi)$), 잡음 공분산 행렬과 잡음 공분산 행렬의 켈레진치의 곱($\mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H$), Beamspace MUSIC 공간스펙트럼(P_{BM})을 고려하였다.

V. 컴퓨터 시뮬레이션

본 장은 논문에서 고려한 2가지 립 형상의 메시브 배열 안테나를 적용 시 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘의 계산복잡도를 분석을 위한 시뮬레이션 결과를 제시한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 URFA와 CURFA 안테나 요소의 총 개수는 64개로 가정하였고, 수신신호를 모델링 하기 위한 각 신호의 모델은 [10]에서 제안한 신호모델을 사용하였다. 복잡도 비교를 위한 지표는 빔공간 변환행렬의 크기와 수신신호의 개수이며, 해당 지표를 반영하기 위해 2가지 시나리오를 선정하였다.

1. 빔공간 변환행렬의 크기가 변화되는 경우
2. 입사하는 신호의 수가 변화되는 경우

첫번째 시나리오에서 빔공간 변환행렬의 크기를 $64 \times B$ ($B=8,16,24,32,40$)로 설정하고 3개의 신호가 입사한다고 가정하였다. 두번째 시나리오에서는 빔공간 변환행렬의 크기는 64×40 으로 고정하고 안테나로 입사하는 신호의 수를 1개부터 19개 까지 증가한다고 가정하였다.

그림3은 첫번째 시나리오에 대한 URFA, CURFA 안테나가 적용된 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘과 비교군으로 선택한 MUSIC 알고리즘의 덧셈/뺄셈, 곱셈/나눗셈 계산복잡도 시뮬레이션 결과이다. 명확한 결과 확인을 위해 B의 크기가 40일 때 확장된 결과를 그림4에 도시하였다. 그림 3과 4로부터 모든 알고리즘에서 덧셈/뺄셈 복잡도가 곱셈/나눗셈 복잡도에 비해 낮으며, 한 스텝 사이즈만 고려하였음에도 불구하고 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘이 MUSIC 알고리즘에 비해 매우 낮은 복잡도를 갖는 것을 확인할 수 있다. 또한 URFA와 CURFA 안테나를 이용하여 빔공간 변환행렬을 생성할 시에 클로니클 연산을 이용하여 생성하기 때문에 덧셈에 대한 계산복잡도가 발생하지 않는다. 따라서 URFA와 CURFA 안테나의 덧셈/뺄셈에 대한 계산복잡도는 동일하며, 곱셈/나눗셈에 대한 계산복잡도는 CURFA 안테나가 URFA 안테나에 비해 아주 근소하게 낮은 복잡도를 갖게 된다.

그림 5는 두번째 시나리오에 대한 URFA, CURFA 안테나가 적용된 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘과

$$BM_{A/S}(URFA)= \frac{5}{3}B^3 + \left(K-L-\frac{1}{2}\right)B^2 + \left((K+1)M-K-\frac{3}{2}\right)B \quad (8)$$

$$BM_{M/D}(URFA)= \frac{5}{3}B^3 + \left(K-L+\frac{1}{3}\right)B^2 + \left((K+2)M-\frac{13}{6}+(R_m-1)\right)B+2, \quad (9)$$

$$BM_{A/S}(CURFA)= \frac{5}{3}B^3 + \left(K-L-\frac{1}{2}\right)B^2 + \left((K+1)M-K-\frac{3}{2}\right)B \quad (10)$$

$$BM_{M/D}(CURFA)= \frac{5}{3}B^3 + \left(K-L+\frac{1}{3}\right)B^2 + \left((K+2)M-\frac{13}{6}+(r_m R_m - r_m)\right)B+2, \quad (11)$$

4.3 MUSIC 알고리즘 계산복잡도

URFA와 CURFA 안테나를 적용한 MUSIC 알고리즘의 한 스텝에 대한 덧셈/뺄셈, 곱셈/나눗셈 계산복잡도 수학적 모델은 식(10), 식(11)과 같다. 수학적 모델링 위해 고려한 사항은 공분산 행렬(\mathbf{R}_M), 공분산 행렬의 고유치분해($EVD(\mathbf{R}_M)$), 잡음 공분산 행렬과 잡음 공분산 행렬의 켈레전치의 곱($\mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H$), MUSIC 공간스펙트럼(P_M)을 고려하였다. MUSIC 알고리즘도 Capon 알고리즘과 마찬가지로 도래각 추정을 위한 계산복잡도는 안테나 요소의 숫자에만 영향을 받는다.

$$M_{A/S} = \frac{5}{3}M^3 + \left(K-L-\frac{1}{2}\right)M^2 - \frac{1}{2}M+1 \quad (12)$$

$$M_{M/D} = \frac{5}{3}M^3 + \left(K-L-\frac{1}{2}\right)M^2 + \frac{19}{6}M+2 \quad (13)$$

비교군으로 선택한 MUSIC 알고리즘의 덧셈/뺄셈, 곱셈/나눗셈 계산복잡도 시뮬레이션 결과이다. 첫번째 시나리오와 마찬가지로, URFA와 CURFA 안테나를 이용하여 빔공간 변환행렬을 생성할 시 클로니클 연산을 이용하여 생성하기 때문에 덧셈에 대한 계산복잡도가 발생하지 않는다. 따라서 URFA와 CURFA 안테나의 덧셈/뺄셈에 대한 계산복잡도는 동일하며 모든 알고리즘에서 덧셈/뺄셈 복잡도가 곱셈/나눗셈 복잡도에 비해 낮은 것을 확인할 수 있다. 하지만 한 스텝 사이즈만 고려하였기에 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘의 덧셈/뺄셈 복잡도는 MUSIC에 비해 낮은 반면 곱셈/나눗셈 복잡도는 MUSIC 알고리즘에 높은 것을 확인할 수 있다.

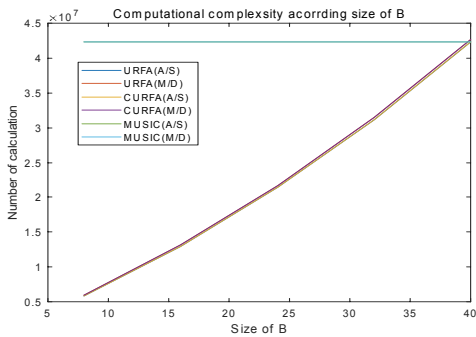


그림 3. 빔공간 변환행렬 크기에 따른 각 배열 안테나가 적용된 알고리즘의 계산복잡도

Fig. 3 Calculation complexity of the algorithm to which each array antenna is applied according to the size of the beamspace transformation matrix

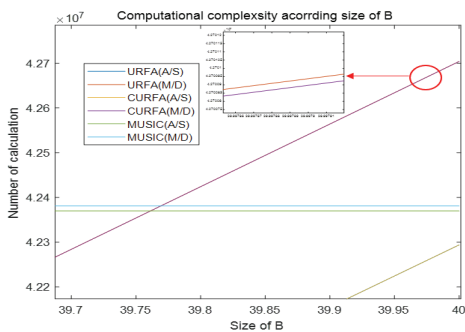


그림 4. B의 크기가 40일 때 그림3 결과의 확장
Fig. 4 Expansion of the Figure 3 result when the size of B is 40

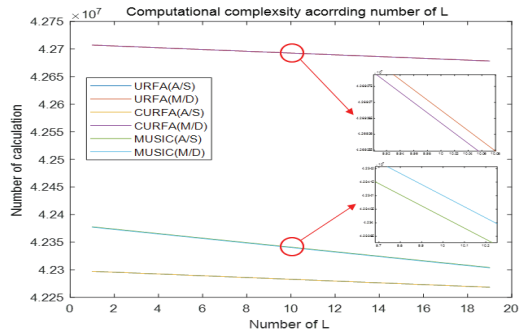


그림 5. 신호 개수에 따른 각 배열 안테나가 적용된 알고리즘의 계산복잡도

Fig. 5 Calculation complexity of the algorithm to which each array antenna is applied according to the number of signals

VI. 결론

본 논문은 매시브 안테나로 구현이 가능한 중앙 요소가 존재하지 않는 URFA 안테나와 2개의 URFA안테나로 구성된 CURFA 안테나 구조를 제안하고, 해당 안테나를 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘에 적용하여 배열 안테나에 대한 계산복잡도를 비교/분석하였다. 시뮬레이션 결과들로부터 URFA 안테나와 CURFA 안테나의 덧셈/뺄셈 복잡도는 동일하며, 곱셈/나눗셈의 경우 CURFA 안테나가 근소하게 낮은 복잡도를 갖는 것을 확인하였다. 본 논문은 동일한 빔공간 및 안테나 요소를 고려하여 시뮬레이션을 진행하였지만, 실제 시스템에서는 단일 URFA 안테나에 비해 다중 URFA 안테나가 공간적인 활용 측면과 복잡도 면에서 훨씬 활용도가 높을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 지원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학연협력선도대학 육성사업 (LINC3.0)의 연구결과입니다.

이 논문은 2022년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구되었음

References

- [1] ITU-R M. 2083-0, "IMT Vision - Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond," *Report*, Sept. 2015.
- [2] C. Seker, M. T. Guner, and T. Ozturk, "A Review of Millimeter Wave Communication for 5G," *2018 2nd Int. Symp. Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, Ankara, Turkey, Oct. 2018, pp. 19-21.
- [3] J. Zhang, E. Björnson, M. Matthaiou, D. W. K. Ng, H. Yang, and D. J. Love, "Prospective multiple antenna technologies for beyond 5G," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 8, 2020, pp. 1637-1660.
- [4] H. Park and S. Hwang, "AIC & MDL Algorithm Based on Beamspace, for Efficient Estimation of the Number of Signals," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 4, 2021, pp. 617-624.
- [5] T. Kim, J. Mun, and S. Hwang, "A cascade AOA estimation technique with rectangular array antenna," *In 2018 Int. Symp. on Antennas and Propagation (ISAP)*, Busan, Korea, Oct, 2018, pp. 1-2.
- [6] T. Kim and S. Hwang, "Performance Evaluation of Cascade AOA Estimation Algorithm Based on Square Array Antenna," *J. of the Korea institute of electronic communication sciences*, vol. 15, no. 6, 2019, pp. 1053-1060.
- [7] T. Kim and S. Hwang, "Performance evaluation of cascade AOA estimator based on uniform circular array," *J. of Positioning, Navigation, and Timing*, vol. 9, no. 2, 2020, pp. 65-70.
- [8] T. Kim and S. Hwang, "Cascade AOA estimation algorithm based on flexible massive antenna array," *Sensors*, vol. 20, no. 23, 2020, pp. 1-23.
- [9] Z. N. Morris and K. T. Wong, "Comparing the "Rim" Versus the "Filled" Rectangular Array Grids—Their Direction-Finding Cramér-Rao Bounds," *IEEE Trans. Aerospace and*

Electronic Systems, vol. 55, no. 4, 2018, pp. 1945-1956.

- [10] J. Mun and S. Hwang, "Input Signal Model Analysis for Adaptive Beamformer," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 12, no. 3, 2017, pp. 433-438.

저자 소개



김태윤(Tae-Yun Kim)

2014년 조선대학교 메카트로닉스 공학과 졸업(공학사)

2016년 조선대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

2022년 조선대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

2022년 ~ 현재 조선대학교 AI융합연구원 박사후연구원

※ 관심분야 : 적응신호처리, Massive 안테나, 신호 위치추정, 저복잡도 위치추정 알고리즘



황석승(Suk-Seung Hwang)

1997년 광운대학교 제어계측공학과 졸업

2001년 University of California, Santa Barbara, Electrical & Computer Engineering Department

대학원 졸업 (공학석사)

2006년 University of California, Santa Barbara, Electrical & Computer Engineering Department 대학원 졸업 (공학박사)

2006. 5~2008. 3 삼성전자 통신연구소 책임연구원
2008. 3~2014. 1 조선대학교 메카트로닉스공학과 교수

2014. 2~ 조선대학교 전자공학부 교수

※ 관심분야 : 적응신호처리, 위치추정, 채널추정, 이동로봇용 위치추정, 간섭제거, RFID

