

FMCCA 안테나 기반 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘

김태윤* · 황석승**

Cascade AOA Estimation Algorithm Based on FMCCA Antenna

Tae-Yun Kim* · Suk-Seung Hwang**

요 약

현대 무선통신 시스템은 대규모의 안테나 요소가 장착된 메시브 배열 안테나를 사용하여 다수의 사용자에게 원활한 통신 서비스를 지원하기 위해 빔형성 기술을 활용한다. 신뢰도 높은 빔형성 기술은 안테나로 입사되는 신호에 대한 도래각(Angle-of-Arrival : AOA) 정보가 필수적으로 요구되는데, 일반적으로 도래각 정보는 고분해 성능을 가지는 MUSIC(: Multiple Signal Classification)과 같은 도래각 추정 알고리즘을 통해 추정된다. MUSIC 알고리즘은 우수한 추정성능을 갖지만, 메시브 배열 안테나 사용 시 알고리즘의 급격한 복잡도 증가로 인해 실시간 도래각 추정이 어렵다. 이와 같은 문제점을 개선하기 위해, 본 논문은 안테나 요소 ON/OFF 기능을 가지는 FMCCA(: Flexible Massive Concentric Circular Array) 안테나 기반의 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘을 제안한다. 제안된 캐스케이드 AOA 추정 알고리즘은 전체 안테나 요소 중 일부 안테나 요소를 사용하는 CAPON 알고리즘과 전체 안테나 요소를 사용하는 Beamspace MUSIC 알고리즘으로 구성되며, 다양한 시나리오를 가정된 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 알고리즘의 도래각 추정 성능을 검증한다.

ABSTRACT

The modern wireless communication system employs the beamforming technique based on a massive array antenna with a number of elements, for supporting the smooth communication services. A reliable beamforming technology requires the Angle-of-Arrival(: AOA) information for the signal incident to the receiving antenna, which is generally estimated by the high-resolution AOA estimation algorithm such as Multiple Signal Classification(: MUSIC). Although the MUSIC algorithm has the excellent estimation performance, it is difficult to estimate AOA in real time for the massive array antenna due to the extremely high computational complexity. In order to enhance this problem, in this paper, we propose the cascade AOA estimation algorithm based on a Flexible Massive Concentric Circular Array(: FMCCA) antenna with the On/Off function for antenna elements. The proposed cascade algorithm consists of the CAPON algorithm using some elements among entire antenna elements and the Beamspace MUSIC algorithm using entire elements. We provide computer simulation results for various scenarios to demonstrate the AOA estimation performance of the proposed approach.

키워드

Flexible Massive Concentric Circular Array Antenna, Cascade AOA Estimation, CAPON, Beamspace MUSIC
유연한 대규모 동심원 배열 안테나, 캐스케이드 도래각 추정, 카폰, 빔공간 뮤직

* 조선대학교 전자공학과 (skriekd12@chosun.kr)

** 교신저자 : 조선대학교 전자공학부

• 접수일 : 2021. 10. 26

• 수정완료일 : 2021. 11. 21

• 게재확정일 : 2021. 12. 17

• Received : Oct. 26, 2021, Revised : Nov. 21, 2021, Accepted : Dec. 17, 2021

• Corresponding Author : Suk-Seung Hwang

School of Electronic Engineering, Chosun University,

Email : hwangss@chosun.ac.kr

I. 서론

5세대 무선통신 규격인 5G NR(New Radio)은 초고속, 초저지연, 초연결을 목표로 하고 있다[1]. 이러한 3대 목표를 달성하기 위해 다양한 기술들이 제안되고 있는데, 다수의 안테나 요소가 사용되는 메시브 배열 안테나를 이용한 빔형성(Beamforming) 기술도 그중 하나이다[2]. 다수의 사용자에게 효율적인 빔을 형성하기 위해서는 사용자의 신호에 대한 도래각 추정 이 선행되어야 하는데, 도래각은 기지국 혹은 시스템에 탑재된 배열 안테나로 입사되는 수신신호를 기반으로 적절한 도래각 추정 알고리즘을 사용하여 추정된다.

앞서 언급했듯이, 5G NR은 매우 많은 안테나 요소가 탑재된 메시브 배열 안테나가 필수적으로 사용된다. 제한된 면적에 다수의 안테나 요소를 탑재하기 위해 URA(Uniform Rectangular Array) 혹은 CCA(Concentric Circular Array) 안테나가 사용되는데, CCA안테나의 경우 URA에 비해 부엽(side lobe)이 높긴 하지만 UCA(Uniform Circular Array)의 장점을 갖으면서 공간적 이점을 극대화 할 수 있어[3] 최근 연구가 활발히 진행되고 있다[4-6]. [7]에서는 MUSIC(Multiple Signal Classification), MVDR(Minimum Variance Distortionless Response), Beamscan 알고리즘을 CCA 안테나와 UCA에 적용하여 도래각 추정 성능을 분석하였고, UCA 안테나에 비해 CCA 안테나 구조에 적용한 경우 성능이 더 우수함을 확인하였다. 일반적으로, CCA 안테나에 MUSIC 알고리즘을 적용한 경우 도래각 추정성능이 뛰어나며, 많은 안테나 요소로 구성된 MCCA(Massive Concentric Circular Array)에 적용하면, 증가된 안테나 요소만큼 더욱더 높은 신뢰도를 가지는 도래각 추정이 가능하다. 하지만, 안테나 요소의 개수가 늘어나면, 도래각 추정을 위한 알고리즘의 계산부하가 기하급수적으로 증가하게 되어 실시간 도래각 추정을 요하는 고정밀 위치추정 시스템에는 활용이 어렵게 된다[8].

이러한 문제를 개선하기 위해, 본 논문은 안테나 요소 ON/OFF 기능을 가지는 메시브 동심원 배열 안테나 기반의 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘을 소개한다. 여기서 언급된 안테나 배열을 FMCCA(

Flexible Massive Concentric Circular Array)라 명명한다. 본 논문의 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘은 FMCCA 안테나의 가장 안쪽 배열의 안테나 소자를 이용하여 대략적인 도래각 그룹을 찾는 CAPON 알고리즘과, FMCCA 안테나를 구성하는 전체 안테나 요소를 이용하여 도래각 그룹 안에 존재하는 신호들의 상세한 도래각을 추정하는 Beamspace MUSIC 알고리즘으로 구성된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 FMCCA 안테나의 구조를 소개하고, 3장에서 수신신호 모델링을 위한 메시브 동심원 배열 안테나의 수학적 모델을 제시한다. 4장에서는 FMCCA 안테나 기반 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘에 관해 기술하고, 5장에서는 FMCCA 안테나 기반 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘의 도래각 추정 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시한다. 마지막으로 6장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. FMCCA 안테나 구조

본 장은 안테나 요소 ON/OFF 기능을 갖는 FMCCA 안테나 구조를 소개한다. FMCCA 안테나의 배열구조는 CCA 안테나와 동일하며, 그림1과 같이 하나의 중심을 공유하는 다수의 원형 배열 안테나로 구성된다. 총 $M(M_1 + M_2 + \dots + M_N)$ 개의 안테나 요소로 구성되며, 각 원형 배열에 포함되는 안테나 소자

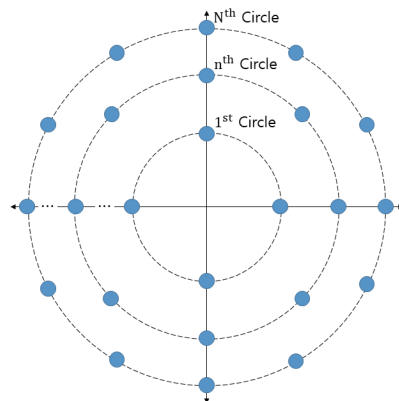


그림 1. CCA 안테나 구조
Fig. 1 CCA antenna structure

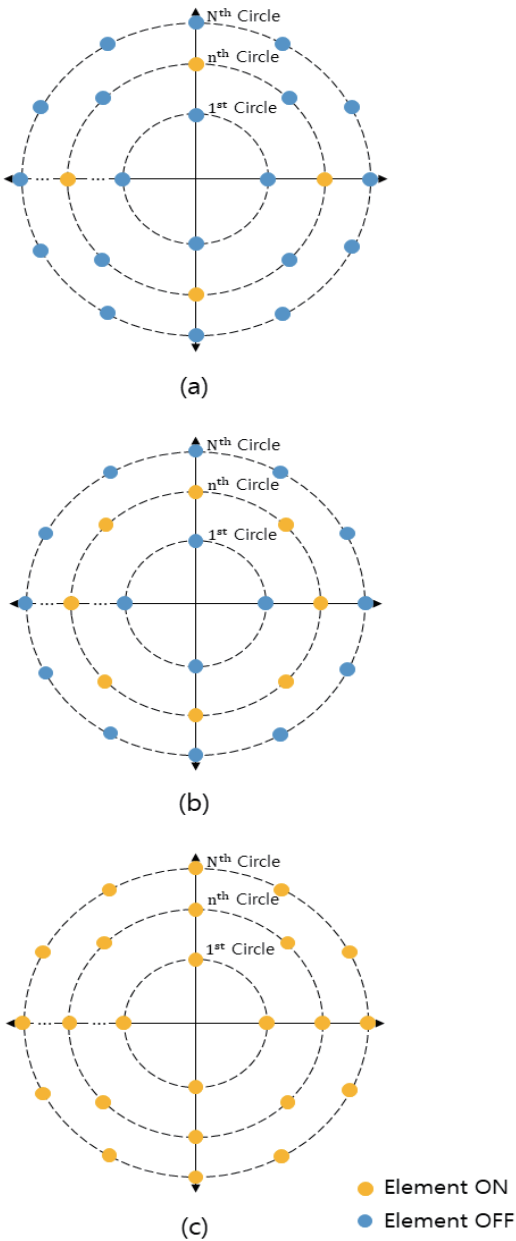


그림 2. FMCCA 안테나 유형 : (a) n 번째 원형 배열의 이격된 일부 안테나 요소만 활성화, (b) n 번째 원형 배열의 전체 안테나 요소 활성화 (c) FMCCA 안테나의 모든 안테나 요소 활성화
 Fig. 2 Types of FMCCA antenna : (a) turning on some scattered elements of n^{th} circular array, (b) turning on entire elements of n^{th} circular array, (c) turning on entire elements of FMCCA

의 개수는 안테나가 탑재되는 시스템의 물리적 상황에 따라 같거나 다르게 배치할 수 있다. 본 논문은 안테나 요소 ON/OFF 기능을 탑재한 MCCA 안테나를 FMCCA 안테나로 정의한다. FMCCA 3가지 안테나 타입은 그림2에 나타나 있다. 상황에 따라 다수 개 원형 배열의 이격된 일부 안테나 요소 혹은 전체 안테나 요소를 활성화 할 수 있다.

III. 수신신호 모델

본 장은 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘을 FMCCA 안테나에 적용하기 위한 수신신호 모델을 제시한다. FMCCA 안테나로 L 개의 신호와 AWGN(: Additive White Gaussian Noise)을 포함한 수신신호가 입사된다고 가정하면, 샘플(sample) 인덱스 k 에 대한 수신신호 벡터는 식(1)과 같이 주어진다.

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

식 (1)에서 $\mathbf{r}(k)$ 는 수신신호 벡터($M \times 1$)이고, \mathbf{A} 는 배열 응답 행렬($M \times L$)이며, $\mathbf{s}(k)$ 는 신호 벡터이고 ($L \times 1$), $\mathbf{n}(k)$ 는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 iid(: independent and identically distributed) 특성을 갖는 잡음 요소들로 이루어진 AWGN 벡터($M \times 1$)이다. 배열 응답 행렬(\mathbf{A})의 열은 각 신호의 배열 응답 벡터로 다음 조건에 따라 다르게 정의된다.

1. n 번째 원형 배열의 일부 안테나 소자 활성화

$$\mathbf{a}_l = \begin{bmatrix} e^{-j\alpha r_n \sin\theta_l \cos(\phi_l - 2\pi i_1/M_n)} \\ e^{-j\alpha r_n \sin\theta_l \cos(\phi_l - 2\pi i_2/M_n)} \\ \vdots \\ e^{-j\alpha r_n \sin\theta_l \cos(\phi_l - 2\pi i_{end}/M_n)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2. n 번째 원형 배열의 모든 안테나 소자 활성화

$$\mathbf{a}_l = \begin{bmatrix} e^{-j\alpha r_n \sin\theta_l \cos\phi_l} \\ e^{-j\alpha r_n \sin\theta_l \cos(\phi_l - 2\pi/M_n)} \\ \vdots \\ e^{-j\alpha r_n \sin\theta_l \cos(\phi_l - 2\pi(M_n - 1)/M_n)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

3. FMCCA 안테나의 모든 안테나 요소 활성화

$$\mathbf{a}_l = \begin{bmatrix} e^{-j\alpha r_1 \sin \theta_l \cos \phi_l} \\ e^{-j\alpha r_1 \sin \theta_l \cos (\phi_l - 2\pi/M_1)} \\ \vdots \\ e^{-j\alpha r_n \sin \theta_l \cos (\phi_l - 2\pi(M_1-1)/M_1)} \\ e^{-j\alpha r_2 \sin \theta_l \cos \phi_l} \\ e^{-j\alpha r_2 \sin \theta_l \cos (\phi_l - 2\pi/M_2)} \\ \vdots \\ e^{-j\alpha r_2 \sin \theta_l \cos (\phi_l - 2\pi(M_2-1)/M_2)} \\ \vdots \\ e^{-j\alpha r_N \sin \theta_l \cos \phi_l} \\ e^{-j\alpha r_N \sin \theta_l \cos (\phi_l - 2\pi/M_N)} \\ \vdots \\ e^{-j\alpha r_N \sin \theta_l \cos (\phi_l - 2\pi(M_N-1)/M_N)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(2)에서 i_n 은 n 번째 원형 배열의 활성화된 안테나 소자의 인덱스를 나타내며, 식(2)~(4)에서 $\alpha = 2\pi/\lambda$ 는 파상수이고, r_n 은 n 번째 원형 배열의 반지름을 나타낸다.

IV. FMCCA 안테나 기반 캐스케이드 도래각 추정

그림 3은 FMCCA 안테나 기반의 CAPON과 Beamspace MUSIC 알고리즘으로 구성된 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘의 기본 구조를 나타낸다. CAPON 알고리즘은 FMCCA 안테나 배열 중 가장 안쪽에 위치한 원형 배열의 안테나 요소들만 활성화시켜 얻은 수신신호를 이용하여, 신호들의 도래각들이 포함된 대략적인 도래각 그룹들을 추정한다. Beamspace MUSIC은 추정된 도래각 그룹의 범위 내에 있는 상세한 신호의 도래각들을 추정하기 위해, CCA 안테나의 모든 요소를 활성화하여 얻은 수신신호를 이용한다.

4.1 도래각 그룹 추정을 위한 CAPON 알고리즘

본 논문에서는 CAPON 알고리즘이 FMCCA 안테나 배열 중 요소의 개수가 가장 적은 가장 안쪽에 위치한 원형 배열의 안테나 요소를 사용하는 것을 고려

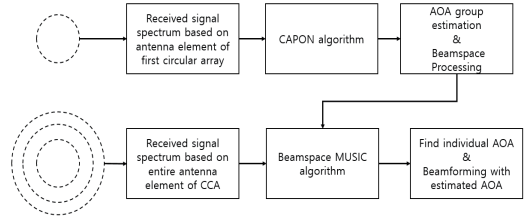


그림 3. FMCCA 안테나 기반 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘 구조

Fig. 3 Architecture of cascade AOA estimation algorithm based on FMCCA antenna

하였지만, 상황에 따라 어떠한 원형 배열의 안테나 요소의 일부 또는 전체를 사용하여도 무방하다. 제안된 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘에서 CAPON 알고리즘의 역할은 낮은 복잡도로 빠르게 다수개의 신호 도래각들이 포함된 도래각 그룹을 대략적으로 찾는 것이다. 도래각 그룹은 식(5)의 CAPON 알고리즘 공간 스펙트럼으로부터 추정된다.

$$P_{n^{th} \text{cir}} = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta, \phi)_{n^{th} \text{cir}} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta, \phi)_{n^{th} \text{cir}}} \quad (5)$$

$\mathbf{a}(\theta, \phi)_{n^{th} \text{cir}}$ 는 n 번째 원형 배열 안테나 요소가 활성화된 상태의 특정 고도각 및 방위각에 대한 배열 응답 벡터이고, $\mathbf{R} = E[\mathbf{r}(k)\mathbf{r}(k)^H]$ 은 해당 수신호 벡터의 공분산 행렬이다. 식(5)의 공간 스펙트럼에 대한 피크값이 각 도래각 그룹의 중심이 되고, 추정된 도래각 그룹의 검색범위는 임계값 설정을 통해 결정된다.

4.2 상세 도래각 추정을 위한 Beamspace MUSIC

원하는 범위 안에서 개별 신호의 도래각들을 추정하기 위해서 CCA 안테나 모델을 Beamspace MUSIC에 적용하여야 하는데, 이를 위해 빔공간 변환 행렬 (\mathbf{B})을 생성한 후 수신신호에 곱해주는 일련의 과정이 필요하다. 본 논문은 [4]에서 제안된 빔공간 변환 행렬을 사용하며, 그 출력은 식(6)과 같이 주어진다.

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{B}\mathbf{r}(k) \quad (6)$$

추정된 도래각 그룹 내 개별 신호의 상세 도래각은 식(7)과 같이 주어지는 Beamspace MUSIC 알고리즘의 공간 스펙트럼을 이용하여 추정된다.

$$P_{FMCCA} = \frac{1}{[\mathbf{B}\mathbf{a}(\theta, \phi)]^H \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H [\mathbf{B}\mathbf{a}(\theta, \phi)]} \quad (7)$$

\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. 식(7)의 피크 값들을 이용하여 해당 그룹 내의 상세 신호 도래각을 추정한다. 캐스케이드 알고리즘에서 Beamspace MUSIC은 상세 도래각을 추정하여야 하므로 전체 안테나 요소를 이용하여 수신된 신호를 기반으로 하지만, 추정된 도래각 그룹의 범위 내에서만 도래각을 검색하므로 MUSIC과 같은 일반적인 도래각 추정 알고리즘에 비해 월등히 낮은 복잡도를 갖는다.

V. 컴퓨터 시뮬레이션

본 장은 FMCCA 안테나 기반 캐스케이드 알고리즘의 도래각 추정 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제공한다. 시뮬레이션을 위해 총 2가지 시나리오를 고려하였는데, 첫 번째 시나리오는 신호의 고도각은 동일하고 방위각은 서로 다른 경우이고, 두 번째 시나리오는 신호의 고도각과 방위각이 모두 다른 경우이다. 또한 모든 신호의 SNR(Signal-to-Noise Ratio)은 20dB로 동일하다고 가정하였다. 각 시나리오에 대한 신호의 주요 매개변수는 표1과 2에 요약되어 있고, 시뮬레이션에 사용된 FMCCA 안테나의 주요 매개변수는 표3에 요약되어 있다. 시뮬레이션을 위해 [9]에서 제안된 신호 모델 중 AM(Amplitude Modulation), CW(Continuous Wave), WB(Wideband) 잡음 신호 모델이 사용되었다.

그림 4는 첫 번째 시나리오에 대한 수신신호 스펙트럼으로, 3개의 신호를 확인할 수 있다. 그림5는 첫 번째 원형 배열의 10개 안테나 요소를 통해 수신된 신호 기반의 CAPON 알고리즘 공간 스펙트럼이다. 그림5를 통해 고도각 $24^\circ \sim 26^\circ$, 방위각 $-75^\circ \sim -35^\circ$ 의 검색범위를 갖는 하나의 도래각 그룹을 식별할 수

있다. 그림 6은 FMCCA의 모든 요소를 통해 수신된 신호 기반의 Beamspace MUSIC 알고리즘 공간 스펙트럼이다. 그림을 통해 도래각 그룹 내 3개의 개별 신호에 대한 도래각을 정확히 추정함을 확인할 수 있다. 그림 7은 두 번째 시나리오에 대한 수신신호 스펙트럼으로, 4개의 신호를 확인할 수 있다. 그림8은 첫 번째 원형 배열에 위치한 10개의 안테나 요소 기반의 CAPON 알고리즘 공간 스펙트럼이다. 그림을 통해 고도각 $-60^\circ \sim -47^\circ$, 방위각 $-51^\circ \sim -34^\circ$ 의 검색범위를 갖는 제1 도래각 그룹과 고도각 $39^\circ \sim 52^\circ$, 방위각 $47^\circ \sim 63^\circ$ 의 검색범위를 갖는 제2 도래각 그룹을 식별할 수 있다. 그림 9는 FMCCA의 모든 안테나 요소 기반의 Beamspace MUSIC 알고리즘 공간 스펙트럼이다. 그림을 통해 제1 도래각 그룹의 AM1 신호와 CW 신호, 제2 도래각 그룹의 AM2 신호와 FM 신호의 도래각을 정확히 추정함을 확인할 수 있다.

표 1. 첫 번째 컴퓨터 시뮬레이션 시나리오
Table 1. The first computer simulation scenario

Signal	θ°	ϕ°	Carrier frequency
AM	25	-65	0.46
CW	25	-54	0.1
WB	25	-45	0.23

표 2. 두 번째 컴퓨터 시뮬레이션 시나리오
Table 2. The second computer simulation scenario

Signal	θ°	ϕ°	Carrier frequency
AM	-50	-40	0.1
AM	42	57	0.24
CW	-55	-47	0.3
WB	48	50	0.4

표 3. FMCCA 안테나 매개변수
Table 3. FMCCA antenna parameters

Circle number	Radius	Number of elements
1	0.5	10
2	1	15
3	1.5	20
4	2	25

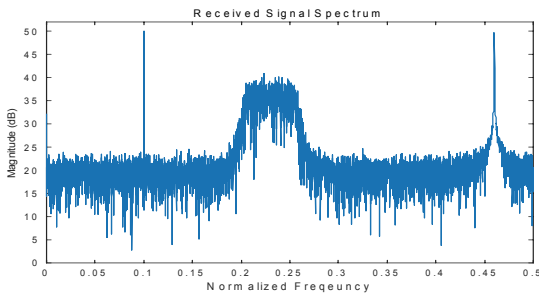


그림 4. 첫 번째 시나리오에 대한 수신신호 스펙트럼
Fig. 4 Received signal spectrum for the first scenario

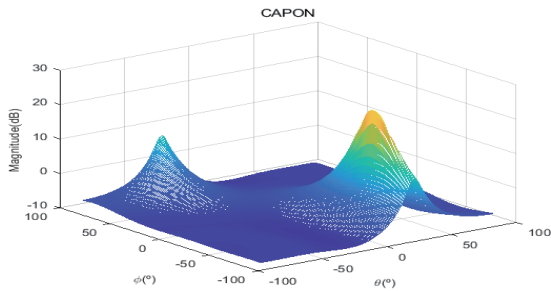


그림 5. 첫 번째 시나리오에 대한 CAPON 공간 스펙트럼
Fig. 5 CAPON spatial spectrum for the first scenario

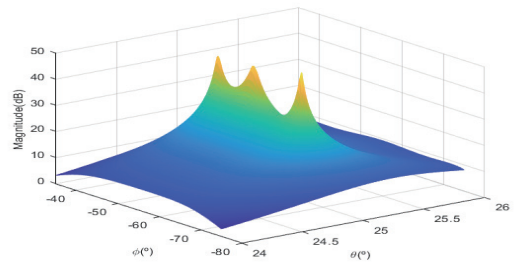


그림 6. 첫 번째 시나리오에 대한 Beamspace MUSIC 공간 스펙트럼
Fig. 6 Beamspace MUSIC spatial spectrum for the first scenario

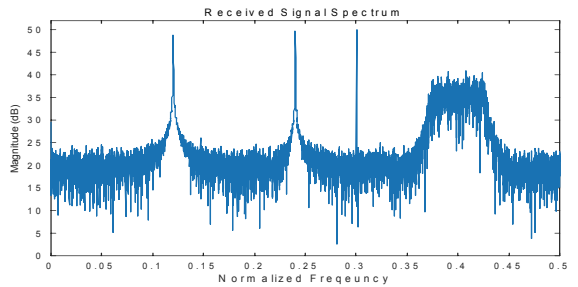


그림 7. 두 번째 시나리오에 대한 수신신호 스펙트럼
Fig. 7 Received signal spectrum for the second scenario

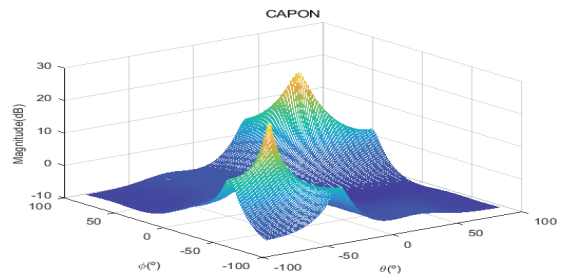


그림 8. 두 번째 시나리오에 대한 CAPON 공간 스펙트럼
Fig. 8 CAPON spatial spectrum for the second scenario

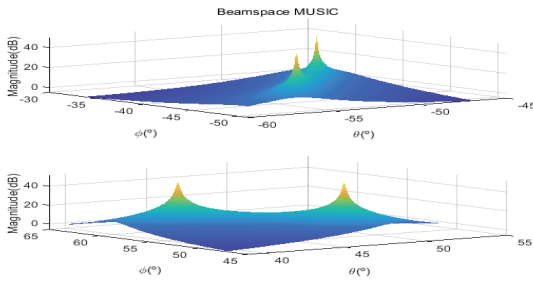


그림 9. 두 번째 시나리오에 대한 Beamspace MUSIC 공간 스펙트럼

Fig. 9 Beamspace MUSIC spatial spectrum for the second scenario

VI. 결 론

본 논문은 메시브 배열 안테나 기반의 도래각 추정 기술이 가지는 복잡도 문제를 개선하기 위해, 안테나 요소를 선택적으로 ON/OFF 시킬 수 있는 기능이 탑재된 FMCCA 안테나 기반의 캐스케이드 도래각 추정 알고리즘을 제안하였다. 제안된 캐스케이드 알고리즘은 첫 번째 원형 배열의 안테나 요소를 기반으로 빠르게 신호들의 도래각 그룹과 검색범위를 결정하기 위한 CAPON과 전체 안테나 요소를 기반으로 추정된 도래각 그룹에서 개별 신호의 상세 도래각을 추정하기 위한 Beamspace MUSIC으로 구성된다. 대략적인 도래각 그룹 추정을 위해, 적은 수의 안테나 요소를 사용하였고, 일반적인 도래각 추정 알고리즘과 다르게 특정한 범위에서만 상세 도래각을 추정하므로, 기존의 방식에 비해 복잡도 면에서 효율적이다. 특히, 제안된 기술은 기존의 도래각 추정 알고리즘으로 실시간 추정이 어려운 메시브 배열 안테나 형태에 대해 월등히 효율적인 복잡도를 가진다.

감사의 글

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

이 논문은 2021년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

References

- [1] IMT Vision - Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond, M.2083-0, Sept. 2015.
- [2] J. Zhang, E. Björnson, M. Matthaiou, D. W. K. Ng, H. Yang, and D. J. Love, (2020). "Prospective multiple antenna technologies for beyond 5G," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 8, 2020, pp. 1637-1660.
- [3] M. I. Hasan and M. Saquib, "Rectangular Planar vs Concentric Circular Array for 5G Beamforming". *arXiv preprint, arXiv:2108.01196*, 2021, pp. 1-5.
- [4] T. Kim and S. Hwang, "Performance Analysis of Cascade AOA Estimator with Concentric Ring Array Antenna," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 15, no. 5, 2020, pp. 849-856.
- [5] T. Kim and S. Hwang, "Performance Analysis of AOA Estimation for Concentric Ring Array Antenna in Beamforming Satellite System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 15, no. 4, 2020, pp. 643-650.
- [6] B. Hamdi, S. Limam, and T. Agui, (2016). "Uniform and Concentric Circular Antenna Arrays Synthesis for Smart Antenna Systems Using Artificial Neural Network Algorithm,"

Progress In Electromagnetics Research B, vol. 67, 2016, pp. 91-105.

- [7] P. K. Sarkar and M. F. Reza, "Performance analysis of uniform concentric circular antenna array beamformer using different doa estimation technique," *In 2018 4th Int. Conf. on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (iCEEICT)*, Dhaka, Bangladesh, Sept. 2018, pp. 320-324.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] T. Kim and S. Hwang, "Performance Analysis of Cascade AOA Estimator with Concentric Ring Array Antenna," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 15, no. 5, 2020, pp. 849-956.
- [11] I. Rhee, "Comparisons of AIC and MDL on Estimation Reliability of NUMBER OF Sources in Direction Finding Problem," *J. of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 15, no. 10, 1990, pp. 842-849.



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

저자 소개



김태윤(Tae-Yun Kim)

2014년 조선대학교 메카트로닉스공학과 졸업(공학사)

2016년 조선대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

2016년 ~ 현재 조선대학교 대학원 전자공학과 박사과정

※ 관심분야 : 적응신호처리, 신호 위치추정, 위치추정 알고리즘